



UNIVERZITET CRNE GORE
ELEKTROTEHNIČKI FAKULTET PODGORICA

Spec.Sci Tamara Ninković

**KOORDINACIJA PUNJENJA ELEKTRIČNIH VOZILA
U SAVREMENIM DISTRIBUTIVNIM SISTEMIMA**

- MAGISTARSKI RAD -

Podgorica, 2021. godina

PODACI I INFORMACIJE O MAGISTRANDU:

Ime i prezime: Tamara Ninković

Datum i mjesto rođenja: 4.12.1996. godine, Podgorica, Crna Gora

Naziv završenog osnovnog studijskog programa i godina diplomiranja:

Energetika i automatika, 2018. godina

Naziv završenog specijalističkog studijskog programa i godina diplomiranja:

Energetika i automatika, smjer Elektroenergetski sistemi, 2019. godina

INFORMACIJE O MAGISTARSKOM RADU:

Naziv postdiplomskog studija: Postdiplomske magistarske akademske studije, Energetika i automatika - Elektroenergetski sistemi

Naslov rada: Koordinacija punjenja električnih vozila u savremenim distributivnim sistemima

Fakultet na kojem je rad odbranjen: Elektrotehnički fakultet, Podgorica

UDK, OCJENA I ODBRANA MAGISTARSKOG RADA:

Datum prijave magistarskog rada: 28.10.2020. godine

Datum sjednice Vijeća univerzitetske jedinice na kojoj je prihvaćena tema: 11.02.2021. godine

Komisija za ocjenu teme i podobnosti magistranda:

Prof. dr Vladimir Katić

Prof. dr Saša Mujović

Doc. dr Martin Čalasan

Mentor:

Doc. dr Martin Čalasan

Univerzitet Crne Gore

Elektrotehnički fakultet

Komisija za ocjenu rada:

Prof. dr Vladimir Katić

Prof. dr Saša Mujović

Doc. dr Martin Čalasan

Komisija za odbranu rada:

Prof. dr Vladimir Katić

Prof. dr Saša Mujović

Doc. dr Martin Čalasan

Datum odbrane: 23.12.2021. godine

Predgovor	10
Izvod rada	11
Abstract	12
1. Uvod	13
2. Distributivni sistem električne energije	16
2.1. Planiranje razvoja distributivnog sistema	17
2.2. Struktura i topologije distributivnog sistema električne energije	18
2.2.1. Primarna mreža	19
2.2.1.1. Radijalna konfiguracija	20
2.2.1.2. Prstenasta konfiguracija	21
2.2.1.3. Konfiguracija sa dvostranim napajanjem	22
2.2.2. Sekundarna mreža.....	22
2.3. Tokovi snaga u distributivnom sistemu	23
2.4. Gubici električne energije	25
2.5. Zahtjevi za kvalitetom snabdijevanja električnom energijom	26
2.6. Savremeni distributivni sistemi.....	29
2.6.1. Ciljevi smanjenja emisije gasova sa efektom staklene bašte	30
2.6.2. Distribuirani izvori električne energije	31
2.6.2.1. Solarna fotonaponska tehnologija	32
2.6.2.2. Tehnologija vjetroagregata.....	35
2.6.2.3. Tehnologija na biomasu	38
2.6.2.4. Hidroelektrane	40
2.6.3. Pametne mreže	41
3. Električna vozila	44
3.1. Tipovi električnih vozila	45
3.2. Konfiguracije električnih vozila	47
3.2.1. Izvor napajanja u električnom vozilu.....	49
3.2.1.1. Baterije	50
3.2.2. Električni motori	56
3.3. Punjenje električnih vozila.....	56
3.3.1. Nivoi punjenja.....	58
3.3.1.1. Normalno punjenje	58
3.3.1.2. Umjereno-brzo punjenje.....	59
3.3.1.3. Brzo punjenje	59
3.3.2. Tipovi konekcije	60

3.3.3. Modovi punjenja	60
3.3.3.1. Mod 1	60
3.3.3.2. Mod 2	61
3.3.3.3. Mod 3	61
3.3.3.4. Mod 4	62
3.3.4. Standardi za punjenje električnih vozila (EVSE)	62
3.3.5. Topologije AC/DC konvertora	63
3.3.5.1. Monofazne topologije.....	65
3.3.5.2. Trofazne topologije	69
3.3.6. Čoperi.....	70
3.3.7. Pametno punjenje električnih vozila i koncept injektiranja energije iz vozila u mrežu.....	73
4. Koordinacija punjenja električnih vozila u tradicionalnom distributivnom sistemu.....	75
4.1. Početne pretpostavke i ulazni podaci.....	76
4.2. Varijanta 1 – Nekoordinisano punjenje električnih vozila	79
4.3. Varijanta 2 – Punjenje tokom niže tarife	82
4.4. Varijanta 3 – Pametno punjenje.....	85
4.5. Praktična primjena – izvod 10 kV Radoje Dakić 2.....	94
4.5.1. Nekoordinisano punjenje	95
4.5.2. Punjenje tokom niže tarife	97
4.5.3. Pametno punjenje.....	99
5. Koordinacija punjenja električnih vozila u savremenom distributivnom sistemu ...	103
5.1. Početne pretpostavke i ulazni podaci.....	103
5.2. Varijanta 1 – Nekoordinisano punjenje	107
5.3. Varijanta 2 – Koordinisano punjenje	109
6. Zaključak	124
7. Literatura.....	127

POPIS TABELA

Tabela 2.6.1 Podjela distribuirane proizvodnje po tipu izvora	31
Tabela 2.6.2 Kratka istorija razvoja fotonaponske tehnologije.....	32
Tabela 2.6.3 Uticaj različitih faktora na performanse solarnih panela.....	34
Tabela 2.6.4 Tipovi i karakteristike turbina koje se koriste u hidroelektranama	40
Tabela 2.6.5 Poređenje konvencionalnih i pametnih mreža sa aspekta osnovnih karakterisitka	41
Tabela 3.1.1 Karakteristike pojedinačnih tipova električnih vozila.....	47
Tabela 3.2.1 Zahtjevi za odabir baterija u električnim vozilima.....	51
Tabela 3.2.2 Pregled prednosti i mana osnovnih tipova baterije	51
Tabela 3.2.3 Tehničke karakteristike pojedinih tipova baterija za električna vozila	53
Tabela 3.2.4 Vrijednosti koeficijenata a_n , b_n , i c_n dobijene primjenom eksponencijalne regresije	55
Tabela 3.3.1 Vrste ispravljača sa korekcijom faktora snage	65
Tabela 4.1.1 Modeli električnih vozila.....	77
Tabela 5.1.1 Karakteristike vjetroturbine Aeolos	105
Tabela 5.1.2 Karakteristike solarnog panela Lubi Solar	107
Tabela 5.1.3 Modeli vozila korišćenih u simulaciji	107

POPIS SLIKA

Slika 2.1.1	Faze razvoja distributivnog sistema	17
Slika 2.1.2	Promjena kapaciteta distributivne mreže u odnosu na porast distributivnog konzuma	18
Slika 2.2.1	Pojednostavljena šema distributivnog sistema električne energije	19
Slika 2.2.2	Radialna topologija primarne mreže	20
Slika 2.2.3	Prstenasta topologija.....	21
Slika 2.2.4	Konfiguracija sa dvostranim napajanjem	22
Slika 2.2.5	Topologije niskonaponske mreže	23
Slika 2.5.1	Promjena ukupnih troškova sistema u odnosu na kvalitet snabdijevanja	28
Slika 2.6.1	Petostruka paralelna veza tri redno vezana solana modula	33
Slika 2.6.2	Sistemi koji se koriste za povezivanje solarnih panela na distributivni sistem	35
Slika 2.6.3	Izlazna karakteristika vjetroagregata	36
Slika 2.6.4	Blok šema vjetroagregata sa konstantnom brzinom obrtanja.....	37
Slika 2.6.5	Blok šema vjetroagregata sa fully rated konvertorom.....	37
Slika 2.6.6	Blok šema vjetroagregata sa dvostrano napajanim asinhronim generatorom ...	38
Slika 2.6.7	Blok šema osnovnih infrastrukturnih komponenti pametne mreže i njihovih međusobnih veza	43
Slika 3.2.1	Blok šema električnog vozila	48
Slika 3.2.2	Moguće konfiguracije električnih vozila.....	49
Slika 3.2.3	Ekvivalentna šema baterije.....	53
Slika 3.2.4	Primjer ekvivalentne šeme baterije kojom se modeluju dinamički procesi u bateriji.....	54
Slika 3.2.5	Funkcije promjene napona praznog hoda od stepena napunjenosti baterije dobijene korićenjem koeficijenata iz tabele pri temperaturi od (a) 45°C, (b) 25°C, (c) 0°C i (d) -20°C	55
Slika 3.3.1	Blok šema naizmjeničnog (a) i jednosmjernog (b) sistema punjenja.....	57
Slika 3.3.2	Blok šema naizmjenične EVSE.....	57
Slika 3.3.3	Blok šema jednosmjerne EVSE	58
Slika 3.3.4	Šema kontrolnog pilota za Mod 3 punjenja.....	61
Slika 3.3.5	Blok šema dvostepenog ispravljača	65
Slika 3.3.6	Konvencionalni <i>boost</i> konvertor sa korekcijom faktora snage	66
Slika 3.3.7	<i>Interleaved boost</i> konvertor sa korekcijom faktora snage.....	66
Slika 3.3.8	Bezmosni <i>boost</i> konvertor sa korekcijom faktora snage.....	67
Slika 3.3.9	Bezmosni <i>interleaved</i> konvertor sa korekcijom faktora snage	67

Slika 3.3.10	(a) THD faktor i talasni oblik struje konvencionalnog <i>boost</i> konvertora, (b) THD faktor i talasni oblik struje <i>interleaved boost</i> konvertora, (c) THD faktor i talasni oblik struje bezmosnog <i>interleaved boost</i> konvertora.....	68
Slika 3.3.11	<i>Vienna</i> ispravljač sa korekcijom faktora snage i impulsno-širinskom modulacijom.....	70
Slika 3.3.12	Punomosni rezonantni LLC konvertor	71
Slika 3.3.13	Punomosni konvertor sa faznim pomjerajem i sa prekidanjem pri nultom naponu	71
Slika 3.3.14	Punomosni konvertor sa izlaznim kapacitivnim filterom.....	72
Slika 3.3.15	<i>Interleaved</i> konvertor sa udvostručavanjem napona i prekidanjem pri nultom naponu	72
Slika 4.1.1	Topologija dijela sredjenaponske i niskonaponske distributivne mreže	76
Slika 4.1.2	Dnevni dijagram opterećenja.....	77
Slika 4.1.3	Ekivalentna šema.....	78
Slika 4.2.1	Promjena napona čvora 83 – nekoordinisano punjenje.....	80
Slika 4.2.2	Dijagram opterećenja čvora 83 – nekoordinisano punjenje	81
Slika 4.2.3	Promjena snage punjenja vozila u čvoru 83 – nekoordinisano punjenje	81
Slika 4.3.1	Promjena napona čvora 83 – punjenje tokom niže tarife	82
Slika 4.3.2	Dijagram opterećenja čvora 83 – punjenje tokom niže tarife	83
Slika 4.3.3	Promjena snage punjenja električnog vozila u čvoru 83 – punjenje tokom niže tarife.....	83
Slika 4.3.4	Dijagram opterećenja u čvoru 83 za veći „odziv“ potrošnje tokom niže tarife.....	84
Slika 4.3.5	Promjena napona čvora 83 za slučaj većeg „odziva“ potrošnje tokom niže tarife.....	84
Slika 4.4.1	Dijagram koordinacije punjenja električnih vozila	86
Slika 4.4.2	Promjena napona čvora 83 – minimizacija odstupanja napona	88
Slika 4.4.3	Dijagram opterećenja čvora 83 za penetraciju od 50 % – minimizacija odstupanja napona	89
Slika 4.4.4	Promjena snage punjenja u čvoru 83 – minimizacija odstupanja napona.....	89
Slika 4.4.5	Promjena cijene električne energije na berzi u Hrvatskoj (25.05.2021. godine).....	90
Slika 4.4.6	Promjena napona čvora 83 – minimizacija odstupanja napona i troškova preuzete električne energije.....	90
Slika 4.4.7	Dijagram opterećenja čvora 83 za penetraciju od 50 % – minimizacija odstupanja napona i troškova preuzete električne energije	91

Slika 4.4.8	Promjena snage punjenja vozila u čvoru 83 za penetraciju od 50 % – minimizacija odstupanja napona i troškova preuzete električne energije	91
Slika 4.4.9	Promjena snage gubitaka u mreži za nekoordinisano, punjenje tokom niže tarife i pametno punjenje u slučaju penetracije električnih vozila od 50 %.....	92
Slika 4.4.10	Promjena snage gubitaka u mreži za nekoordinisano, punjenje tokom niže tarife i pametno punjenje u slučaju penetracije električnih vozila od 100 %	92
Slika 4.5.1	Izvod Radoje Dakić 2 iz TS 110/10 kV Podgorica 4 (sa aproksimiranom 0,4 kV mrežom).....	94
Slika 4.5.2	Jedinični dijagrami potrošnje za TS 10/0,4 kV na izvodu Radoje Dakić 2.....	95
Slika 4.5.3	Promjena napona čvora 81 – nekoordinisano punjenje.....	96
Slika 4.5.4	Promjena snage punjenja električnog vozila u čvoru 81 – nekoordinisano punjenje	96
Slika 4.5.5	Dijagram opterećenja čvora 81 – nekoordinisano punjenje	97
Slika 4.5.6	Promjena napona čvora 81 – punjenje tokom niže tarife	98
Slika 4.5.7	Dijagram opterećenja čvora 81 – punjenje tokom niže tarife	98
Slika 4.5.8	Promjena snage punjenja u čvoru 81 - punjenje tokom niže tarife	98
Slika 4.5.9	Promjena napona u čvoru 96 – punjenje tokom niže tarife.....	99
Slika 4.5.10	Promjena napona čvora 81 – minimizacija odstupanja napona	100
Slika 4.5.11	Dijagram opterećenja čvora 81 – minimizacija odstupanja napona.....	100
Slika 4.5.12	Promjena snage punjenja u čvoru 81 – minimizacija odstupanja napona.....	101
Slika 4.5.13	Promjena snage gubitaka u mreži za nekoordinisano, punjenje tokom niže tarife i pametno punjenje u slučaju penetracije električnih vozila od 50 %....	101
Slika 4.5.14	Promjena snage gubitaka u mreži za nekoordinisano, punjenje tokom niže tarife i pametno punjenje u slučaju penetracije električnih vozila od 100 %..	102
Slika 5.1.1	Topologija dijela 0,4 kV distributivnog sistema korišćenog u simulaciji.....	104
Slika 5.1.2	Histogram vrijednosti insolacije u Podgorici	106
Slika 5.2.1	Promjena napona čvora 9 – nekoordinisano punjenje.....	108
Slika 5.2.2	Dijagram opterećenja čvora 9 – nekoordinisano punjenje	108
Slika 5.2.3	Promjena napona čvora 10 – nekoordinisano punjenje.....	109
Slika 5.2.4	Dijagram opterećenja čvora 10 – nekoordinisano punjenje	109
Slika 5.3.1	Dijagram koordinacije punjenja i injektiranja u mrežu električnih vozila	113
Slika 5.3.2	Promjena napona čvora 9 – minimizacija odstupanja napona	114
Slika 5.3.3	Dijagram opterećenja čvora 9 – minimizacija odstupanja napona.....	114
Slika 5.3.4	Proizvodnja distribuiranih jedinica umanjena za snagu punjenja vozila u čvoru 13	115
Slika 5.3.5	Promjena napona u čvoru 10 – minimizacija odstupanja napona	115

Slika 5.3.6	Dijagram opterećenja u čvoru 10 – minimizacija odstupanja napona.....	116
Slika 5.3.7	Promjena cijene električne energije na berzi u Hrvatskoj	116
Slika 5.3.8	Dijagram opterećenja čvora 9 – minimizacija troška električne energije preuzete iz prenosnog sistema	117
Slika 5.3.9	Promjena napona u čvoru 9 - minimizacija troškova električne energije preuzete iz prenosnog sistema	117
Slika 5.3.10	Dijagram opterećenja čvora 10 - minimizacija troškova električne energije preuzete iz prenosnog sistema	118
Slika 5.3.11	Promjena napona čvora 10 - minimizacija troškova električne energije preuzete iz prenosnog sistema	118
Slika 5.3.12	Dijagram opterećenja čvora 9 – minimizacija snage koja se preuzima iz prenosne mreže.....	119
Slika 5.3.13	Promjena napona čvora 9 - minimizacija snage koja se preuzima iz prenosne mreže	119
Slika 5.3.14	Promjena napona u čvoru 13 - minimizacija snage koja se preuzima iz prenosne mreže.....	120
Slika 5.3.15	Dijagram opterećenja sistema (ulazna snaga u sistem) za slučaj koordinisanog punjenja sa minimizacijom ulazne snage i nekoordinisanog punjenja	120
Slika 5.3.16	Dijagram opterećenja čvora 9 – minimizacija varijacije snage opterećenja ..	121
Slika 5.3.17	Dijagram opterećenja čvora 10 – minimizacija varijacije snage opterećenja .	121
Slika 5.3.18	Dijagram opterećenja čvora 13 – minimizacija varijacije snage opterećenja .	122
Slika 5.3.19	Promjena snage gubitaka za slučaj koordinisanog punjenja kojim se minimizuje snaga gubitaka i nekoordinisanog punjenja	122

Predgovor

U skladu sa definisanim ciljevima razvoja energetskog sektora, koji se bazira na smanjenju emisije gasova sa efektom staklene bašte, cjelokupni elektroenergetski sistem, a naročito distributivni, prolazi kroz fazu ogromne transformacije. Za razliku od tradicionalnog, „*top-down*“ koncepta elektroenergetskog sistema u kojem je distributivni sistem predstavljao „pasivnu mrežu“, savremeni distributivni sistem postaje tačka spajanja različitih novih resursa na strani potrošača, proizvodnih objekata iz obnovljivih izvora energije, prenosnog sistema i potrošača. Integracijom različitih distribuiranih resursa otvorene su nove mogućnosti pružanja usluga elektroenergetskom sistemu. Samim tim, novi resursi su doveli do promjene u lancu proizvodnje, potrošnje, pružanja pomoćnih usluga sistemu i distribucije električne energije, rezultirajući porastom složenosti tokova snaga, zaštite, upravljanja i nadzora nad distributivnim sistemom.

Među novim učesnicima u distributivnom sistemu, kao odgovor na značajno učešće transportnog sektora u ukupnoj emisiji gasova sa efektom staklene bašte, istakla su se električna vozila. Naime, pored osnovne funkcije prevoza, uz „optimalno“ upravljanje punjenjem, električna vozila mogu predstavljati značajni distribuirani resurs koji obezbjeđuje i ekonomske benefite i benefite po pitanju očuvanja životne sredine. Ovdje se prije svega misli na mogućnost pametnog punjenja, odnosno upravljanja vrijednostima snage punjenja, i mogućnost injektiranja električne energije iz vozila u mrežu u cilju pružanja usluga sistemu, bilo kroz učešće u regulaciji frekvencije i napona, pružanja podrške sistemu u periodima „oskudice“, skladištenje električne energije iz intermitentnih izvora i slično. Međutim, baterije električnih vozila predstavljaju i novo dodatno opterećenje za distributivni sistem, koje za veći nivo penetracije električnih vozila može dostići značajne vrijednosti. U slučaju nekontrolisanog punjenja, ovo novo opterećenje može rezultirati značajnim povećanjem vršnog opterećenja sistema, smanjenjem napona ispod dozvoljene granice odstupanja, povećanjem gubitaka u sistemu, preopterećenjem nadzemnih vodova i kablova itd. Prema tome, u cilju smanjenja negativnog uticaja punjenja električnih vozila na sistem i omogućavanja velike penetracije ovih vozila na ekonomski efikasan način, razvoj strategije pametnog punjenja predstavlja prioritet.

Imajući navedeno u vidu, u ovom radu je obrađena koordinacija punjenja električnih vozila u tradicionalnom i savremenom konceptu distributivnih sistema. Kako bi se izvršilo poređenje stanja u mreži prilikom koordinisanog i drugih mogućih scenarija punjenja, sprovedene su i simulacije nekoordinisanog i punjenja tokom niže tarife za tradicionalni distributivni sistem, i simulacija nekoordinisanog punjenja za savremeni distributivni sistem. Dodatno, analizirani su i rezultati simulacije nekoordinisanog, punjenja tokom niže tarife i pametnog punjenja na praktičnom primjeru, odnosno na 10 kV izvodu Radoje Dakić 2 iz TS 110/10 kV Podgorica 4. Budući da su u savremenom sistemu modelovane distribuirane elektrane iz obnovljivih izvora (solar i vjetar), koordinacija punjenja u ovom slučaju je obuhvatala i mogućnost injektiranja električne energije iz vozila u mrežu.

Izvod rada

Predviđena penetracija električnih vozila, koja je prepoznata kao ključ za smanjenje emisije gasova sa efektom staklene bašte iz transportnog sektora, prijeti da dovede do značajnog povećanja opterećenja distributivnog, tj. kompletnog elektroenergetskog sistema, odnosno da rezultira narušavanjem propisanog nivoa kvaliteta, sigurnosti i pouzdanosti sistema. S tog aspekta, razvoj strategije pametnog punjenja predstavlja jedan od najvažnijih koraka za omogućavanje velike penetracije ovih vozila uz što manje troškove za sistem i njegove korisnike. Ovaj rad se upravo bavi optimizacijom punjenja električnih vozila u pametnim distributivnim sistemima primjenom GAMS programskog okruženja.

U cilju koordinacije punjenja električnih vozila korišćeno je nekoliko funkcija cilja – minimizacija odstupanja napona, gubitaka u mreži, troškova električne energije koja je preuzeta iz prenosnog sistema itd, pri čemu je za rješavanje optimizacionog problema primijenjeno nelinearno programiranje. Optimizacija je sprovedena za dva koncepta distributivnog sistema – tradicionalni i savremeni distributivni sistem. Pored simulacije pametnog punjenja, izvršena je simulacija nekoordinisanog i punjenja tokom niže tarife u tradicionalnom distributivnom sistemu, odnosno nekoordinisanog punjenja u savremenom sistemu. Za modelovanje intermitentne proizvodnje solarne elektrane u savremenom distributivnom sistemu korišćena je *Beta* raspodjela, dok je varijacija brzine vjetra modelovana primjenom *Weibull*-ove raspodjele. Vrijednost parametara obje raspodjele je dobijena na osnovu istorijskih podataka o insolaciji i brzini vjetra u Podgorici. Sa druge strane, raspored punjenja električnih vozila na javnim punionicama u ovom sistemu je utvrđen primjenom jednostavnog algoritma baziranog na Teoriji čekanja, gdje je vjetrovatnoća dolaska vozila na punjenje modelovana korišćenjem *Poisson*-ove raspodjele. Pored navedenog, sprovedena je i simulacija pametnog, nekoordinisanog i punjenja tokom niže tarife na dijelu distributivnog sistema Crne Gore, odnosno na izvodu Radoje Dakić 2 iz TS 110/10 kV Podgorica 4.

Za oba koncepta distributivnog sistema, analizom rezultata simulacija je potvrđeno da pametno, odnosno koordinisano punjenje predstavlja najbolju varijantu, i sa aspekta promjene napona u čvorovima mreže i sa aspekta gubitaka u sistemu. Naime, demonstrirano je da prilikom nekoordinisanog punjenja dolazi do pada efektivne vrijednosti napona ispod dozvoljene granice odstupanja i značajnog povećanja opterećenja sistema i snage gubitaka, dok je po pitanju punjenja vozila tokom niže tarife (kod tradicionalnog distributivnog sistema) zaključeno da bi ova situacija, zbog odsustva koordinacije, mogla rezultirati pojavom vršnog opterećenja tokom noći, čime bi ograničenja u sistemu bila ugrožena. Prema tome, koordinacija punjenja se istakla kao najbolje rješenje iz perspektive distributivnog sistema.

Rezultati simulacija na praktičnom primjeru su potvrdili prethodno donijete zaključke, čime je istaknut značaj optimizacije punjenja električnih vozila za povećanje efikasnosti korišćenja distributivnog sistema. Dodatno, primjenom CONOPT solvera je postignuta velika brzina konvergencije navedenih algoritama, čime se otvara mogućnost razvoja algoritma koordinacije u realnom vremenu, što može biti predmet budućih istraživanja.

Ključne riječi: distributivni sistem, električna vozila, GAMS, koordinacija punjenja.

Abstract

In spite of being recognized as a vital measure to reduce greenhouse gas emissions from the transport sector, the anticipated large penetration of electric vehicles threatens to drastically increase peak demand of the distribution system and consequently jeopardize quality, security, and reliability indices of the overall power system. Hence, the development of a suitable smart charging strategy stands as a “vital gap to be covered” to enable more economically efficient adoption of these vehicles. Therefore, this paper examines the optimization of electric vehicle charging in the distribution system in the GAMS modelling environment.

In a nutshell, apart from the proposed smart charging profile, typical charging use-cases are analysed in two basic structures of the power systems, i.e. uncoordinated and dual tariff charging in the traditional structure, and uncoordinated charging in the modern distribution system. The coordinated charging schedule is based on several objective functions, such as minimization of voltage deviation, electricity cost, power losses, etc., while the optimization problem is solved by nonlinear programming. In the modern distribution system, the probability models, i.e. Beta and Weibull distribution are applied to describe volatile photovoltaic and small wind plant power output. The parameters of these distributions were based on the historical data of irradiation and wind speed in Podgorica. On the other hand, the simplified Queuing theory algorithm was introduced to model electric vehicle charging schedules at fast-charging stations. Frequency of the electric vehicle arrival was modelled by Poisson distribution. Additionally, the simulations of uncoordinated, dual tariff and smart charging of the electric vehicles are conducted for the section of the Montenegrin distribution system – 10 kV power line Radoje Dakić 2 in SS 110/10 kV Podgorica 4.

The results of the analysis have shown that the proposed smart (coordinated) charging approach mitigates the impact of electric vehicle charging on the distribution system, causing no voltage deviations and reducing power losses. On the other hand, the uncoordinated charging has led to the violation of system constraints (voltage range), increased peak demand and technical losses. Additionally, in case of the traditional distribution system, it was demonstrated that unmonitored charging during the night could result in the emergence of the additional peak, obtaining the similar outcome as an uncoordinated charging. Therefore, the coordinated charging is proved to have the most advantages.

The practical case simulation led to the similar conclusions, reconfirming the importance of the coordination of electric vehicle charging for increasing the efficiency of the system operation and utilization. Additionally, the proposed optimization algorithms showed high speed of convergence due to the use of CONOPT solver embedded in GAMS, thus allowing the development of the real-time coordination algorithms.

Key words: charging coordination, distribution system, electric vehicles, GAMS.

1. Uvod

Početak globalne borbe protiv klimatskih promjena, koji je ozvaničen stupanjem na snagu Okvirne Konvencije Ujedinjenih nacija o klimatskim promjenama (eng. *United Nations Framework Convention on Climate Change* – UNFCCC) u martu 1994. godine i formalizovan usvajanjem Pariskog sporazuma u decembru 2015. godine, uz dodatne ambiciozne ciljeve dekarbonizacije poput Evropskog zelenog dogovora (eng. *European Green Deal*), doveo je do promjene paradigme razvoja energetike, koja se usmjerava na tranziciju ka održivom, dekarbonizovanom, pouzdanom i kompetentnom energetsom sistemu [1, 2]. U novonastalim okolnostima, elektroenergetski sistemi (EES) se suočavaju sa nezabilježenim izazovima koji su posljedica uticaja više različitih faktora: povećana izgradnja proizvodnih objekata iz obnovljivih izvora energije (intermitentni izvori), porast potreba za električnom energijom (električna vozila i sistemi grijanja), integracija informaciono-komunikacionih tehnologija i nove mogućnosti aktivnog učešća potrošača u procesima u sistemu. Kao rezultat, tradicionalni, centralizovani, „top-down“ koncept funkcionisanja EES-a, sa gotovo jednoznačnim tokovima električne energije od velikih elektrana, preko prenosnog i distributivnog sistema, do krajnjih potrošača, gubi na značaju i zamjenjuje ga novi, mnogo složeniji koncept koji podrazumijeva interakciju različitih resursa u sistemu.

Usljed svoje specifičnosti (intermitentnost, velika snaga potrošnje itd.), novi resursi u sistemu, među kojima se ističu električna vozila, mogu da dovedu do ugrožavanja propisanog nivoa kvaliteta, pouzdanosti i sigurnosti napajanja u EES-u, a naročito u distributivnom, kao direktnoj tački kontakta sa novim distribuiranim resursima. Naime, bez adekvatne koordinacije punjenja, velika penetracija električnih vozila bi mogla dovesti do značajnog povećanja vršnog opterećenja distributivnog sistema, čime bi se javio problem velikih gubitaka, smanjenja napona ispod dozvoljene vrijednosti, a posljedično bi bilo neophodno povećati kapacitet mreže kako bi ispratila porast opterećenja. Dodatno, intermitentna proizvodnja distribuiranih obnovljivih izvora, koja se ne podudara nužno sa trenutkom kada je električna energija najviše potrebna u posmatranom dijelu sistema, mogla bi dovesti do povećanja gubitaka u sistemu zbog prevelikog injektiranja električne energije iz distributivnog u prenosni sistem. Prema tome, razvoj strategije pametnog punjenja električnih vozila u cilju postizanja veće efikasnosti korišćenja mreže (uzimajući u obzir i moguću koordinaciju sa drugim distribuiranim resursima), predstavlja aktuelni izazov, čija su moguća rješenja predmet velikog broja naučnih radova.

U cilju minimizacije negativnog uticaja koji električna vozila mogu imati na mrežu, u literaturi se obrađuju dva različita pristupa koordinacije njihovog punjenja u pametnim distributivnim sistemima: centralizovani i decentralizovani pristup [3]. Centralizovani pristup [4-6, 8-10] podrazumijeva učešće novih agenata u sistemu – agregatora, koji upravljaju punjenjem većeg broja vozila u zavisnosti od cilja optimizacije punjenja. Sa druge strane, decentralizovani pristup se odnosi na veću autonomiju korisnika [7], odnosno da korisnik samostalno definiše periode punjenja vozila. Kriterijumi u odnosu na koje se vrši optimizacija najčešće predstavljaju minimizaciju troškova preuzete električne energije, minimizaciju gubitaka u mreži, minimizaciju odstupanja napona itd.

Uticaj različitog stepena penetracije električnih vozila na tipičnu sredjenaponsku distributivnu mrežu, sa aspekta kvaliteta napona i preopterećenja vodova za tri karakteristična slučaja: nekoordinisano, dvotarifno i pametno punjenje je analiziran u radu [4]. Algoritam

pametnog punjenja je baziran na maksimizaciji integracije električnih vozila, uz odgovarajuće funkcije ograničenja koje se tiču vrijednosti napona, snage punjenja i kapaciteta baterije vozila. Clement-Nyns i ostali su u radu [5] obrađivali identična tri slučaja punjenja, pri čemu je za slučaj pametnog punjenja korišćen drugačiji optimizacioni kriterijum – minimizacija gubitaka električne energije u mreži. Optimalni raspored punjenja vozila je dobijen primjenom kvadratnog i dinamičkog programiranja, nakon čega je izvršeno poređenje rezultata, performansi, kao i brzine konvergencije obje metode. Uzimajući u obzir neizvjesnost u pogledu korišćenja električnih vozila, u radu [6] je u cilju koordinisanja njihovog punjenja u pametnoj mreži korišćeno sekvencijalno nelinearno programiranje. Kako bi se postigla bolja iskorišćenost postojeće mreže, kao kriterijum optimizacije je odabrana minimizacija varijacije dijagrama opterećenja. Za razliku od prethodno navedenih radova, u radu [7] autori predlažu decentralizovani algoritam za koordinaciju punjenja električnih vozila u kojem je kao optimizacioni kriterijum odabrana maksimalna penetracija električnih vozila, uz uvažavanje dozvoljenog pada napona i zagušenja na sabirnicama. Sa druge strane, pored upravljanja vrijednostima snage punjenja, u radu [8] za koordinaciju punjenja električnih vozila je predloženo i korišćenje benefita odziva potrošnje. Naime, posmatrana su tri aspekta negativnog uticaja na mrežu: naglo povećanje vršnog opterećenja, kumulativno odstupanje napona, kao i smanjenje životnog vijeka distributivnih transformatora. U pomenutom radu, optimizacioni problem je riješen primjenom genetskog algoritma.

Centralizovano-lokalizovana hijerarhijska struktura upravljanja punjenjem električnih vozila je predstavljena u radu [9], kao i mogući model učešća električnih vozila na tržištu električne energije. Za razliku od prethodnih radova u kojima su razvijani različiti algoritmi koordinacije punjenja električnih vozila, u radu [10] je predstavljena mogućnost smanjenja uticaja punjenja ovih vozila korišćenjem integrisane *Volt-Var* optimizacije. Predloženi algoritam ima za cilj da optimizuje napon i tokove reaktivne snage u mreži, čime se povećava spremnost mreže da podrži veći stepen penetracije električnih vozila.

Pored razvoja algoritama pametnog punjenja u „*top-down*“ elektroenergetskim sistemima, u literaturi se obrađuje i razvoj algoritama koordinisanog punjenja [11] u distributivnim sistemima koji sadrže distribuirane izvore. U ovom slučaju, akcenat je na koordinaciji rada ova dva resursa u cilju maksimizacije benefita koje ona pružaju, takođe vodeći računa o pogonskim i operativnim ograničenjima rada mreže.

Imajući navedeno u vidu, u radu [12] je razvijen dvostepeni stohastički model upravljanja tokovima energije u mikromreži, koja sadrži konvencionalne termalne jedinice, vjetroturbine, solarne panele i parking sa punionicama za električna vozila. Za cilj optimizacije je odabrana minimizacija operativnih troškova rada mikromreže. U radu [13] je predložen koncept pametnog punjenja i injektiranja uskladištene energije iz baterije električnog vozila u mrežu (eng. *vehicle to grid* - V2G) u cilju dobijanja što manje varijacije opterećenja mreže koja sadrži i obnovljive izvore. Autori rada [14] su razvili model u realnom vremenu za punjenje električnih vozila u mikromreži, koji se bazira na četiri scenarija decentralizovanog punjenja električnih vozila. Analizirana mikromreža sadrži solarne panele, sistem za skladištenje električne energije i dizel agregate. Cilj predstavljene optimizacije je povećanje efikasnosti korišćenja solarnih panela i sistema za skladištenje, kako bi se smanjila upotreba dizel agregata. Za razliku od prethodnih radova koji posmatraju stacionarno stanje mreže, u radu [15] su prikazani rezultati ispitivanja uticaja električnih vozila koja učestvuju u primarnoj regulaciji frekvencije preko koncepta V2G na dinamički odziv mikromreže. Hijerarhijska struktura

upravljanja mikromrežom koja uključuje i funkciju koordinacije punjenja električnih vozila je prikazana u radu [16]. Upravljački sistem je baziran na *Multi-Agent* sistemu, koji se već pokazao kao efikasan u koordinaciji rada distribuiranih resursa, sa jasno definisanim ulogama učesnika. Performanse predloženog sistema su predstavljene i za pripremu pogona dan-unaprijed i u realnom vremenu.

Imajući u vidu da se u literaturi obrađuje koordinacija punjenja električnih vozila za dva različita koncepta distributivnog sistema, u ovom radu će biti analiziran uticaj punjenja električnih vozila na „*top-down*“ distributivni sistem (koji se napaja isključivo iz prenosnog sistema) za tri različite varijante:

- nekoordinisano,
- punjenje tokom niže tarife i
- pametno punjenje,

i na savremeni distributivni sistem (koji sadrži distribuirane izvore) za dvije varijante:

- nekoordinisano i
- koordinisano punjenje.

U **drugom poglavlju** će biti dat osvrt na karakteristike tradicionalnih, ali i modernih distributivnih sistema, uz predstavljanje aktuelnih promjena i izazova koji su posljedica promjene paradigme razvoja elektroenergetskih sistema.

Treće poglavlje će biti posvećeno električnim vozilima, odnosno opisivanju njihovih osnovnih komponenti, karakteristika i sistema koji se koriste za njihovo punjenje.

U **četvrtom poglavlju** će biti predstavljena analiza rezultata simulacije punjenja električnih vozila za tri varijante u testnom tradicionalnom („*top-down*“) distributivnom sistemu, dok će utemeljenost navedene analize biti prikazana kroz rezultate simulacije na praktičnom primjeru: simulacija punjenja električnih vozila u dijelu distributivne mreže u Podgorici – izvod Radoje Dakić 2 iz TS 110/10 kV Podgorica 4.

U **petom poglavlju** će biti dat prikaz rezultata analize dvije varijante punjenja električnih vozila u savremenom distributivnom sistemu, gdje će kroz strategiju koordinisanog punjenja biti testirana mogućnost injektiranja energije iz vozila u mrežu.

Na kraju, u **šestom poglavlju** će biti predstavljena rekapitulacija rezultata sprovedenih analiza, kao i budući pravci istraživanja u ovom polju.

2. Distributivni sistem električne energije

Od samog početka elektrifikacije, koji je u svijetu zvanično obilježen uspostavljanjem napajanja električnom energijom grada Godalming (Ujedinjeno Kraljevstvo) 1881. godine, vidljiva je jasna evolucija elektroenergetskih sistema od malih, izolovanih, distributivnih sistema do velikih, povezanih elektroenergetskih sistema današnjice. Električna energija, koja je u početnom periodu razvoja smatrana luksuzom, ubrzo je prepoznata kao tzv. *essential good*, odnosno kao osnovni preduslov za razvoj stanovništva i privrede. Porastom zavisnosti društva od električne energije, javila se potreba za obezbjeđivanjem prihvatljivog nivoa pouzdanosti, kvaliteta i sigurnosti snabdijevanja električnom energijom na ekonomski najefikasniji način, što predstavlja osnovni zadatak savremenog EES-a.

Elektroenergetske sisteme današnjice karakteriše ogromna kompleksnost u pogledu strukture, topologije mreže, tehnologija proizvodnje, međusobnih uloga pojedinačnih elemenata i podsistema itd. Po definiciji, ovaj složeni sistem čine sljedeći podsistemi: sistem proizvodnje, sistem prenosa, sistem distribucije i sistem potrošnje električne energije [17].

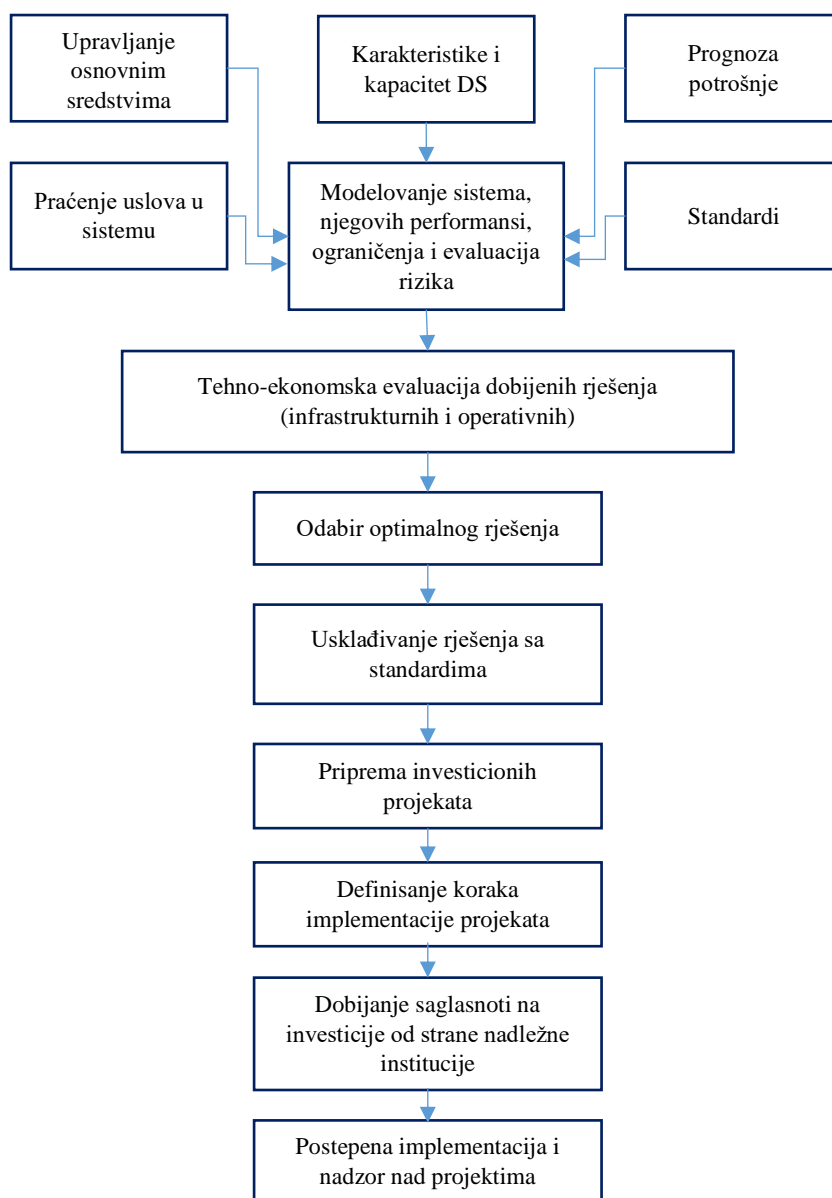
Distributivni sistem električne energije predstavlja važan dio EES-a koji vrši raspodjelu i isporuku električne energije od tačaka predaje iz prenosnog sistema i distribuiranih izvora električne energije do krajnjih potrošača. Za razliku od prenosnog sistema koji sadrži manji broj značajnih komponenti, distributivni sistem se sastoji od velikog broja elemenata, što upravljanje i nadzor nad ovakvim sistemom čini jako složenim. Distributivna infrastruktura pokriva ogromne površine, kako bi električna energija bila isporučena potrošačima u gusto naseljenim gradovima, predgrađima i u udaljenim ruralnim područjima. Prenosni i distributivni sistem se razlikuju i u topologiji, naponskim nivoima koje obuhvataju, veličini, načinu funkcionisanja itd.

U različitim okvirima i fazama razvoja elektroenergetskog sistema, osnovna uloga distributivnog sistema da isporučuje energiju krajnjim potrošačima je ostala, uopšteno govoreći, gotovo nepromijenjena. Međutim, brojne transformacije koje su nastupile krajem prethodnog vijeka su dovele do povećanja kompleksnosti distributivnog sistema, čime je on postao mnogo više od „obične mreže“. Savremeni distributivni sistemi su se u velikoj mjeri udaljili od tradicionalnog pasivnog koncepta, usljed povećane integracije distribuiranih izvora (eng. *distributed generation* – DG). Dodatno, napretkom tehnologije, krajnji potrošači dobijaju priliku za aktivnim učešćem u upravljanju potrošnjom, proizvodnji i skladištenju električne energije (baterije ili električna vozila), čime su tokovi električne energije u distributivnom sistemu postali manje predvidljivi. Sve navedene promjene zahtijevaju brzu reakciju operatora distributivnog sistema, kako bi sistem bio u mogućnosti da podrži nove resurse bez narušavanja tehničkih ograničenja.

U narednim potpoglavljima će biti više riječi o strukturi, topologijama i karakteristikama distributivnog sistema, kao i novim distribuiranim resursima, koji dovode do promjene tradicionalnog koncepta distributivnog sistema.

2.1. Planiranje razvoja distributivnog sistema

Planiranje razvoja distributivnog sistema ima za cilj da zadovolji porast potreba postojećih i budućih korisnika sistema za distribucijom električne energije na najekonomičniji i najoptimalniji način, čime se stavlja veliki zadatak pred operatora distributivnog sistema [18]. Prilikom planiranja razvoja, operator mora da uzme u obzir veliki broj faktora, promjenljivih i alternativnih rješenja kompleksnih problema, kako bi odabrao najoptimalniju kombinaciju elemenata distributivne mreže (transformatora i vodova), uz postizanje kompromisa između minimizacije troškova koji se odnose na nova ulaganja u sistem i zadovoljenja tehničkih i drugih ograničenja u mreži. Faze razvoja distributivnog sistema su prikazane na slici 2.1.1 [19].



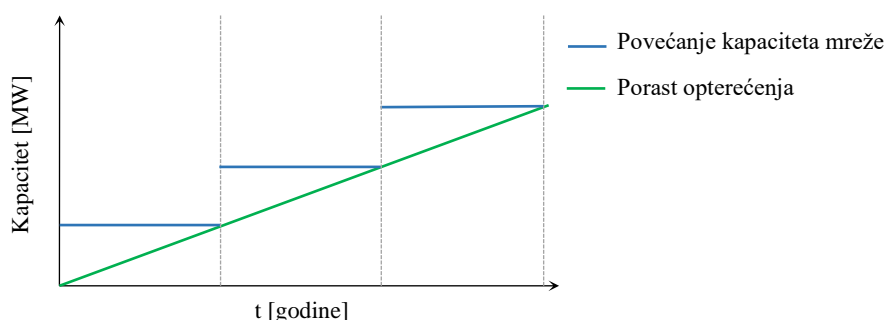
Slika 2.1.1 Faze razvoja distributivnog sistema

Ciljevi planiranja distributivnog sistema se mogu grupisati na sljedeći način:

- usklađivanje kapaciteta mreže sa porastom potrošnje električne energije,
- obezbjeđenje efikasnog i pouzdanog snabdijevanja električnom energijom,

- maksimizacija performansi komponenti mreže, i
- minimizacija troškova koje snose korisnici distributivnog sistema kroz:
 - odabir najefikasnijeg rješenja, i
 - minimizaciju troškova tokom cjelokupnog životnog vijeka opreme [20].

Povećanje opterećenja potrošača se može posmatrati kao kontinualna funkcija (odnosno funkcija sa jako malom periodom odabiranja), dok je povećanje kapaciteta distributivne mreže diskretan proces sa mnogo većom periodom odabiranja (reda nekoliko godina, odnosno desetina godina), kao što je prikazano na slici 2.1.2. Iz navedenog slijedi da postojeći kapacitet distributivne mreže služi da podmiri ne samo trenutne potrebe postojećih potrošača, već i povećanje potreba do određene mjere. Međutim, u trenucima kada vršno opterećenje konzuma dostigne vrijednost kapaciteta distributivnog sistema, potrebno je povećati kapacitet mreže, što predstavlja veliko kapitalno ulaganje, zbog čega je poželjno da se potrebe za čestim ulaganjem u povećanje kapaciteta smanje.



Slika 2.1.2 Promjena kapaciteta distributivne mreže u odnosu na porast distributivnog konzuma

Potreba za povećanjem kapaciteta distributivnog sistema naročito dolazi do izražaja u novim okolnostima, kada je, i pored ciljeva za povećanjem energetske efikasnosti, očekivano da će potrebe za električnom energijom značajno porasti, kako usljed elektrifikacije transporta i grijanja, tako i usljed rasta broja stanovnika. U slučaju velikog stepena elektrifikacije, izvjesno je da će biti neophodno značajno povećanje kapaciteta distributivne mreže, čime se iziskuju dodatni troškovi.

Generalno govoreći, imajući u vidu princip ekonomičnosti, operatori sistema se trude da posmatraju dugorične potrebe sistema prilikom dimenzionisanja elemenata sistema, kako bi izbjegli potrebu za čestim povećavanjem kapaciteta mreže.

2.2. Struktura i topologije distributivnog sistema električne energije

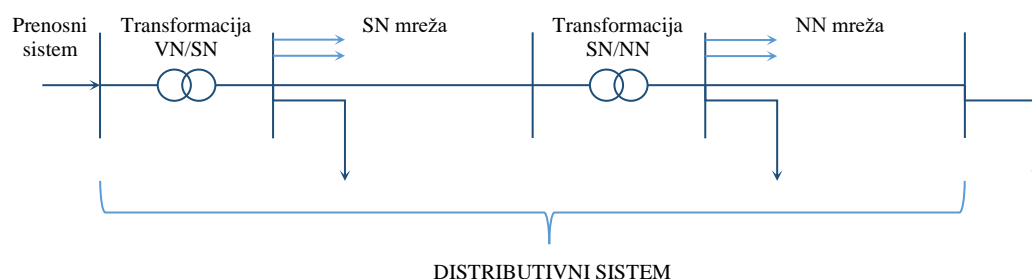
S obzirom na veliku rasprostranjenost, dužinu, broj elemenata i naponske nivoe koje obuhvata distributivni sistem, distributivni sistem može biti predstavljen kao veza sljedećih funkcionalnih cjelina (slika 2.2.1):

- **Trafostanica VN/SN¹**, koje predstavljaju tačke napajanja distributivnih konzumnih područja iz prenosnog sistema;

¹ U zavisnosti od toga da li ove trafostanice posjeduje operator prenosnog ili distributivnog sistema, one mogu predstavljati dio jednog ili drugog sistema.

- **Srednjenaponske mreže**, koja se sastoji od glavnih izvoda i grana. U Evropi, ove mreže obično distribuiraju električnu energiju na naponskim nivoima između 10 i 30 kV, dok se u Sjedinjenim Američkim Državama (SAD) distribucija vrši na naponima od 4 do 13 kV. Ova mreža napaja distributivne transformatore i krajnje potrošače (industrijske i komercijalne), koji zahtijevaju veću snagu (nekoliko desetina ili stotina kW). U literaturi, ova mreža se naziva i primarnom distributivnom mrežom;
- **Trafostanica SN/NN**, koje se povezuju na srednjenaponsku mrežu i služe za napajanje grupe potrošača u manjim područjima, kao što su naselja i kvartovi; i
- **Niskonaponske mreže**, koja se prostire od distributivnih trafostanica do krajnjih potrošača. U Evropi, nominalni napon ove mreže je 400 V između faza, odnosno 230 V između faze i nule, dok je nominalni napon u SAD-u 420 i 240 V, koji omogućava 120 - 110 V na mjestu monofaznog priključenja potrošača. U literaturi, ova mreža se još naziva i sekundarnom mrežom [21].

Dakle, u distributivnom sistemu se, u odnosu na naponski nivo, mogu razlikovati primarna i sekundarna distributivna mreža, gdje primarna mreža obuhvata dio distributivnog sistema do SN/NN trafostanica, dok sekundarna mreža predstavlja posljednji stepen distributivne mreže, na koji se povezuje veliki broj krajnjih korisnika.



Slika 2.2.1 Pojednostavljena šema distributivnog sistema električne energije

2.2.1. Primarna mreža

Dio distributivnog sistema koji se nalazi između trafostanica na granici prenos-distribucija (VN/SN trafostanica) i distributivnih (SN/NN) trafostanica se naziva primarnom mrežom. Primarna mreža obuhvata primarne izvode i grane, koji obično pored tri faze imaju izveden i neutralni provodnik, usljed izražene nesimetrije u distributivnom sistemu. Primarni izvodi u najvećem broju slučajeva imaju veliki broj grana koje služe za napajanje većih industrijskih ili komercijalnih potrošača i distributivnih trafostanica koje se nalaze u različitim djelovima distributivnog sistema.

Imajući u vidu da primarna mreža treba da podnese veća opterećenja usljed napajanja svojih potrošača i potrošača sekundarne mreže, odnosno trafostanica SN/NN, prilikom njenog dimenzionisanja se moraju uzeti u obzir sljedeći faktori:

- priroda potrošača priključenih na mrežu,
- gustina potrošnje u oblasti koja se napaja posmatranom mrežom,
- stepen porasta potrošnje,
- potreba za obezbjeđivanjem slobodnog kapaciteta za havarijske operacije,
- dizajn i nazivne snage priključenih trafostanica i

- zahtijevani nivo kvaliteta usluge na datom području (uključujući i neprekidnost napajanja).

Primarna mreža može biti izvedena kao nadzemna ili kablovska. Prednost kablovskih vodova se ogleda u:

- manjem negativnom uticaju na okolinu u pogledu vizuelne degradacije određenog područja,
- manjem prostoru koji zauzima trasa kabla u odnosu na trasu nadzemnih vodova,
- manjoj vjerovatnoći kvara kablovskih vodova u odnosu na nadzemene koji su izloženi različitim spoljašnjim uslovima.

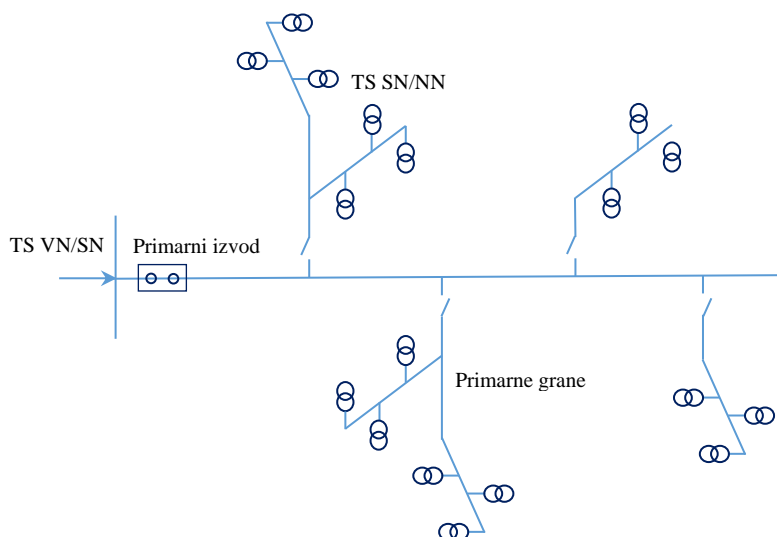
Međutim, jedan od nedostataka kablovskih vodova je velika cijena u odnosu na nadzemne vodove, kao i duže vrijeme potrebno za lociranje i sanaciju kvara. U gradskim područjima sa gusto raspoređenom potrošnjom, najčešće se koriste kablovski vodovi. Sa druge strane, u ruralnim i prigradskim područjima je mnogo zastupljenija primjena nadzemnih vodova.

Najčešće korišćene topologije primarne mreže su:

- radijalna konfiguracija,
- prstenasta konfiguracija i
- konfiguracija sa dvostranim napajanjem.

2.2.1.1. Radijalna konfiguracija

Najjednostavnija, najjeftinija, pa samim tim i najzastupljenija konfiguracija primarne mreže je radijalna topologija (slika 2.2.2). Radijalnu konfiguraciju prati veliki broj grana, koje služe da napajaju pojedina potrošačka potpodručja. Iz navedenog je jasno da je struja najveća na samom izlazu iz trafostanice, odnosno na početku radijalnog izvoda, dok se grananjem smanjuje njena vrijednost.



Slika 2.2.2 Radijalna topologija primarne mreže

Prednosti radijalne topologije su sljedeće:

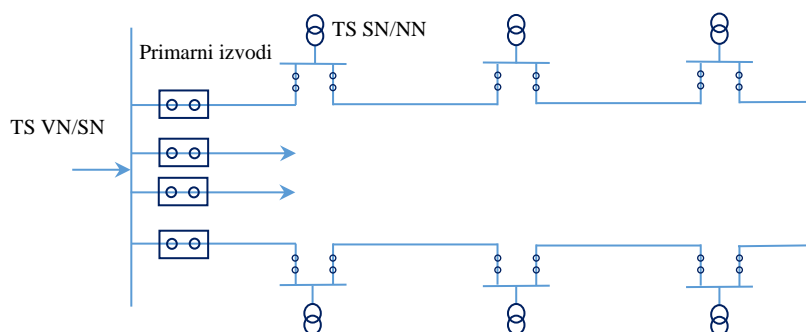
- jednostavniji sistem zaštite,
- manje struje kvara u većem dijelu mreže,

- lakša regulacija napona,
- manji troškovi i
- jednostavnije predviđanje tokova snaga.

Međutim, najveći nedostatak ove konfiguracije je mala pouzdanost. Kvar na jednom dijelu radijalnog izvoda bi doveo do prekida isporuke električne energije svim potrošačima koji se napajaju iz predmetnog izvoda, odnosno dijela izvoda od mjesta kvara, u slučaju da je kvar moguće izolovati primjenom prekidačkih elemenata. Pored navedenog, u radijalnoj konfiguraciji se pri vršnom opterećenju mogu javiti veliki gubici u izvodu i padovi napona, koji bi mogli rezultirati odstupanjem napona u krajnim tačkama radijalne mreže od dozvoljenog opsega vrijednosti.

2.2.1.2. Prstenasta konfiguracija

Mnogo veća pouzdanost napajanja električnom energijom se postiže primjenom prstenaste konfiguracije. Na slici 2.2.3 je predstavljena prstenasta konfiguracija mreže, gdje je SN/NN trafostanicama priključenim na ovaj izvod omogućeno dvostrano napajanje iz iste trafostanice. U normalnom pogonu, ova konfiguracija radi sa otvorenim prekidačem između izvoda, dok do zatvaranja prekidača dolazi prilikom kvara. Obično je pojedinačni izvod dimenzionisan tako da može da izdrži normalno opterećenje oba izvoda, kako bi se obezbijedilo napajanje u slučaju kvara.



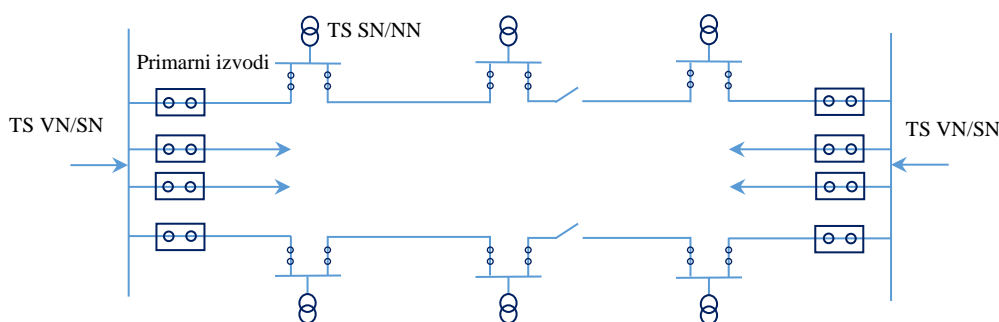
Slika 2.2.3 Prstenasta topologija

U slučaju kvara na prstenastom izvodu, prvo se otvara glavni prekidač izvoda, odnosno u početnom trenutku kompletan izvod ostaje bez napajanja. Nakon lociranja kvara i izolovanja dijela izvoda u kvaru, ponovo se uključuje glavni prekidač i prekidač između izvoda, tako da sve trafostanice dobijaju napajanje preko jednog ili drugog dijela izvoda.

Prstenasta konfiguracija je povoljna za napajanje potrošača kod kojih je neprekidnost napajanja izuzetno važna. Uopšteno govoreći, preporučljivo je korišćenje odvojenih prekidača izvoda, kako bi samo dio SN/NN trafostanica ostao bez napajanja tokom perioda lociranja kvara. Takođe, moguće je izvesti da dva kraja izvoda budu priključena na različite sekcije sabirnica, odnosno na dva različita transformatora (u slučaju otvorenog sekcionog prekidača na sabirnicama). Međutim, ovu konfiguraciju karakteriše veća cijena u odnosu na radijalnu konfiguraciju i kompleksniji sistem upravljanja [22].

2.2.1.3. Konfiguracija sa dvostranim napajanjem

Konfiguracija sa dvostranim napajanjem je prikazana na slici 2.2.4. U ovom slučaju, primarni izvodi se napajaju iz dvije različite VN/SN trafostanice, čime se, u odnosu na radijalnu i prstenastu konfiguraciju, postiže veća sigurnost napajanja u slučaju kvara na jednoj VN/SN trafostanici. U slučaju kvara na jednom dijelu SN izvoda, nakon lociranja i izolovanja dijela izvoda u kvaru, može se vršiti normalno napajanje TS SN/NN preko trafostanice na koju su direktno povezani.



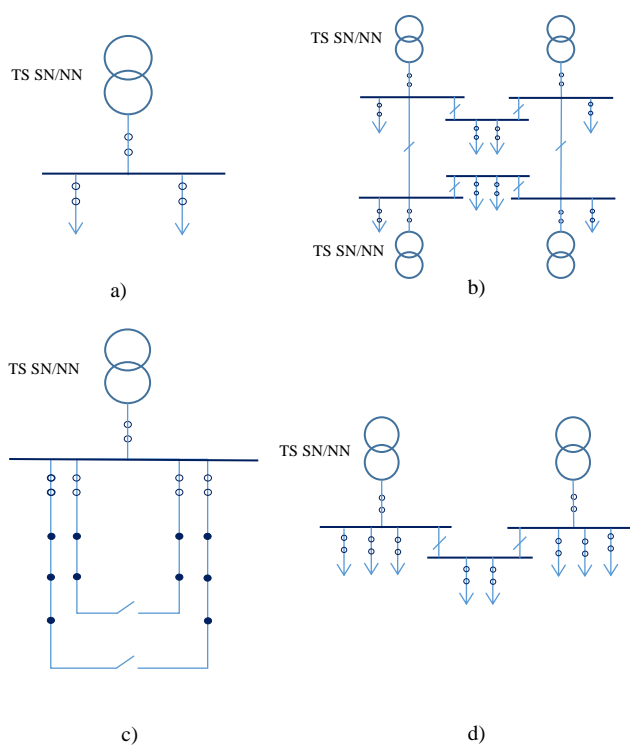
Slika 2.2.4 Konfiguracija sa dvostranim napajanjem

Prednost ove konfiguracije se ogleda i u manjim gubicima električne energije, usljed raspodjele opterećenja između trafostanica. Sa druge strane, ovu konfiguraciju karakteriše mnogo veća kompleksnost u pogledu tokova snaga i upravljanja mrežom.

2.2.2. Sekundarna mreža

Kao što je već rečeno u Potpoglavlju 2.2, sekundarna mreža predstavlja dio distributivnog sistema od TS SN/NN do niskonaponskih instalacija korisnika. Sekundarna mreža se izvodi kao trofazna, najčešće sa četiri provodnika, usljed izražene nesimetrije. Slično kao kod primarne mreže, najčešća konfiguracija sekundarne mreže je radijalna (slika 2.2.5 (a)), osim za neke važnije potrošače (bolnice i poslovni objekti), gdje se pouzdanost i neprekidnost napajanja stavljaju ispred principa ekonomičnosti. Radijalnu topologiju karakteriše mnogo jednostavniji sistem zaštite. Međutim, najveći nedostatak ove topologije je mala sigurnost snabdijevanja, jer usljed kvara na jednom dijelu radijalnog voda dolazi do prekida u napajanju svih potrošača koji su priključeni na posmatrani vod.

U cilju postizanja veće sigurnosti napajanja može se koristiti petljasta, prstenasta ili paralelno-povezana topologija, kako je i prikazano na slici 2.2.5 (b), (c) i (d). Petljastom topologijom se obezbjeđuje normalno napajanje u slučaju ispada neke od TS SN/NN preko ostalih TS na koje je posmatrani potrošač povezan. Sa druge strane, prstenasta konfiguracija predstavlja unaprijeđenu verziju radijalne topologije, kod koje se veća sigurnost snabdijevanja postiže povezivanjem dva radijalna voda koji se napajaju iz iste trafostanice SN/NN. Na ovaj način je omogućeno da se u slučaju kvara na niskonaponskom vodu, napajanje dijela potrošača prebaci na drugi izvod. Na kraju kod paralelno-povezane konfiguracije (slika 2.2.5 (d)) dvije susjedne trafostanice su međusobno povezane, čime se u slučaju ispada jedne TS SN/NN postiže veća sigurnost snabdijevanja niskonaponskih potrošača.



Slika 2.2.5 Topologije niskonaponske mreže

Specifičnost sekundarne mreže se ogleda u:

- velikom broju čvorova koji predstavljaju tačke priključenja potrošača,
- malom stepenu nadzora nad mrežom,
- velikom odnosu R/X u odnosu na srednjenaponsku i visokonaponsku mrežu,
- maloj jednovremenosti opterećenja potrošača,
- izraženoj nesimetriji itd. [23]

Kako sekundarna mreža predstavlja direktnu vezu između niskonaponskih korisnika i ostatka sistema, veoma je važno da se dimenzioniše tako da budu zadovoljeni kriterijumi kvaliteta električne energije, uključujući i vrijednost flikera i gubitaka u mreži. U cilju smanjenja dužine sekundarnih kola i, posljedično, gubitaka i padova napona, distributivne trafostanice se postavljaju što bliže konzumnim područjima.

2.3. Tokovi snaga u distributivnom sistemu

Iako distributivnu mrežu karakteriše veliki broj elemenata i velike dužine vodova, analize tokova snaga za distributivni sistem su neophodne kako bi se odredila njegova sposobnost da bez narušavanja definisanih ograničenja izdrži različite nivoe opterećenja. Ove analize se sprovode i za slučajeve ispada jednog ili više elemenata (obično samo za SN mrežu), kako bi se izvršila provjera da li srednjenaponska mreža zadovoljava zahtjeve i ograničenja u slučaju kvara nekog od elemenata (analiza sigurnosti).

U pogledu topologije, u odnosu na prenosni sistem kojeg karakterišu petljaste konfiguracije, tokovi snaga kod radijalnih distributivnih konfiguracija su jednostavniji. Međutim, višestruko veći broj čvorova, kao i nedovoljno podataka o elementima distributivne

mreže, čine analizu tokova snaga mnogo složenijom, zbog čega se ove analize obično ograničavaju na srednjenaponsku mrežu.

Zbog specifičnosti distributivnog sistema u odnosu na prenosni, bilo je potrebno razviti brze, robustne i efikasne metode analize tokova snaga. Većina razvijenih metoda za analizu tokova snaga u distributivnom sistemu se bazira na *Forward-Backward Sweep* (FBS) metodi, implicitnoj Z_B *Gauss-Seidel*-ovoj metodi, modifikacijama *Newton-Raphson*-ove metode i brzim raspregnutim metodama proračuna tokova snaga. Metode zasnovane na FBS konceptu karakteriše velika jednostavnost, brzina konvergencije i robustnost. Generalno govoreći, FBS koncept se sastoji od dva koraka: pomjeranja unaprijed i pomjeranja unazad. Pomjeranje unaprijed predstavlja proračun padova napona od početnog do krajnjeg čvora odgovarajućih grana u mreži, dok pomjeranje unazad obuhvata proračun struje ili snage na osnovu dobijenih vrijednosti napona u čvorovima od krajnjeg do početnog čvora. Veliki broj metoda koje se zasnivaju na ovom konceptu je razvijen u cilju uvažavanja specifičnosti distributivnog sistema, uključujući nesimetriju (*Kersting and Mendive* [24] – Pristup ljestvičaste mreže), priključenje distribuiranih izvora (*Cheng i Shirmohammadi* [25]), složenije topologije distributivne mreže (*Haque* [26] – Unaprijeđeni metod kompenzacije) itd.

Zbog prednosti Y_B *Gauss-Seidel*-ove metode u pogledu jednostavnosti numeričkog algoritma, razvijene su modifikacije ove metode za potrebe proračuna tokova snaga u distributivnom sistemu. Y_B *Gauss-Seidel*-ova metoda podrazumijeva proračun napona u odgovarajućem čvoru mreže, preko vrijednosti napona u svim čvorovima sa kojima je predmetni čvor povezan i na osnovu vrijednosti snaga u čvoru i matrice admitansi nezavisnih čvorova. Međutim, zbog problema sa konvergencijom Y_B *Gauss-Seidel*-ove metode u radijalnim distributivnim mrežama, koristi se implicitna Z_B *Gauss-Seidel*-ova metoda. Z_B *Gauss-Seidel*-ova metoda zahtijeva inverziju matrice admitansi čvorova Y_B , što negativno utiče na brzinu proračuna, naročito u mrežama sa velikim brojem čvorova. S tim u vezi, razvijene su različite modifikacije ove metode, kojima se prevazilazi problem inverzije kompletne Y_B matrice (npr. primjenom tri Y submatrice – *Teng* [27]).

Slično kao *Gauss-Seidel*-ova metoda, *Newton-Raphson*-ova metoda je našla ogromnu primjenu kod proračuna tokova snaga u prenosnom sistemu. Primjenom *Newton-Raphson*-ove metode se promjene u snagama izražavaju preko promjena u naponima, pomnoženih sa matricom Jakobijana. Međutim, imajući u vidu mnogo veći broj čvorova u distributivnom sistemu, potrebno je puno vremena kako bi se proračunala matrica Jakobijana za datu mrežu i izvršila njena inverzija u svakoj iteraciji. S tim u vezi, predložena su različita pojednostavljena matrice Jakobijana, kao što je rješenje *Zhang i Cheng*-a [28], gdje se matrica Jakobijana za radijalnu distributivnu mrežu proračunava kao proizvod matrica UDU^T , gdje je U konstantna gornja trougaona matrica koja zavisi od topologije sistema, dok je D dijagonalna matrica, čiji se elementi mijenjaju u svakoj iteraciji. Pored navedenog, imajući u vidu probleme sa konvergencijom Brzog raspregnutog metoda zbog prevelikog R/X odnosa u distributivnom sistemu, izvršene su njegove modifikacije kako bi se bolje prilagodio uslovima u distributivnom sistemu. *Zimmerman i Chiang* [29] su predložili modifikaciju Brzog raspregnutog metoda u kojem se umjesto za čvorove, jednačine definišu za grane mreže, čime se značajno smanjuje red jednačina [30].

Za potrebe proračuna tokova snaga i primjenu bilo koje od prethodno navedenih metoda potrebno je obezbijediti podatke o snagama injektiranja, odnosno preuzimanja u čvorovima posmatrane mreže. Minimum podataka za sprovođenje analize tokova snaga se prikuplja

korišćenjem obračunskih i kontrolnih brojila koja bilježe snagu na pojedinim djelovima mreže. Pored toga, sve većim stepenom ugradnje naprednog sistema mjerenja, obezbjeđuju se i podaci o snazi potrošnje pojedinačnih NN potrošača. Međutim, za potrebe analize opterećenja elemenata distributivne mreže, na podatke o vršnoj snazi potrošnje pojedinačnih SN i NN potrošača je potrebno primijeniti odgovarajući korekcionni faktor, zbog činjenice da se vršna opterećenja pojedinačnih potrošača međusobno nužno ne podudaraju. Naime, vršno opterećenje na nivou odgovarajućeg elementa distributivnog sistema nije prosti zbir vršnih opterećenja svih potrošača priključenih na taj element (zbog razlika u pojedinačnim navikama potrošnje, odnosno dijagramima opterećenja), već se suma pojedinačnih vršnih opterećenja mora pomnožiti sa faktorom jednovremenosti. Iz navedenog slijedi da se faktor jednovremenosti može izaziti kao [31]:

$$f_j = \frac{P_v}{\sum_{i=1}^n P_{vi}}, \quad (2.1)$$

gdje je P_v jednovremeno vršno opterećenje na nivou odgovarajućeg elementa sistema, P_{vi} vršno opterećenje pojedinačnog potrošača $i=1, 2, \dots, n$, a n ukupan broj potrošača priključenih na posmatrani element sistema.

2.4. Gubici električne energije

Generalno govoreći, gubici električne energije predstavljaju razliku energije koja uđe i energije koja izađe iz sistema i mogu se podijeliti na tehničke i komercijalne gubitke. Komercijalni gubici obuhvataju različite slučajeve neizmjerene (neobračunate) potrošnje, bilo kroz neovlašćeno preuzimanje električne energije, greške u mjerenju itd. i generalno govoreći nisu posljedica načina funkcionisanja sistema [32].

Tehnički gubici nastaju zbog specifičnih karakteristika određenih elemenata mreže i mogu se podijeliti na fiksne i varijabilne gubitke. Fiksni gubici predstavljaju gubitke koji nastaju usljed magnetizacije jezgra transformatora ili reaktora, i kako oni zavise od napona mreže (čije su varijacije male), mogu se posmatrati kao konstantni tokom eksploatacije. Sa druge strane, varijabilni gubici su posljedica protoka struje kroz provodnike i njihova vrijednost varira sa promjenom vrijednosti struje. Provodnici nisu savršeni, odnosno imaju određenu otpornost zbog čega se, usljed prolaska struje kroz provodnike, određeni dio energije pretvara u toplotu koju provodnik odaje u okolni prostor. Aktivna snaga gubitaka se može izračunati primjenom sljedeće formule:

$$P_{gij} = 3R_{ij}I_{ij}^2, \quad (2.2)$$

gdje je R_{ij} aktivna otpornost posmatrane grane ij , a I_{ij} struja koja protiče kroz granu ij . Kako se struja može izraziti preko odnosa prividne snage i napona:

$$\underline{I}_{ij} = \frac{P_{ij} + jQ_{ij}}{\sqrt{3}U_i}, \quad (2.3)$$

gdje je P_{ij} aktivna snaga kroz granu ij kod čvora i , Q_{ij} reaktivna snaga kroz granu ij kod čvora i , a U_i napon na čvoru i , uvrštavanjem formule (2.3) u (2.2), aktivna snaga gubitaka se može izraziti preko formule:

$$P_{gij} = R_{ij} \frac{P_{ij}^2 + Q_{ij}^2}{U_i^2}. \quad (2.4)$$

Analogno, formula za reaktivnu snagu gubitaka se može izraziti kao:

$$Q_{gij} = X_{ij} \frac{P_{ij}^2 + Q_{ij}^2}{U_i^2}, \quad (2.5)$$

gdje je X_{ij} reaktansa grane ij .

Dakle, porast struje (snage) koja protiče kroz provodnik, uz nepromijenjenu impedansu mreže i vrijednost napona u čvorovima, dovodi do porasta gubitaka u mreži. Važno je naglasiti da za razliku od prenosnog sistema u kojem su vrijednosti napona velike, pa se za istu snagu prenosa gubici značajno smanjuju, u distributivnom sistemu gubici imaju povećanu vrijednost zbog potrebe da se energija distribuira korisnicima na nižim naponima. Primjera radi, gubici na nivou prenosnog sistema Crne Gore su u 2020. godini iznosili 163,59 GWh, što predstavlja 1,82 % ukupne energije koja je ušla u prenosni sistem, dok su gubici na nivou distributivnog sistema iznosili 328,85 GWh², što predstavlja 12,9 % ukupne energije koja je injektirana u distributivni sistem.

Iako su gubici električne energije neizbježna pojava, njihova povećana vrijednost je indikator smanjenje ekonomske efikasnosti korišćenja sistema. Naime, visoka vrijednost gubitaka posljedično dovodi do povećanih troškova za nabavku električne energije za njihovo pokrivanje. Kako navedene troškove snose korisnici sistema, može se zaključiti da je korisnicima u interesu da gubici u mreži budu što manji.

2.5. Zahtjevi za kvalitetom snabdijevanja električnom energijom

Kvalitet snabdijevanja električnom energijom je od vitalnog značaja za korisnike elektroenergetskog sistema, budući da nezadovoljenje jednog ili više aspekata kvaliteta utiče kako na privatne tako i na poslovne segmente njihovog života. Kvalitet snabdijevanja obuhvata tri različita aspekta kvaliteta, i to:

- neprekidnost napajanja, koja se najčešće kvantifikuje u vidu broja i dužine trajanja prekida u napajanju,
- kvalitet električne energije, koji se odnosi na vrijednosti dva osnovna parametra elektroenergetskog sistema – napon i frekvenciju, i
- komercijalni kvalitet, koji obuhvata aspekte i indikatore koji se odnose na kvalitet pružanja usluge korisnicima sistema od strane energetske subjekata (operatora prenosnog, distributivnog sistema ili snabdjevača).

Neprekidnost napajanja predstavlja jedan od osnovnih zahtjeva koji se stavljaju pred operatora distributivnog sistema. Jasno je da je ovaj aspekt kvaliteta direktno povezan sa nivoom ulaganja u mrežu, adekvatnim održavanjem distributivnog sistema, topologijom mreže, vrstom korišćenih vodova i načinom upravljanja mrežom. Za kvantifikaciju neprekidnosti napajanja se koriste sljedeći indikatori:

² Ova vrijednost obuhvata i komercijalne gubitke, koji su jako izraženi u distributivnom sistemu.

- SAIDI (eng. *System Average Interruption Duration Index*), koji opisuje prosječno trajanje prekida po pojedinačnom korisniku distributivnog sistema na godišnjem nivou,
- SAIFI (eng. *System Average Interruption Frequency Index*), koji opisuje prosječnu učestalost prekida u napajanju po pojedinačnom korisniku na godišnjem nivou,
- CAIDI (eng. *Customer Average Interruption Duration Index*), koji opisuje prosječno trajanje prekida u napajanju po prekidu i po kupcu,
- NIEPI (eng. *Installed Capacity Equivalent Number of Interruptions*), koji predstavlja prosječnu učestalost prekida u sistemu ponderisanu instalisanom snagom, i
- TIEPI (eng. *Installed Capacity Equivalent Interruption Time*), koji predstavlja ukupno prosječno trajanje prekida ponderisano instalisanom snagom u sistemu.

Od navedenih indikatora, najčešće se koriste SAIDI i SAIFI, koji su definisani preko sljedećih formula.

$$SAIDI = \frac{\sum_{i=1}^n N_i D_i}{N_{uk}} \quad (2.6)$$

$$SAIFI = \frac{\sum_{i=1}^n N_i}{N_{uk}}, \quad (2.7)$$

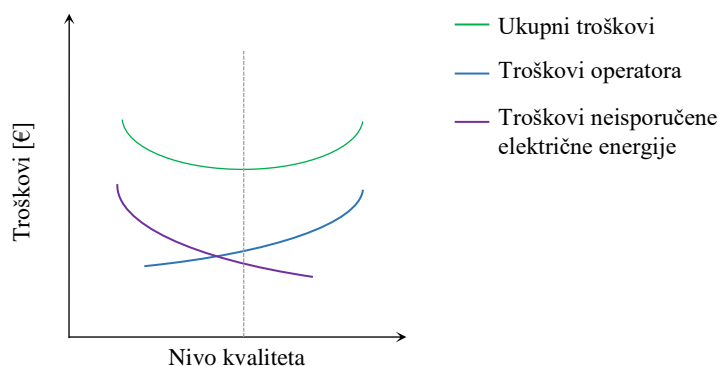
gdje je n ukupan broj prekida u napajanju, N_i broj pogođenih korisnika po i -om prekidu, D_i dužina trajanja i -og prekida, a N_{uk} ukupan broj potrošača.

Kontinuitet napajanja električnom energijom, kvantifikovan pomoću SAIDI i SAIFI indikatora, direktno utiče na korisnike distributivnog sistema. Prekidi u napajanju iziskuju određene gubitke i troškove za same potrošače (direktne i indirektne), budući da se mnogi svakodnevni, proizvodni i poslovni procesi oslanjaju na korišćenje električne energije. Ovi troškovi koji nastaju usljed prekida u napajanju električnom energijom se najčešće nazivaju troškovima neisporučene električne energije (eng. *cost of energy not supplied*).

Na slici 2.5.1 je prikazana funkcija troškova za unapređenje nivoa kvaliteta operatora distributivnog sistema i funkcija troškova neisporučene električne energije. Sa jedne strane, jasno je da sa povećanjem nivoa kvaliteta rastu i troškovi za operatora distributivnog sistema, a sa druge strane se smanjuju troškovi neisporučene električne energije za korisnike distributivnog sistema. Imajući u vidu da je potrebno odrediti optimalni nivo kvaliteta, kod kojeg su obje vrste troškova minimalne, potrebno je posmatrati funkciju koja prikazuje ukupni trošak kvaliteta. Drugim riječima, cilj je minimizovati sumu troškova održavanja i ulaganja u distributivni sistem kako bi se postigao odgovarajući nivo kvaliteta, i istovremeno minimizovati troškove korisnika koji nastaju usljed prekida:

$$\frac{dUT}{dk} = 0 \text{ za } \frac{dT_{ODS}}{dk} = -\frac{dT_{ENS}}{dk}, \quad (2.8)$$

gdje su UT ukupni troškovi u sistemu, T_{ODS} troškovi operatora distributivnog sistema, T_{ENS} troškovi neisporučene električne energije, a k nivo kvaliteta.



Slika 2.5.1 Promjena ukupnih troškova sistema u odnosu na kvalitet snabdijevanja

Odabirom odgovarajuće metode regulacije moguće je poslati ekonomski signal operatoru distributivnog sistema da poveća nivo kvaliteta do optimalnog nivoa. Navedeno se postiže primjenom regulacije na osnovu performansi [33].

Kada je u pitanju tehnički aspekt kvaliteta, standard EN 50160 [34] definiše dozvoljene granice dostupanja napona i frekvencije od njihove nominalne vrijednosti. U skladu sa navedenim standardom, definisano je da osnovni harmonik frekvencije u interkonekciji mora biti u granicama $50 \text{ Hz} \pm 1\%$ tokom 99,5 % godine, odnosno $50 \text{ Hz} + 4\% / - 6\%$ tokom čitave godine. Sa druge strane, standardom je definisano da se napon u normalnom radnom režimu mora održavati u opsegu $\pm 10\%$ od nominalne vrijednosti, a za izolovane mreže i udaljene potrošače je opseg proširen na opseg $+ 10\% / - 15\%$ od nominalne vrijednosti.

Generalno govoreći, održavanje frekvencije u definisanim granicama je obaveza operatora prenosnog sistema, koji, u koordinaciji sa ostalim operatorima prenosnih sistema u interkonekciji, sprovodi različite operativne aktivnosti kako bi sistem ostao izbalansiran i kako bi frekvencija bila održavana u definisanom opsegu. Za razliku od frekvencije koja je globalni parametar, promjene napona moraju biti posmatrane lokalno u čvorovima mreže. Prema tome, jako važnu ulogu u održavanju napona u tačkama priključenja distributivnih potrošača ima operator distributivnog sistema.

Odstupanje napona u sistemu može da predstavlja ozbiljan problem, prije svega zbog činjenice da veliko odstupanje napona može dovesti do naponske nestabilnosti, odnosno kaskadnih ispada u sistemu i kolapsa sistema. Sa druge strane, imajući u vidu da je oprema dimenzionisana da radi optimalno pri naznačenom naponu, odstupanje napona izvan dozvoljenog opsega može dovesti do pretjeranog zagrijavanja opreme, smanjenja njenog životnog vijeka i, u konačnom, kvarova na opremi. Stoga, jako je važno održavati efektivnu vrijednost napona unutar dozvoljenih granica odstupanja.

U odnosu na prenosni sistem u kojem se mogu javiti i previsoke vrijednosti napona usljed podopterećenja mreže, distributivni sistem (zbog radijalne topologije), obično karakterišu manje vrijednosti napona u odnosu na nominalni. Ovaj aspekt je naročito izražen kod potrošača koji se nalaze na kraju radijalnog voda velike dužine. Zbog toga se u navednim situacijama često vrši „skraćivanje“ niskonaponskog radijalnog voda izgradnjom novih TS SN/NN u blizini navedenog potrošača.

2.6. Savremeni distributivni sistemi

Kao što je već istaknuto u uvodnom poglavlju, funkcionisanje savremenih distributivnih sistema se suočava sa brojnim izazovima, uključujući:

- zahtjeve za zadovoljenjem potreba potrošača pri različitim nivoima opterećenja i režimima rada distributivnog sistema;
- geografska ograničenja i ograničenja sredine (povećana složenost izgradnje novih vodova i elemenata distributivne mreže);
- stalni porast potrošnje, izazvan različitim strategijama dekarbonizacije;
- zahtjeve za održavanjem stabilnosti i sigurnosti elektroenergetskog sistema;
- deregulaciju elektroenergetskog sektora;
- povećanu integraciju distribuiranih resursa itd.

Navedeni faktori su doveli do brojnih promjena u organizaciji, planiranju i funkcionisanju distributivnog sistema. Ubrzani razvoj komunikacionih tehnologija je takođe otvorio nove opcije i alternative za ekonomično upravljanje distributivnim sistemom.

Ambiciozni ciljevi smanjenja emisije gasova sa efektom staklene bašte (eng. *Greenhouse Gasees* – GHG), praćeni komercijalizacijom određenih tehnologija, su rezultirali povećanom integracijom proizvodnih objekata iz obnovljivih izvora energije u distributivni sistem. Distribuirana proizvodnja je dovela do promjene u lancu proizvodnje, upravljanja i distribucije električne energije. Pored toga, distribuirana proizvodnja je otvorila nove mogućnosti „ojačanja“ distributivne mreže, gdje se pored skupih rješenja izgradnje nove distributivne infrastrukture, javlja mogućnost korišćenja prednosti koje pruža ovaj vid proizvodnje (npr. *Distribution Investment Deferral Framework* u Kaliforniji³) [35].

Budući da se približavanjem proizvodnje mjestu potrošnje smanjuje zavisnost potrošača od ispada u mreži, distribuirana proizvodnja dovodi do povećanog kvaliteta snabdijevanja, odnosno neprekidnosti napajanja električnom energijom. U tradicionalnom konceptu, isporuka električne energije krajnjim korisnicima je zavisila od pouzdanosti i prenosnog i distributivnog sistema, gdje bi određeni ispadi u jednoj ili drugoj mreži dovodili do obustavljanja isporuke. Međutim, razvojem distribuirane proizvodnje, smanjuje se zavisnost potrošača od pouzdanosti prenosne mreže, a uz odgovarajuće upravljanje i optimizaciju, može doći do smanjenja gubitaka i povećanja sigurnosnih margina elektroenergetskog sistema. Sa druge strane, povećana penetracija distribuirane proizvodnje je dovela do promjene tokova električne energije u distributivnom sistemu, što iziskuje mnogo kompleksnije upravljanje i zaštitu u distributivnom sistemu.

Pored distribuirane proizvodnje, cjelokupni distributivni sistem prolazi kroz fazu transformacije ugradnjom nove opreme, povećanom automatizacijom i digitalizacijom, nadogradnjom sistema za upravljanje distributivnim sistemom (eng. *Distribution Management System* – DMS) i korišćenjem mikroprocesorske zaštite. Stoga, može se reći da distributivni sistem ulazi u novu eru razvoja, odnosno kreće se ka konceptu pametne mreže.

³ <https://www.cpuc.ca.gov/WorkArea/DownloadAsset.aspx?id=6442451909>

2.6.1. Ciljevi smanjenja emisije gasova sa efektom staklene bašte

Pariski sporazum predstavlja globalni, pravno-obavezujući sporazum za borbu protiv klimatskih promjena, usvojen na Pariskoj konferenciji o klimatskim promjenama 12. decembra 2015. godine⁴.

Osnovni cilj Pariskog sporazuma je jačanje globalnog odgovara na klimatske promjene kroz:

- smanjenje globalne emisije gasova sa efektom staklene bašte,
- ograničenje globalnog porasta temperature na ispod 2 °C u odnosu na pred-industrijski period na dugoročnom planu, uz stremnju ka ograničenju povećanja temperature na čak 1,5 °C [36].

U cilju davanja doprinosa borbi protiv klimatskih promjena, do sada je 195 država potpisalo, a 189⁵ država ratifikovalo Pariski sporazum⁶. Evropska unija je formalno ratifikovala Pariski sporazum 5. oktobra 2016. godine, dok je 11. oktobra 2017. godine u Crnoj Gori usvojen *Zakon o potvrđivanju Pariskog sporazuma*, čime je i Crna Gora postala strana ugovornica.

Implementacija Sporazuma podrazumijeva ekonomsku i socijalnu transformaciju u obimu koji dozvoljava postojeći stepen razvoja tehnologije. Države potpisnice su dužne da definišu pripadajuće planove za klimatsku akciju, odnosno nacionalno utvrđene doprinose (eng. *Nationally Determined Contributions – NDCs*)⁷. S tim u vezi, doprinos Crne Gore u međunarodnoj borbi protiv klimatskih promjena je definisan kroz smanjenje emisije gasova sa efektom staklene bašte za najmanje 30 % (odnosno 1.572 kt CO₂eq) do 2030. godine u odnosu na 1990. godinu i izražen je kroz Namjeravani nacionalno utvrđeni doprinos (INDC) [37].

U skladu sa ciljevima Pariskog sporazuma, u decembru 2019. godine, Evropska unija je otišla korak dalje i postavila dugoročni cilj za postizanje karbonske neutralnosti, odnosno privrede sa nultom emisijom gasova staklene bašte do 2050. godine (Evropski zeleni dogovor), koji se nalazi u centru Evropske zelene politike⁸. Ovaj ambiciozni cilj zahtijeva značajno povećanje dosadašnjih napora kako bi se stvorili preduslovi da karbonski intenzivni sektori pređu u elektroenergetski ili neki drugi „čisti“ sektor u kratkom periodu. S tim u vezi, elektrifikacija transporta i grijanja su prepoznati kao važni koraci ka karbonski neutralnoj budućnosti [38].

U novembru 2016 godine, Evropska komisija (eng. *European Commission – EC*) je prezentovala novi paket kojim je definisan pravni okvir za sprovođenje čiste energetske tranzicije i postizanje doprinosa definisanog Pariskim sporazumom. Ovaj paket je nazvan Paket čiste energije Evropske unije (eng. *EU Clean Energy Package – CEP*), a u to vrijeme je bio poznat i pod imenom Zimski paket (eng. *Winter Package*). Nakon gotovo tri godine konsultacija i pregovora, CEP je konačno odobren u junu 2019. godine, čime je stvoren preduslov za sprovođenje strategije Evropske unije. CEP ima za cilj da stavi u prvi plan korisnike mreže, tačnije potrošače, koji dobijaju priliku da postanu aktivni učesnici energetske

⁴ Na snagu je stupio 4. novembra 2016. godine.

⁵ Podatak iz januara 2021. godine.

⁶ <https://www.un.org/en/climatechange/paris-agreement>

⁷ <https://unfccc.int/process-and-meetings/the-paris-agreement/the-paris-agreement>

⁸ https://ec.europa.eu/clima/policies/strategies/2050_en

tranzicije, kroz proizvodnju, skladištenje energije, kao i transparentnost i nediskriminatornost [39].

2.6.2. Distribuirani izvori električne energije

Deregulacija elektroenergetskog sektora, u svijetu započeta 80. godina prošlog vijeka, dovela je do decentralizacije procesa odlučivanja o povećanju proizvodnih kapaciteta, gdje sav rizik izgradnje nove jedinice preuzima sam investitor, a ne korisnici sistema⁹. Navedene promjene, u duhu težnje ka „zelenoj budućnosti“, uz nesigurnost u pogledu formiranja cijena na tržištu električne energije uzrokovanu varijabilnom proizvodnjom, dovode do smanjenja atraktivnosti velikih centralizovanih jedinica sa dugim periodom izgradnje, pa samim tim i manjom izvjesnošću povrata investicije. S tim u vezi, napredak tehnologije izrade solarnih panela i drugih malih proizvodnih jedinica, uz prednosti koje donosi proizvodnja električne energije u blizini mjesta potrošnje i mali period izgradnje, stvorili su dobre preduslove za razvoj distribuirane proizvodnje.

Prema IEEE (eng. *Institute of Electrical and Electronic Engineers*), distribuirani izvori električne energije predstavljaju jedinice snage 10 MW ili manje, koje imaju mogućnost pružanja usluga elektroenergetskom sistemu (proizvodnja, skladištenje električne energije) i koje se mogu priključiti na gotovo bilo koju tačku sistema. Iako se obično vežu za obnovljive izvore, distribuirane proizvodne jedinice mogu biti i neobnovljive, tj. obuhvataju sljedeće tehnologije: elektrane na biomasu, solarne elektrane, vjetroelektrane, hidroelektrane, mikroturbine na prirodni gas, dizel elektrane itd. [40] (Tabela 2.6.1). Takođe, ove jedinice mogu biti povezane na mrežu ili raditi u izolovanom modu u odnosu na mrežu [41].

Tabela 2.6.1 Podjela distribuirane proizvodnje po tipu izvora¹⁰

Obnovljivi	solarni paneli vjetroatregati hidroelektrane elektrane na biomasu
Neobnovljivi	gorivne ćelije na prirodni gas mikroturbine na prirodni gas dizel agregati

Distribuirani izvori električne energije se mogu koristiti za grijanje, hlađenje, napajanje udaljenog konzuma, rezervno napajanje, pokrivanje baznog ili vršnog opterećenja, unapređenje kvaliteta električne energije itd. Navedene tehnologije imaju potencijal da smanje uticaj fluktuacije cijene električne energije, povećaju sigurnost napajanja, smanje broj zagušenja, obezbijede veću pouzdanost i smanje emisiju gasova sa efektom staklene bašte (ako je riječ o distribuiranim jedinicama koje koriste obnovljive izvore energije).

S obzirom na to da postoji veliki broj definicija distribuirane proizvodnje, opsezi instalisanih snaga distribuiranih jedinica se takođe različito definišu, pa tako:

- Odjsek za energiju SAD-a pod distribuiranom proizvodnjom podrazumijeva distribuirane jedinice čija se snaga kreće u opsegu od nekoliko stotina W do nekoliko desetina MW,

⁹ Ovom konstatacijom nijesu obuhvaćeni različiti kapacitivni mehanizmi (poput *feed-in* tarifa), gdje su, usljed opasnosti od smanjenog ulaganja u nove proizvodne jedinice, investitori djelimično oslobođeni rizika.

¹⁰ <https://www.eia.gov/outlooks/aeo/nems/2020/buildings/>

- Elektroenergetski istraživački institut (eng. *Electric Power Research Institute – EPRI*) pod malim jedinicama smatra jedinice snage od nekoliko kW do 50 MW ili sisteme za skladištenje električne energije koji su priključeni u blizini potrošača,
- U švedskoj legislativi distribuirane jedinice predstavljaju jedinice snage do 1.500 kW,
- Na Novom Zelandu, jedinice snage do 5 MW se smatraju distribuiranim,
- U Australiji, ovaj prag iznosi 30 MW,
- U Crnoj Gori se smatra da jedinice koje su priključene na distributivni sistem mogu imati snagu do 10 MW.¹¹

Iz prethodnog je jasno da ne postoji univerzalna definicija distribuiranih proizvodnih jedinica. Različite jedinice različitih snaga se tretiraju kao distribuirana proizvodnja u različitim regulativama.

U kontekstu distribuiranih izvora električne energije se često koristi pojam distribuirani resursi, koji, pored distribuiranih izvora, obuhvata i različite resurse na strani potrošnje, kao što su sistemi upravljanja potrošnjom (npr. smanjenje potrošnje u vršnom periodu), električna vozila, baterije itd.

U sljedećim potpoglavljima će biti obrađene različite tehnologije obnovljivih distribuiranih proizvodnih jedinica.

2.6.2.1. Solarna fotonaponska tehnologija

Proizvodnja električne energije u solarnim ćelijama se bazira na fotoelektričnom efektu, gdje u kontaktu sa solarnim zračenjem dolazi do izbijanja elektrona iz omotača poluprovodnika i protoka struje. Kratka istorija fotonaponske tehnologije je data u Tabeli 2.6.2.

Tabela 2.6.2 Kratka istorija razvoja fotonaponske tehnologije

Godina	Događaj
1839.	<i>Alexandre-Edmund Becquerel</i> je otkrio fotonaponski efekat.
1876.	<i>William Grylls Adams</i> i <i>Richard Evans Day</i> su demonstrirali fotonaponski efekat na selenu.
1883.	<i>Charles Fritts</i> je napravio prvu fotonaponsku ćeliju korišćenjem poluprovodnog selena i zlata.
1941.	Prvi patent za solarnu ćeliju sa p-n spojem je napravio <i>Russel Shoemaker Ohl</i> za <i>Bell Telephone Laboratories</i> .
1954.	<i>Daryl M. Chapin</i> , <i>Callvin S. Fuller</i> i <i>Gerald L. Pearson</i> su napravili prvu praktičnu silicijumsku solarnu ćeliju efikasnosti 6 % za <i>Bell Laboratories</i> .

Iako je riječ o obnovljivoj tehnologiji, gdje je za proizvodnju električne energije potrebna dovoljna količina sunčevog zračenja, fotonaponski paneli su imali ograničenu primjenu u praksi, usljed velikih troškova proizvodnje i male efikasnosti. Međutim, zahvaljujući tehnološkom napretku koji je doveo do povećanja efikasnosti solarnih panela, kao i povećanoj potražnji, došlo je naglog smanjenja cijene ove tehnologije, čime je povećana njena atraktivnost i u manje razvijenim državama.

¹¹ Pravilnik o vrstama i klasifikaciji objekata za proizvodnju električne energije iz obnovljivih izvora i visokoefikasne kogeneracije („Službeni list Crne Gore“, broj 60/16)

Tehnologije koje se koriste za izradu fotonaponskih ćelija se mogu podijeliti na sljedeće grupe:

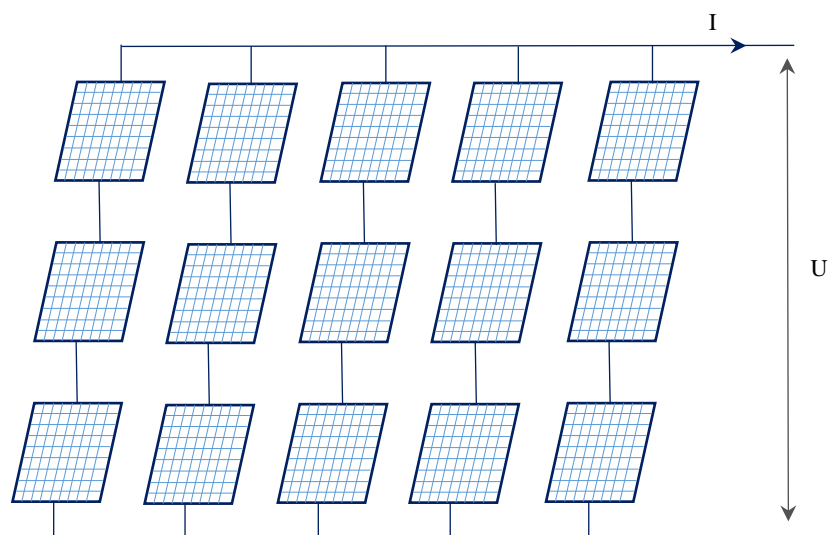
- tehnologije prve,
- druge i
- treće generacije.

Solarne ćelije prve generacije su u osnovi silicijumske fotonaponske ćelije i koriste se za ugradnju na krovnim konstrukcijama. Ovu generaciju karakteriše veća cijena proizvodnje, mala efikasnost, ali i velika robustnost. Svaka fotonaponska ćelija proizvodi maksimalno 0,6 V u prisustvu sunčevog zračenja i u standardnim uslovima – temperatura od 25 °C i (maksimalna) insolacija od 1000 W/m² – maksimalna efikasnost modula može dostići 15 %.

Solarne ćelije druge generacije koriste tehnologiju tankog sloja (kadmijum-telurid (CdTe), bakar-indijum-galijum-dizelenid (CIGS) ili amorfni tankoslojni silicijum sa vodonikom), i samim tim smanjuju troškove proizvodnje u odnosu na prvu generaciju solarnih panela. Zahvaljujući tankoj konstrukciji i niskoj cijeni, druga generacija ima široku primjenu za ugradnju na objektima (eng. *Building-Integrated Photovoltaic* – BIPV) i u solarnim elektranama. Međutim, ova generacija nema poboljšanu efikasnost u odnosu na prethodnu.

Kada je u pitanju treća generacija fotonaponskih ćelija, veliki broj istraživanja je u toku. Ovu generaciju karakteriše najveća efikasnost, ali je posljedično njena cijena proizvodnje takođe velika. Bakar-cink-kalaj-sulfidna solarna ćelija i perovskitna solarna ćelija, neki su od primjera solarnih ćelija treće generacije. Trenutna istraživanja u velikom broju laboratorija imaju za cilj da smanje cijenu proizvodnje ove generacije solarnih ćelija, kako bi se omogućila njihova komercijalna upotreba.

Kao što je već naglašeno, maksimalna razlika potencijala na krajevima monokristalne silicijumske solarne ćelije je 0,6 V, pa je za praktičnu primjenu potrebno prilagoditi napon na njenom izlazu. S tim u vezi, veliki broj solarnih ćelija se međusobno povezuje i tako formira solarni modul. Moduli mogu dalje biti povezani redno ili paralelno, kako bi se dodatno povećala izlazna snaga i na taj način formirali solarni paneli. U slučaju rednog povezivanja solarnih modula, povećava se njihov izlazni napon, dok se u slučaju paralelnog vezivanja povećava izlazna struja. Šematski prikaz petostruke paralelne veze tri redno vezana solarna modula je dat na slici 2.6.1.



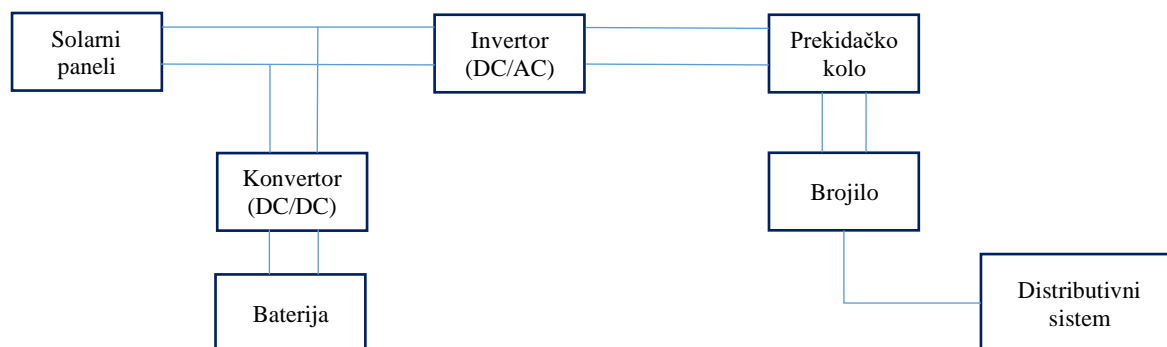
Slika 2.6.1 Petostruka paralelna veza tri redno vezana solarna modula

Brojni faktori utiču na performanse solarne ćelije, odnosno na njenu strujno-naponsku izlaznu karakteristiku. Navedeni faktori i njihov uticaj je prikazan u Tabeli 2.6.3.

Tabela 2.6.3 Uticaj različitih faktora na performanse solarnih panela

Faktor	Uticaj na performanse PV ćelije
Ambijentalna temperatura	Visoka ambijentalna temperatura ne dovodi do povećanja izlazne snage solarnih panela, zato što i pri idealnim uslovima maksimalna efikasnost solarnih panela iznosi 15 %, gdje se ostatak solarne energije pretvara u toplotu.
Vlažnost	Vlaga utiče na degradaciju performansi solarnog panela. Zaštitni sloj ima ulogu da spriječi prodor vlage. Međutim, prodor vlage je moguć u slučaju korišćenja nekvalitetnih zaštitnih materijala, lošeg održavanja ili nepovoljnih vremenskih ulova.
Prisustvo reflektivnih materijala	Prisustvo reflektivnih materijala na površini solarnog panela je kontraproduktivno za proces konverzije energije sunčevog zračenja u električnu energiju, jer će dio solarne energije biti izgubljen kroz refleksiju. Iz ovog razloga se koristi antirefleksivni sloj.
Kvalitet korišćenih materijala	Nekvalitetni materijali bi doveli do brze degradacije performansi solarnih panela, jer su solarni paneli predviđeni za rad na visokim temperaturama, pa su samim tim izloženi ekstremnim temperaturnim uticajima. Kako su paneli direktno izloženi svim vremenskim uslovima, korišćeni materijali moraju biti dimenzionisani tako da izdrže grad, atmosfersko pražnjenje i druge vremenske uslove.
Veličina fotonaponskog modula	Od veličine fotonaponskog modula zavisi i količina proizvedene električne energije. Međutim, veće dimenzije rezultiraju i većim troškovima izrade.
Radna tačka	Ako je radna tačka solarnog panela u blizini optimalne radne tačke, onda će solarni panel raditi efikasno. Sistemi za praćenje položaja Sunca moraju biti ugrađeni kako bi u svakom trenutku položaj solarnih panela bio takav da može da održava radnu tačku u blizini optimalne.
Nagib modula	Nagib modula se definiše kao ugao koji formira modul sa površinom na koju je postavljen. Ukoliko se nagib modula mijenja u skladu sa promjenom sezone, moguće je postići veće izlazne snage. Sistemi praćenja, iako skupi, mogu rezultirati većom proizvodnjom električne energije.

Budući da je niskonaponska distributivna mreža u Evropi trofazna naizmjenična (eng. *alternating current* – AC), a napon na izlazu iz solarnih panela jednosmjerni (eng. *direct current* – DC), kako bi se omogućilo napajanje naizmjeničnog opterećenja potrebno je koristiti invertore. Blok šema povezivanja solarnih panela na naizmjeničnu mrežu je prikazana na slici 2.6.2.



Slika 2.6.2 Sistemi koji se koriste za povezivanje solarnih panela na distributivni sistem

Uloga prekidačkog kola je da izoluje sistem u slučaju kvara u niskonaponskoj mreži. Baterije služe za skladištenje viška proizvedene električne energije, kako bi se ona mogla koristiti i u periodu kada solarni paneli ne mogu da proizvode električnu energiju. Napon punjenja baterije se kontroliše primjenom DC/DC konvertora. U ovim sistemima se najčešće koriste olovno-kisjelinske baterije, ali pored toga se mogu koristiti litijum-jonske i niki-kadmijumske baterije.

U odnosu na nedostatke koji su bili izraženi na samom početku, tehnologija solarnih panela je napredovala i sa aspekta smanjenja troškova proizvodnje i povećanja efikasnosti, čime je postala konkurentna u odnosu na druge vrste distribuiranih izvora. Kako nivo sunčevog zračenja koje dopire do površine Zemlje zavisi od velikog broja faktora, a dostupno je samo tokom jednog dijela dana, može se zaključiti da solarni paneli predstavljaju intermitentni izvor električne energije. U zavisnosti od navika i načina potrošnje konzuma, varijabilnost ovog izvora utiče na njegovu pouzdanost, što znači da je moguće da on ne bude dostupan kada su potrebe konzuma za električnom energijom najveće. Međutim, ovaj problem se u određenoj mjeri može prevazići korišćenjem baterija za skladištenje viška proizvedene električne energije.

2.6.2.2. Tehnologija vjetroagregata

Princip rada vjetroagregata se bazira na konverziji kinetičke energije vjetra u mehaničku energiju okretanja lopatica vjetroturbine, koja pokreće rotor generatora i na taj način dolazi do proizvodnje električne energije na izlazu iz vjetroagregata. Snaga vjetra na površini koju zauzimaju lopatice vjetroturbine je data sljedećom jednačinom:

$$P_{vjetra} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot v^3, \quad (2.9)$$

gdje je ρ [kg/m³] gustina vazduha, koja iznosi 1,225 kg/m³, A [m²] površina koju zauzimaju lopatice vjetroturbine, v [m/s] brzina vjetra na visini na kojoj se nalazi vjetroturbina.

Mehanička snaga na izlazu iz vjetroagregata se dobija tako što se snaga vjetra pomnoži sa koeficijentom snage (ili aerodinamičkim koeficijentom) vjetroturbine ($C_p(\lambda, \beta)$) i odgovarajućim faktorima efikasnosti, odnosno:

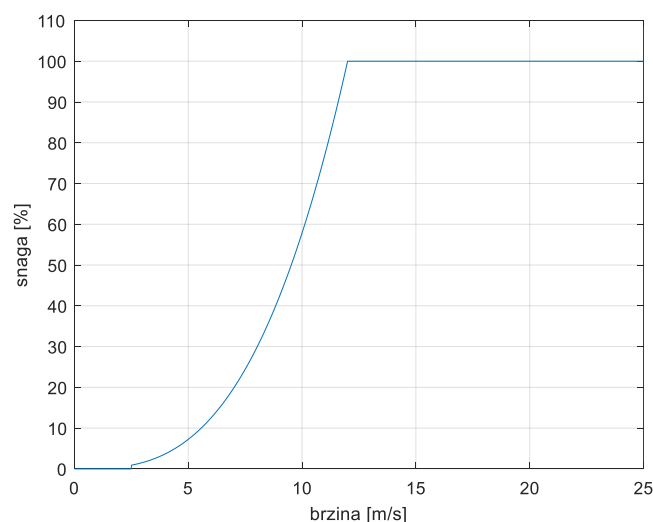
$$P_{vjetroturbine} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot C_p \cdot N_b \cdot N_g \cdot v^3, \quad (2.10)$$

gdje je C_p koeficijent snage vjetroturbine, N_b efikasnost generatora, a N_g efikasnost mehaničkog prenosa snage.

Maksimalna vrijednost koeficijenta snage vjetroturbine (teorijski) je 59,3 % (*Betz*-ova granica), odnosno turbina ne može preuzeti više od 59,3 % snage vjetra koji udara u lopatice. U praksi se ova vrijednost kreće u opsegu od 25 do 45 %.

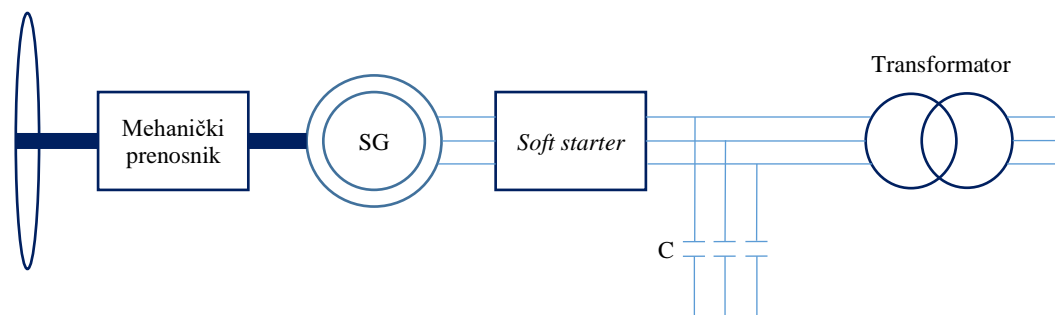
Na slici 2.6.3 je prikazana izlazna karakteristika vjetroturbine. Za vjetroturbine je važno naglasiti da postoje tri karakteristične vrijednosti brzine vjetra i to:

- *Cut-in* brzina (obično iznosi oko 2,5 m/s), koja predstavlja minimalnu brzinu vjetra pri kojoj turbina može da počne da proizvodi korisnu snagu. Za brzine manje od *cut-in* brzine, vjetroturbina ne započinje proizvodnju.
- Nominalna brzina vjetra (obično iznosi oko 12 m/s), koja predstavlja brzinu vjetra pri kojoj se može postići nominalna snaga na izlazu vjetroatregata. Za brzine veće od nominalne brzine vjetroturbine, snaga na izlazu iz generatora se održava na istoj (nominalnoj) vrijednosti.
- *Cut-out* brzina (obično iznosi oko 25 m/s), koja predstavlja maksimalnu brzinu vjetra pri kojoj turbina može da radi. Za brzine veće od *cut-out* brzine dolazi do zaustavljanja vjetroturbine zbog prevelikog mehaničkog naprezanja.



Slika 2.6.3 Izlazna karakteristika vjetroatregata

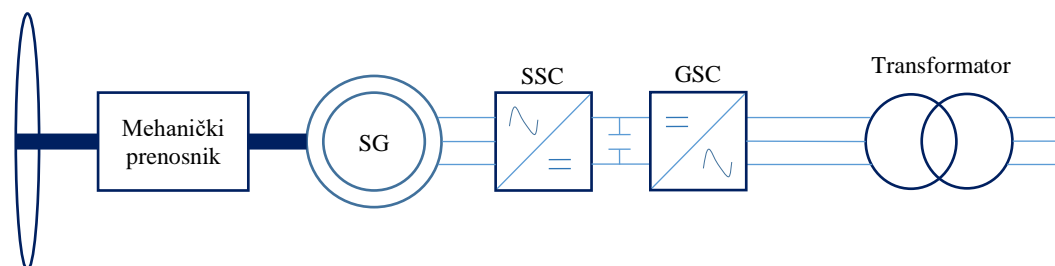
Vjetroatregati se mogu klasifikovati u dvije grupe, u zavisnosti od toga da li rade pri konstantnoj brzini obrtanja (promjena brzine manja od 1 %) ili pri različitim brzinama obrtanja rotora. Blok šema vjetroatregata sa konstantnom brzinom obrtanja je prikazana na slici 2.6.4. Osovina vjetroturbine je povezana sa osovinom generatora preko mehaničkog prenosnog sistema, koji služi da prilagodi ugaonu brzinu turbine kako bi se generator okretao nominalnom brzinom. U ovom slučaju, najčešće se koristi asinhroni generator sa kaveznom rotorom, koji je preko transformatora povezan na trofaznu naizmjeničnu mrežu. Usljed velike potrošnje reaktivne snage, kod ovog tipa vjetroatregata je neophodno koristiti kompenzator reaktivne snage, odnosno kondenzatorsku bateriju. Takođe, dodatni nedostatak ovog koncepta je nemogućnost regulacije brzine, jer je ugaona brzina obrtanja konstantna i prilagođena frekvenciji mreže.



Slika 2.6.4 Blok šema vjetroagregata sa konstantnom brzinom obrtanja

Kod vjetroagregata sa promjenljivom brzinom obrtanja, generator je povezan preko energetskog pretvarača (konvertora) na trofaznu naizmjeničnu mrežu. Na ovaj način se postiže da varijacije brzine obrtanja vjetroagregata ne utiču na frekvenciju trofazne naizmjenične mreže. Ovaj tip vjetroagregata ima mogućnost proizvodnje reaktivne energije pri konstantnoj frekvenciji, u zavisnosti od potreba mreže. Za razliku od prethodnog tipa vjetroagregata, kratkotrajne varijacije brzine vjetra je u određenoj mjeri moguće apsorbovati zahvaljujući promjenljivoj brzini obrtanja rotora. Dvije najčešće korišćene konfiguracije vjetroagregata sa promjenljivom brzinom obrtanja su: konfiguracija sa *fully rated* konvertorom (FCR) i konfiguracija sa dvostrano napajanim asinhronim generatorom.

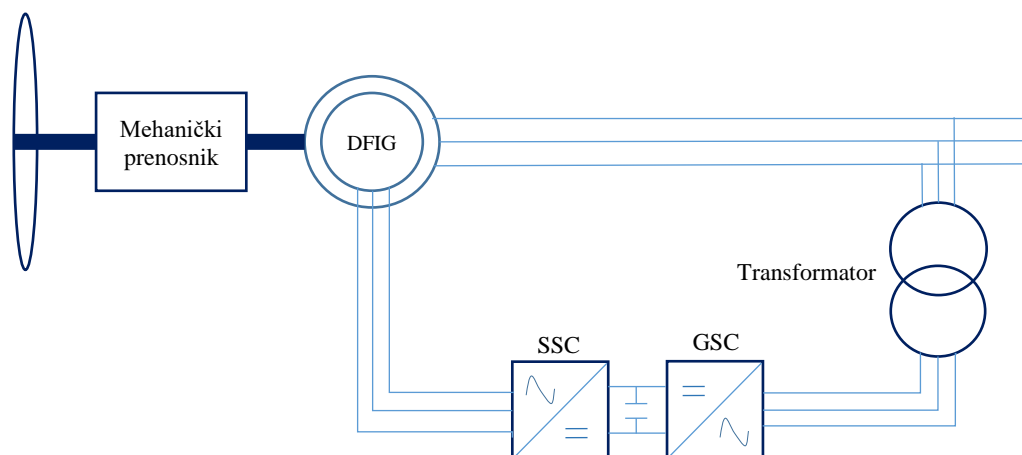
Na slici 2.6.5 je prikazana blok šema vjetroagregata sa *fully rated* konvertorom. U ovoj konfiguraciji je stator generatora direktno povezan sa energetskim pretvaračem, koji prenosi snagu na izlazu iz generatora u mrežu. Energetski pretvarač na izlazu iz statora se sastoji iz dva AC/DC konvertora – SSC (eng. *Stator-Side converter*) i GSC (eng. *Grid-Side Converter*). U ovoj konfiguraciji se mogu koristiti asinhroni generatori, sinhroni generatori i sinhroni generatori sa permanentnim magnetom. Korišćenje mehaničkog prenosnog sistema se može izbjeći primjenom sinhronih generatora sa velikim brojem polova.



Slika 2.6.5 Blok šema vjetroagregata sa *fully rated* konvertorom

Na slici 2.6.6 je prikazana konfiguracija sa dvostrano napajanim asinhronim generatorom (eng. *Double Fed Induction Generator – DFIG*), gdje je stator generatora direktno povezan na mrežu, dok je namotaj rotora na mrežu povezan preko energetskog pretvarača i transformatora. U ovoj konfiguraciji se energetski pretvarač takođe sastoji od dva AC/DC konvertora – RSC (eng. *Rotor-Side Converter*) i GSC (eng. *Grid-Side Converter*). Kako su i rotor i stator asinhronog generatora povezani na mrežu, moguće je postići da i rotor i stator predaju aktivnu energiju u mrežu. Pri brzinama manjim od sinhronne brzine, rotor će apsorbovati aktivnu energiju, dok će pri brzinama većim od sinhronne davati aktivnu energiju u mrežu. Za razliku od prve konfiguracije, gdje kroz konvertor prolazi cjelokupna proizvedena električna energija, u ovoj konfiguraciji samo dio (20 % – 30 %) ukupno proizvedene aktivne energije prolazi kroz energetski pretvarač, čime se značajno smanjuju i gubici u samom konvertoru. Samim tim,

cijena konvertora koji se koristi u ovoj konfiguraciji je niža u odnosu na cijenu konvertora u prvoj konfiguraciji. Navedene prednosti dvostrano napajane konfiguracije su rezultirale većom popularnošću ove konfiguracije u odnosu na konfiguraciju sa *fully rated* konvertorom kod vjetroagregata.



Slika 2.6.6 Blok šema vjetroagregata sa dvostrano napajanim asinhronim generatorom

Vjetar, kao obnovljivi izvor energije, predstavlja „čisti resurs“. Dakle, za razliku od konvencionalnih proizvodnih jedinica, ne izaziva emisiju gasova sa efektom staklene bašte. Pored navedenog, u odnosu na solarne panele, vjetroagregati imaju mnogo veću efikasnost konverzije primarne energije u električnu. Velika prednost ove tehnologije jeste i modularnost vjetroagregata, koji mogu biti različitih dimenzija, pa se mogu koristiti kao distribuirani izvori ili u okviru centralizovanih vjetroelektrana. Međutim, vjetroagregati imaju malu pouzdanost proizvodnje, jer se brzina vjetra ne može predvidjeti dovoljno unaprijed sa velikom tačnošću (iako je u posljednjoj deceniji primjetan veliki napredak u pogledu tačnosti prognoze brzine vjetra). Takođe, vjetroagregati se ne mogu postaviti na bilo kojoj lokaciji, već je potrebno odabrati lokacije sa većim potencijalom vjetra (ovo se naročito odnosi na centralizovane proizvodne jedinice). Usljed mehaničkog obratnja lopatica vjetro turbine, dolazi do generisanja buke, čija jačina zavisi od brzine vjetra i poluprečnika lopatica. Veličina i buka koju proizvode vjetroagregati dovodi do smanjene atraktivnosti ovih proizvodnih jedinica u blizini potrošača u odnosu na solarne panele [42].

2.6.2.3. Tehnologija na biomasi

Biomasa predstavlja biorazgradivi dio poljoprivrednih nusproizvoda, biljnih ili životinjskih ostataka ili industrijskog otpada koji se koristi za proizvodnju toplotne ili električne energije. Proizvodi biomase mogu biti grupisani na sljedeći način¹²:

- industrijski ili komunalni otpad, kao što je komunalni čvrsti otpad, otpad iz postrojenja za prečišćavanje komunalnih otpadnih voda i industrijski otpad,
- energetske usjevi, kao što su poljoprivredni usjevi, biljni energetske usjevi i drveni ostaci
- poljoprivredni nusproizvodi i otpad, kao što su biljni i životinjski ostaci.

¹² <http://www.oie-res.me/index.php?page=bioenergija>

Decentralizovane tehnologije na biogas predstavljaju obećavajuću tehnologiju na biomasu i bioenergiju. Prirodno proizvedeni biogas se može koristiti za kuvanje, osvetljenje, proizvodnju električne energije, grijanje, a može imati i brojne druge primjene.

Biogas predstavlja proizvod fermentacije biorazgradivog otpada, koji nastaje usljed bakterijske aktivnosti u odsustvu kiseonika. Ovaj proces je takođe poznat kao anaerobna digestija, a proizvedeni biogas predstavlja obnovljivi izvor energije. Biogas se dominantno sastoji od metana i ugljen-dioksida, uz manje količine azota i vodonika. Biogas se može dobiti iz životinjskog otpada, otpadnih voda, ostataka poljoprivrednih usjeva, ogranskom frakcijom industrijskog otpada itd.

Količina proizvedenog biogasa zavisi od karakteristika sirovine, koja zavisi od sastava supstrata uključujući lipide, ugljene hidrate i proteine. Energetska vrijednost biogasa je određena koncentracijom metana, odnosno, što je veća koncentracija metana, to je veća i energetska vrijednost. Prosječna kalorična vrijednost biogasa se kreće u opsegu 21-23,5 MJ/m³, tako da 1 m³ biogasa odgovara 0,5-0,6 l dizel goriva. Energetski potencijal biogasa se može dobiti korišćenjem sljedeće formule:

$$B_{PE} = B \cdot B_{CV}, \quad (2.11)$$

gdje je:

B [m³] je količina proizvedenog biogasa;

B_{CV} je kalorična vrijednost koja zavisi od koncentracije metana (CH₄) u biogasu.

U cilju boljeg iskorišćenja energetske vrijednosti biogasa, najčešće se koriste postrojenja za visokoeфикаsnu kogeneraciju, gdje se biogas koristi za proizvodnju električne i toplotne energije. Odnos proizvedene električne i toplotne energije zavisi od količine korišćenog biogasa. Ova postrojenja se mogu povezati na mrežu, a mogu se koristiti za autonomno napajanje određenih industrijskih, komercijalnih ili ruralnih područja. Iskorišćena toplota se može dodatno koristiti za sušenje, zagrijavanje, kao i dodatnu proizvodnju električne energije, samim tim povećavajući ефикаsnost navedene tehnologije.

Kao što je već naglašeno, biogas predstavlja obnovljivi izvor energije, pa su samim tim njegove rezerve neograničene, za razliku od neobnovljivih izvora, kao što su ugalj, nafta i prirodni gas. Iako u svom sastavu sadrži metan i ugljen-dioksid, korišćenje biogasa dovodi do smanjenja emisije gasova sa efektom staklene bašte, doprinoseći smanjenju globalnog zagrijavanja. Naime, sagorijevanjem biogasa takođe dolazi do emisije ugljen-dioksida, ali za razliku od neobnovljivih izvora, emitovani ugljen-dioksid zatvara krug kroz atmosferu, jer je prethodno uzet iz atmosfere u procesu fotosinteze. Takođe, proizvodnjom biogasa se smanjuje emisija metana i azot-suboksida (N₂O) koja nastaje prilikom korišćenja neobrađenog životinjskog izmeta kao đubriva¹³ [43].

Razvoj i povećana primjena tehnologija na biogas ima veliki potencijal da smanji periode sa manjkom proizvedene električne energije (eng. *scarcity periods*). Mnoge države se susreću sa brojnim problemima izazvanim prevelikim količinama otpada i velikim troškovima povezanim sa njihovim odlaganjem, a proizvodnja i korišćenje biogasa dovodi do smanjenja koncentracije otpada, koji se koristi za dobijanje energije. Pored navedenog, tehnologija na

¹³ Važno je naglasiti da potencijal globalnog zagrijavanja metana je 23 puta veći nego ugljen-dioksida, a azot-suboksida čak 296 puta.

biogas je jako fleksibilna, jer koristi različite proizvode iz poljoprivrede, šumarstva, životinjskih i biljnih ostataka itd.

Potrebno je naglasiti da tehnologije na biogas imaju i određene mane koje su povezane sa neravnomjernim korišćenjem supstrata. Takođe, u velikim količinama, proces proizvodnje biogasa nije popularan u poređenju sa drugim biogorivima. Biogas sadrži prirodne nečistoće, koje mogu dovesti do korozije metala prilikom procesa sagorijevanja, a težnja da se biogas pročisti od ovih nečistoća čini proces proizvodnje još skupljim.

2.6.2.4. Hidroelektrane

Potencijalna i kinetička energija riječnih tokova se može efikasno konvertovati prvobitno u mehaničku, pa onda u električnu energiju. Na navedenom principu se zasniva rad hidroelektrana. Ovaj tehnologija proizvodnje električne energije potiče još iz 19. vijeka, odnosno 1878. godine, kada je *William George Armstrong* u Engleskoj razvio prvi praktični hidroelektrični sistem i 1881. godine, kada je *Schoellkopf* elektrana puštena u pogon na Nijagarinim vodopadima. Decenijama kasnije, velike hidroelektrane su postale vodeća tehnologija u energetsom miksnu mnogih država.

Mogućnost i isplativnost izgradnje hidroelektrana zavisi od hidropotencijala rijeka u određenoj državi. Kako bi se proizvele velike količine električne energije, potrebno je raspolagati sa velikim riječnim tokovima. Međutim, postoji veliki broj manjih rijeka i vodotoka koji se nalaze u blizini konzumnih područja i koji se mogu iskoristiti za izgradnju distribuiranih hidroelektrana. Pored prirodnih riječnih tokova, za izgradnju distribuiranih hidroelektrana se može koristiti pad vode iz postojećih brana, rezervoara, ili vodovodnih sistema.

Osnovni djelovi male hidroelektrane su turbina, generator i transformator. Dodatne komponente kao što su senzori, turbinski kontroler, regulator napona i rezervni sistem napajanja mogu da poboljšaju efikasnost proizvodnje i prilagode karakteristike na izlazu iz elektrane. Različiti tipovi turbina koje se mogu koristiti u hidroelektranama su prikazane u Tabeli 2.6.4.

Tabela 2.6.4 Tipovi i karakteristike turbina koje se koriste u hidroelektranama

Tip turbine	Opis	Pad [m]	Efikasnost [%]
Banki turbina	Sastoji se od zakrivljenih noževa pričvršćenih za rotor, o čije vrhove udara voda prilikom ulaska u turbinu.	2-200	86
Peltonova turbina	Mlaznice tangencijalno usmjeravaju vodu na zakrivljene lopatice rotora, uzrokujući njegovu rotaciju.	50-1300	90
Turgo turbina	Mlaznice raspršuju vodu pod određenim uglom i udaraju o veliki broj podijeljenih lopatica istovremeno.	50-250	85
Kaplanova turbina	Rotor je postavljen aksijalno u odnosu na dotok vode u turbinu, što dovodi do njegove rotacije.	2-40	91

Francisova turbina	Rotor je postavljen radijalno u odnosu na dotok vode u turbinu i na taj način voda dovodi do okretanja rotora. Kod ovog tipa turbine se može podesiti da voda pada na rotor aksijalno, i u tom slučaju se ova turbina naziva kombinovanom Francisovom turbinom.	25-350	94
---------------------------	---	--------	----

2.6.3. Pametne mreže

Kao što je već rečeno u uvodnom dijelu, operator distributivnog sistema (ODS) se u sadašnjim okolnostima nalazi na važnoj prekretnici. Zastarjela mreža, u kombinaciji sa integracijom obnovljivih izvora i novim tehnologijama koje koriste električnu energiju, stvara brojne izazove za upravljanje savremenim distributivnim sistemom. S tim u vezi, potreba za integracijom naprednih tehnologija komunikacije, mjerenja i upravljanja koje omogućavaju optimalnije korišćenje mreže, uz održavanje svih parametara u dozvoljenim granicama, postaje sve izraženija, zbog čega se ističe potreba za implementacijom koncepta pametnih mreža.

Pojam „pametne mreže“ se koristi za opisivanje unaprijeđenih, automatizovanih i sofisticiranih elektroenergetskih sistema koji, kroz primjenu digitalnih i drugih naprednih tehnologija, omogućavaju koordinaciju rada proizvodnih jedinica, operatora sistema, potrošača i drugih učesnika u sistemu sa ciljem postizanja što veće efikasnosti funkcionisanja sistema. Prema tome, integracijom pametnih mreža se otvaraju vrata za različite mogućnosti nadzora i upravljanja proizvodnjom i potrošnjom, povećanu integraciju obnovljivih izvora, razvoj mikromreža itd. [44].

U odnosu na konvencionalnu mrežu, pametna mreža treba da omogući unapređenje sistema nadzora, komunikacije, fleksibilnosti, pouzdanosti, kvaliteta itd. kako je i prikazano u Tabeli 2.6.5.

Tabela 2.6.5 Poređenje konvencionalnih i pametnih mreža sa aspekta osnovnih karakteristika [45]

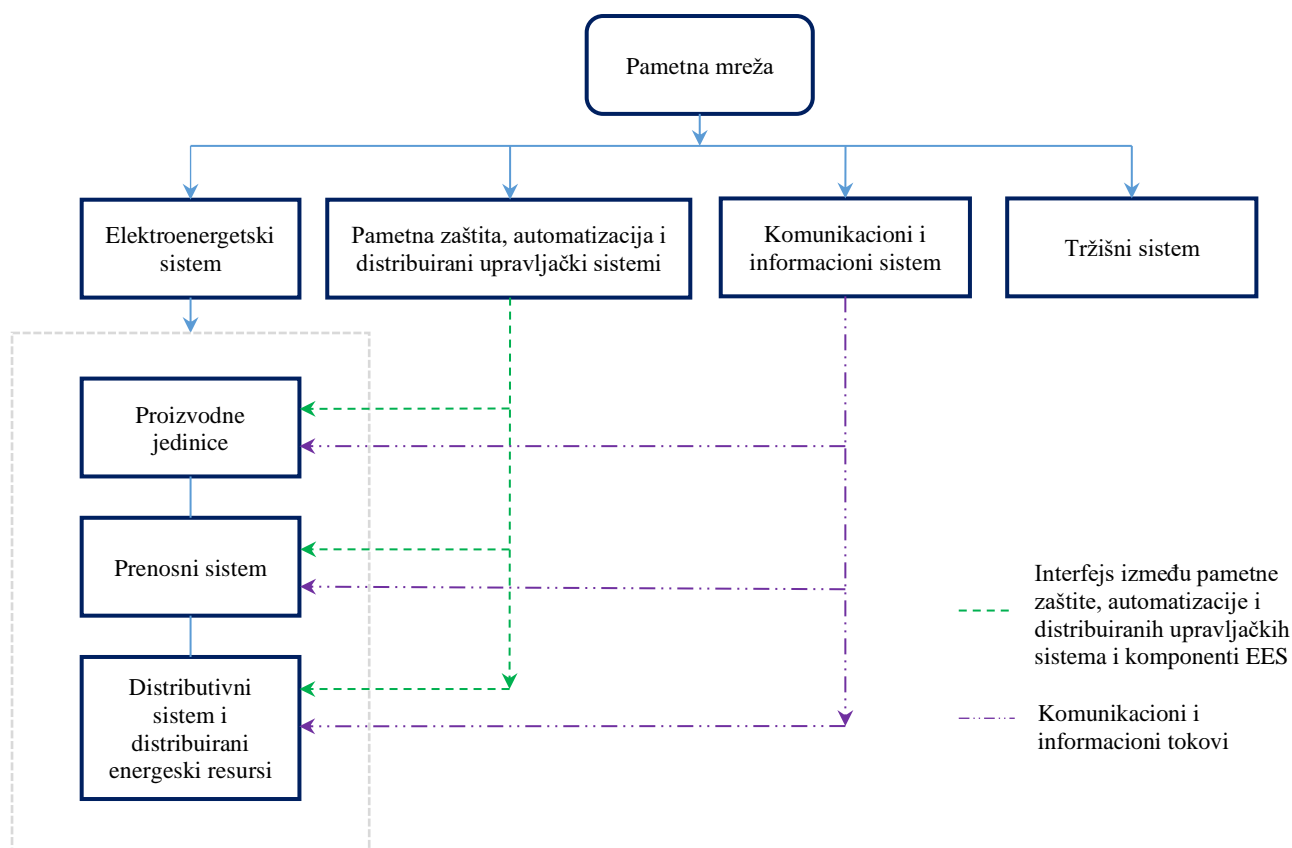
Karakteristike	Konvencionalna mreža	Pametna mreža
Komunikacija	Jednostrana komunikacija ili bez uspostavljene komunikacije	Dvostrana komunikacija
Interakcija potrošača	Ograničena	Visok stepen
Mjerenje	Elektromehanička brojila	Elektronska brojila koja omogućavaju razmjenu podataka u realnom vremenu
Upravljanje sistemom	Ručne manipulacije „na licu mjesta“	Centralizovani nadzor i slanje komandi
Upravljanje tokovima snaga	Ograničeno	Automatizovano
Pouzdanost	Postoji opasnost od čestih i kaskadnih ispada	Automatizovana zaštita, kod koje se mogućnost kaskadnih ispada svodi na malu mjeru

Na osnovu analize različitih modela i definicija pametnih mreža, u [46] su identifikovane sljedeće osnovne komponente pametnih mreža:

- proizvodne jedinice, koje uključuju velike, centralizovane elektrane i distribuirane proizvodne objekte,
- prenosna mreža,
- distributivna mreža,
- potrošači i distribuirani resursi priključeni na instalacije potrošača,
- informacioni i komunikacioni sistemi, koji omogućavaju bezbjedan i pouzdan prenos podataka,
- napredni sistemi mjerenja, kojima se omogućava odziv potrošnje i implementacija dinamičkih cijenovnih signala,
- pametni elektronski uređaji,
- upravljački uređaji, uključujući i distribuirane upravljačke sisteme,
- potrošački uređaji koji dozvoljavaju upravljanje potrošnjom u skladu sa različitim signalima dobijenim iz pametne mreže,
- interfejs između pametne mreže i potrošača, koji predstavlja važan element za uspostavljanje veze između potrošača i pametne mreže;
- mreže zasnovane na internet protokolima, kojima bi se omogućila nezavisna komunikacija u odnosu na komunikacionu infrastrukturu i druge komunikacione tehnologije,
- softverski programi i algoritmi.

Neke od navedenih komponenti predstavljaju infrastrukturne elemente, pa se stoga mogu grupisati u sljedeće sisteme (slika 2.6.7):

- elektroenergetski sistem;
- komunikacioni i informacioni sistem;
- „pametna“ zaštita, automatizacija i distributivni upravljački sistem;
- tržišni sistem.



Slika 2.6.7 Blok šema osnovnih infrastrukturnih komponenti pametne mreže i njihovih međusobnih veza

Iako razvoj distributivne mreže ima za cilj promociju jednostavnosti, robustnosti, pouzdanosti i ekonomske efikasnosti (najmanje troškove), novi uslovi u sistemu zahtijevaju primjenu naprednih sistema i tehnologija, koje iziskuju ogromna ulaganja u sistem. Međutim, procjenjuje se da dugoročni benefiti koje može donijeti koncept pametne mreže (uključujući i one koje je teško monetizovati) prevazilaze troškove implementacije iste, zbog čega se elektroenergetski sistemi, u manjoj ili većoj mjeri, kreću ka ovom konceptu.

Generalno govoreći, benefiti pametnih mreža se mogu sagledavati iz više perspektiva:

- smanjenje gubitaka u sistemu, odlaganje kapitalnih ulaganja i smanjenje troškova održavanja¹⁴, kao i omogućavanje nadzora, lakšeg upravljanja i održavanja sistema – sa aspekta operatora sistema,
- omogućavanje korisnicima da reaguju na cjenovne signale sa tržišta, kroz upravljanje potrošnjom, proizvodnju električne energije za sopstvene potrebe, uz obezbjeđenje većeg nivoa pouzdanosti, sigurnosti i kvaliteta snabdijevanja,
- podrška ciljevima dekarbonizacije kroz olakšavanje integracije proizvodnih objekata iz obnovljivih izvora itd.

Sa druge strane, važno je naglasiti i rizike koje sa sobom nosi automatizacija mreže i prikupljanje velike količine informacija. Tu se, prije svega, misli na moguće sajberske napade i probleme koji se tiču narušavanja privatnosti korisnika sistema.

¹⁴ Važno je naglasiti da su ovi benefiti poželjni i sa aspekta korisnika sistema.

3. Električna vozila

Iako električna vozila djeluju kao “izum” savremenog doba, prvi modeli ovih vozila (demonstracioni) su se pojavili još tridesetih godina 19. vijeka, dok su prva vozila za komercijalnu upotrebu bila dostupna krajem 19. vijeka. S tim u vezi, borba za prevlast na tržištu između električnih vozila i vozila sa motorima sa unutrašnjim sagorijevanjem (konvencionalna vozila) potiče još iz tog perioda. Do 1920. godine, električna vozila su bila značajno zastupljenija, kada je došlo do naglog porasta popularnosti konvencionalnih vozila, usljed pada cijena goriva i samim tim naglog napretka tehnologije konvencionalnih vozila. I pored male efikasnosti motora sa unutrašnjim sagorijevanjem u odnosu na električni motor, velika specifična energija fosilnih goriva (oko 300 puta veća u odnosu na tadašnje olovno-kisjelinske baterije) je imala veliki značaj za prevlast ovih vozila na tržištu. Tokom 20. vijeka električna vozila su bila potisnuta sa tržišta sve do 1996. godine, kada je *General Motors* pustio u prodaju model EV1 [47].

Nakon gotovo jednog vijeka pauze, visoki stepen zagađenja vazduha, zabrinutost usljed globalnog zagrijavanja i ograničenost rezervi nafte doveli su do ponovnog porasta popularnosti električnih vozila, kao rješenja koje može da podrži ambiciozne ciljeve dekarbonizovane i održive budućnosti. Budući da je transportni sektor prepoznat kao jedan od glavnih uzročnika emisije gasova sa efektom staklene bašte u svijetu, elektrifikacija je identifikovana kao ključ dekarbonizacije ovog sektora [48]. S tim u vezi, izražena tendencija ka dekarbonizaciji transportnog sektora je dovela do toga da se u prošloj godini preko 10 miliona električnih vozila našlo na ulicama širom svijeta¹⁵, što predstavlja ohrabrujući podatak imajući u vidu da je u pitanju porast od 43 % u odnosu na 2019. godinu. Uzrok značajanog porasta popularnosti električnih vozila se može pripisati i smanjenju cijene električnih vozila, usljed napretka tehnologije izrade baterija, kao i uvođenju različitih subvencija za kupovinu ovih vozila, čime su ona postala dostupna za širu upotrebu [49].

U odnosu na početak 20. vijeka, novim tehnologijama baterija je povećana specifična energija, a uz prednosti kao što su jednostavnije upravljanje, niski nivo buke, veća efikasnost motora i manji varijabilni troškovi (troškovi goriva), električna vozila su se istakla u odnosu na konvencionalna. S druge strane, konvencionalna vozila i dalje imaju veliku prednost kada je u pitanju punjenje, i sa aspekta mnogo razvijenije infrastrukture za punjenje, i sa aspekta brzine punjenja. Po pitanju prvog nedostatka, nacionalne strategije razvoja mreže javnih punionica teže da izgradnjom guste mreže obezbijede dovoljni stepen fleksibilnosti korišćenja električnih vozila. Sa druge strane, kako bi se prevazišao drugi nedostatak električnih vozila, razvijeni su brzi punjači sa velikim snagama punjenja. Međutim, punjenje i pri ovim snagama traje duže nego punjenje konvencionalnih vozila.

U narednim poglavljima će biti predstavljena podjela električnih vozila, sa posebnim osvrtom na osnovne komponente „potpuno“ električnih vozila (električna vozila na baterije) i na sisteme koji se koriste za njihovo punjenje.

¹⁵ <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2021/trends-and-developments-in-electric-vehicle-markets>

3.1. Tipovi električnih vozila

Budući da se energija za pogon električnih vozila može obezbijediti iz nekoliko vrsta sistema napajanja, električna vozila se mogu klasifikovati na više tipova. S tim u vezi, električna vozila mogu biti kategorisana kao:

- električna vozila na baterije (eng. *Battery Electric Vehicle* – BEV),
- hibridna električna vozila (eng. *Hybrid Electric Vehicle* – HEV),
- hibridna električna vozila sa mogućnošću punjenja (eng. *Plug-in Hybrid Electric Vehicle* – PHEV) i
- električna vozila sa gorivnim ćelijama (eng. *Fuel Cell Electric Vehicle* – FCEV).

Baterijska električna vozila, koja se često nazivaju i „potpuno“ (čisto) električna vozila, obezbjeđuju energiju za pogon vozila samo iz baterije, odnosno ne sadrže i druge izvore napajanja. Strukturalno, ova vozila predstavljaju najjednostavniji tip električnih vozila. Samim tim, baterija predstavlja jedan od ključnih elemenata ovog tipa vozila, od čijih karakteristika zavise njegove performanse i domet. Domet savremenih baterijskih električnih vozila obično iznosi oko 400 km, dok napredniji modeli sa baterijama većeg kapaciteta mogu dostići domete i do 565 km¹⁶. Navedene vrijednosti su dobijene pri standardnim uslovima. Međutim, domet električnih vozila zavisi i od brojnih drugih faktora kao što su: brzina vozila, spoljašnja temperatura, karakteristike terena, konfiguracija vozila, tip i karakteristike baterije i slično.

Hibridna električna vozila imaju dvojak pogon, odnosno pored električnog motora, sadrže i motor sa unutrašnjim sagorijevanjem. Kada radi pri manjim brzinama, hibridno električno vozilo koristi energiju uskladištenu u bateriji, dok pri većim brzinama hibridno električno vozilo obezbjeđuje pogon preko motora sa unutrašnjim sagorijevanjem. Hibridno vozilo može koristiti i oba izvora napajanja istovremeno, kako bi postigao bolje performanse. U zavisnosti od načina povezivanja električnog motora i motora sa unutrašnjim sagorijevanjem, razlikuju se četiri kategorije: redna, paralelna, redno-paralelna i kompleksna veza. Baterije ovih vozila se mogu puniti preko motora sa unutrašnjim sagorijevanjem ili regenerativnim kočenjem. S tim u vezi, hibridna električna vozila primarno funkcionišu kao vozila sa unutrašnjim sagorijevanjem, dok bateriju koriste za postizanje boljih performansi.

Hibridna električna vozila sa mogućnošću punjenja su razvijena u cilju povećanja „električnog dometa“ hibridnih vozila. Dakle, i ova vozila koriste motor sa unutrašnjim sagorijevanjem i električni motor kako bi obezbijedili snagu za kretanje vozila, uz razliku da ovaj tip vozila dominantno koristi električni motor. S tim u vezi, kapacitet baterija u PHEV mora biti značajno veći u odnosu na osnovni tip – HEV. Kada je nivo napunjenosti baterije jako nizak, PHEV se prebacuje na motor sa unutrašnjim sagorijevanjem kako bi obezbijedio dodatnu snagu ili energiju za punjenje baterije. Dodatno, baterija se može puniti direktno iz električne mreže ili uz pomoć regenerativnog kočenja. Kako PHEV uglavnom koristi energiju iz baterije, ovaj tip vozila značajno utiče na smanjenje emisije gasova sa efektom staklene bašte.

Na kraju, električna vozila sa gorivnim ćelijama obezbjeđuju energiju za kretanje vozila zahvaljujući električnoj energiji proizvedenoj u gorivnim ćelijama. Kako je vodonik neophodan da bi hemijska reakcija bila uspješna, ova vozila se često nazivaju i vozilima sa

¹⁶ <https://phev.ucdavis.edu/about/faq-phev/>

vodonikovim gorivnim ćelijama. U principu, za proizvodnju električne energije hemijskom reakcijom su potrebni i vodonik i kiseonik, uz razliku da se vodonik skladišti u specijalnom rezervoaru pod visokim pritiskom, dok se kiseonik uzima iz vazduha koji se usisava iz okoline. Jedini nusprodukt ove reakcije je voda, tako da gorivne ćelije ne emituju gasove sa efektom staklene bašte i samim tim njihov princip rada je usklađen sa ciljevima dekarbonizacije. Proizvedena električna energija se dalje koristi za napajanje električnog motora, dok se višak najčešće skladišti u bateriji ili super-kondenzatoru. Značajna prednost ovog tipa vozila se ogleda u tome što, za razliku od ostalih tipova električnih vozila, punjenje vodonikom traje jako kratko, odnosno koliko i punjenje konvencionalnih vozila. Međutim, postoje brojna ograničenja koja su dovela do spore komercijalizacije ovog tipa vozila. Prije svega, osnovno ograničenje se ogleda u malom broju izgrađenih stanica sa vodonikom i velikim preprekama u prenosu vodonika do odgovarajućih stanica. Pored navedenog, gorivne ćelije su još uvijek jako skupa tehnologija i postoji opasnost od curenja zapaljivog vodonika, čime bi bila ugrožena bezbjednost ljudi u vozilu i okolini.

Trenutno, od svih navedenih tipova električnih vozila, električna vozila na baterije predstavljaju najpopularniju opciju za postizanje karbonski neutralne budućnosti. Kao što je već naglašeno, hibridna električna vozila predstavljaju 'čistiju' varijantu u odnosu na konvencionalna, ali se veći dio energije za napajanje motora obezbjeđuje iz fosilnog goriva (za motor sa unutrašnjim sagorijevanjem), pa je samim tim njihov uticaj na smanjenje emisije gasova sa efektom staklene bašte iz transportnog sektora jako mali. Sa druge strane, hibridna električna vozila sa mogućnošću punjenja u velikoj mjeri nadoknađuju osnovni nedostatak HEV, odnosno ova vozila primarno koriste električnu energiju iz mreže, dok se fosilna goriva koriste kako bi poboljšala performanse PHEV. Međutim, i pored navedenih prednosti, ova vozila nemaju nultu emisiju gasova sa efektom staklene bašte, što nije u skladu sa ciljem dekarbonizacije. Konačno, električna vozila sa gorivnim ćelijama predstavljaju jako skupu varijantu, prvenstveno zbog cijene gorivnih ćelija, nedovoljno razvijenog sistema gasnih stanica i nedovoljno razrađenih opcija za transport vodonika. Pored navedenog, potpuno čisti, obnovljivi (zeleni) vodonik se može dobiti primjenom tehnologije transformacije električne energije u gas (eng. *Power-to-gas* – P2G), gdje se korišćenjem obnovljive električne energije u procesu elektrolize voda razlaže na obnovljivi vodonik i kiseonik [50]. Međutim, ova tehnologija je još uvijek u ranoj fazi razvoja (razvijene su samo jedinice manje snage), a pored toga, ima jako visoku cijenu. Imajući prethodno navedeno u vidu, električna vozila na baterije imaju najveći potencijal za omogućavanje karbonske neutralnosti transportnog sektora, sve dok se za punjenje baterije koristi „obnovljiva“ električna energija, što je u skladu sa sadašnjim koracima i smjernicama razvoja elektroenergetskog sektora.

Rekapitulacija karakteristika i problema kod pojedinačnih tipova električnih vozila je prikazana u Tabeli 3.1.1.

Tabela 3.1.1 Karakteristike pojedinačnih tipova električnih vozila

Tip električnog vozila	Tip motora	Izvor energije u vozilu	Karakteristike	Problemi
Električna vozila na baterije	<ul style="list-style-type: none"> Električni motor 	<ul style="list-style-type: none"> Baterija Super-kondenzator 	<ul style="list-style-type: none"> Ne dovodi do emisije GHG (pod uslovom da se električna energija proizvodi iz obnovljivih izvora) Ne zavisi od fosilnih goriva Domet zavisi od tipa i kapaciteta korišćene baterije Komercijalno dostupna 	<ul style="list-style-type: none"> Cijena baterija i njene karakteristike koje definišu performanse električnog vozila Vrijeme potrebno za punjenje Dostpnost stanica za punjenje Visoka cijena
Hibridna električna vozila sa mogućnošću punjenja	<ul style="list-style-type: none"> Električni motor i motor sa unutrašnjim sagorijevanjem 	<ul style="list-style-type: none"> Baterija Super-kondenzator Fosilna goriva 	<ul style="list-style-type: none"> Mala emisija GHG Veliki domet Električna energija se može obezbijediti i iz baterije i iz fosilnog goriva Kompleksna struktura koja se sastoji iz električnih i mehaničkih djelova Komercijalno dostupna 	<ul style="list-style-type: none"> Ne omogućavaju potpunu dekarbonizaciju Složen sistem upravljanja različitim tipovima izvora energije, Optimizacija dimenzija baterije i motora sa unutrašnjim sagorijevanjem
Električna vozila sa gorivnim ćelijama	<ul style="list-style-type: none"> Električni motor 	<ul style="list-style-type: none"> Gorivna ćelija 	<ul style="list-style-type: none"> Vrlo mala ili gotovo nulta emisija GHG Visoka efikasnost Performanse ne zavise od baterije Visoka cijena Komercijalno dostupan 	<ul style="list-style-type: none"> Visoka cijena gorivnih ćelija Isplativost proizvodnje vodonika u P2G postrojenjima Nedostupnost stanica za punjenje

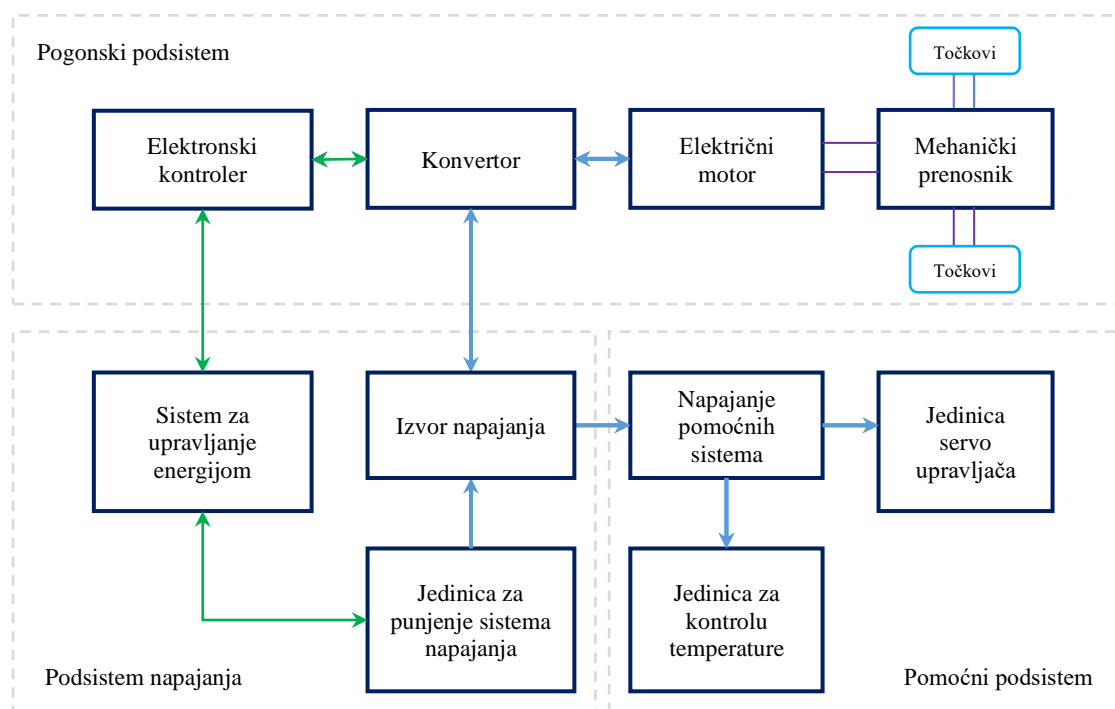
3.2. Konfiguracije električnih vozila

Električno vozilo se može posmatrati kao skup podsistema čijom se interakcijom obezbjeđuje funkcionisanje električnog vozila. Tri osnovna podsistema električnih vozila su:

- podsistem napajanja,
- pogonski podsistem i
- pomoćni podsistem.

Podsistem napajanja se sastoji od izvora napajanja koji obezbjeđuje energiju za pogon vozila, sistema punjenja tog izvora i upravljačkog sistema. Pogonski podsistem uključuje motor, konvertor, kontroler, mehaničke prenosnike i točkove. Na kraju, pomoćni podsistem se

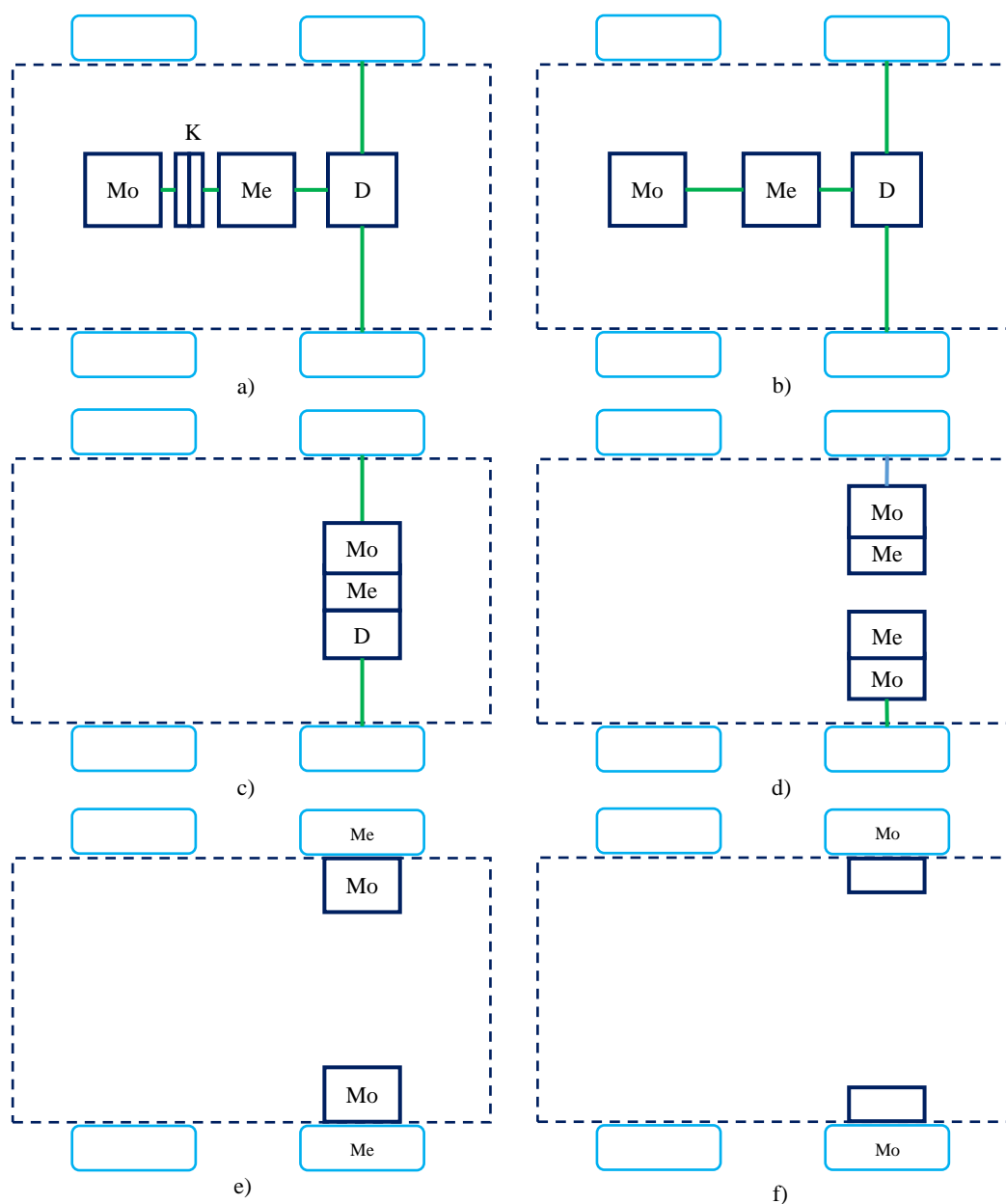
sastoji od pomoćnog izvora napajanja, sistema kontrole temperature i servo-upravljača. Blok šema električnog vozila sa pripadajućim podsistemima je prikazana na slici 3.2.1 [51].



Slika 3.2.1 Blok šema električnog vozila

U zavisnosti od rasporeda elemenata, odnosno podsistema, razlikuje se nekoliko konfiguracija električnih vozila (slika 3.2.2). Prva konfiguracija (a) predstavlja standardnu konfiguraciju konvencionalnih vozila – *front-engine-front-wheel*, gdje je motor sa unutrašnjim sagorijevanjem zamijenjen električnim motorom. Na slici (b) je prikazana konfiguracija bez kvačila, dok konfiguracija (c) sadrži motor, zupčanik i diferencijal kao jedinstvenu jedinicu koja je povezana na oba prednja točka. Za razliku od konfiguracije na slici (c), da bi se postigla diferencijalna funkcija, konfiguracija (d) se sastoji od dva motora koja nezavisno pokreću oba točka preko fiksiranih zupčanika. Na kraju, mehanički zupčanici su u potpunosti eliminisani u konfiguraciji (f) tako što su motori postavljeni na obode točkova. Samim tim se postiže da se kontrolom brzine motora kontroliše brzina točkova, odnosno vozila. *In-wheel* konfiguracijom se smanjuje ukupna težina pogonskog podsistema. Ovim se postiže bolja upravljivost vozila i obezbjeđuje više slobodnog prostora za baterije većeg kapaciteta, ali postoji opasnost od oštećenja motora usljed direktne izloženosti spoljnim uticajima [52].

Pored navedenih konfiguracija koriste se i konfiguracije sa motorom na zadnjim točkovima, kao što je Tesla Model S. Takođe, za postizanje bolje kontrole se može koristiti i *all-wheel drive (AWD)* konfiguracija, u kojoj postoji poseban motor na prednjim i na zadnjim točkovima. *All-wheel drive* konfiguracija omogućava postizanje većeg trenja na glatkim površinama i ima mogućnost vektorske kontrole momenta kako bi vozilo postiglo bolje performanse prilikom skretanja i upravljanja. Međutim, ova konfiguracija nosi sa sobom i veću cijenu, težinu i kompleksnost upravljanja.



Slika 3.2.2 Moguće konfiguracije električnih vozila

3.2.1. Izvor napajanja u električnom vozilu

Kao što je već navedeno u Potpoglavlju 3.1, energija za napajanje motora električnog vozila se može obezbijediti iz nekoliko različitih izvora napajanja. Jedan od najznačajnijih kriterijuma za izbor izvora napajanja električnog vozila je velika gustina snage i energije. Velika specifična gustina energije je potrebna da bi se obezbijedio veći domet vozila, dok je velika specifična gustina snage potrebna za veće ubrzanje vozila. Pored navedenog, potrebno je da sistem napajanja ima sposobnost brzog punjenja i dužeg životnog ciklusa, dok su niska cijena i manji troškovi održavanja dodatni kriterijumi [53].

Budući da je ovaj rad fokusiran na punjenje električnih vozila na baterije, u narednim poglavljima će biti razrađen samo ovaj tip vozila, odnosno u konkretnom slučaju, izvor napajanja (baterije) u ovom tipu vozila.

3.2.1.1. Baterije

Još od početnog perioda razvoja električnih vozila u 19. vijeku, baterije su predstavljale najzastupljeniji izvor napajanja u električnim vozilima. Međutim, mala gustina energije i mali kapacitet su bili ograničavajući faktori za postizanje većih dometa ovih vozila u odnosu na konvencionalna vozila, što je i jedan od uzroka smanjene popularnosti električnih vozila početkom 20. vijeka. S tim u vezi, može se izvesti zaključak da je napredak tehnologije baterija predstavljao važan preduslov za razvoj i unapređenje performansi električnih vozila.

Dodatno, veliki problem za konkurentnost ovih vozila na tržištu je bila visoka cijena baterije, kao jedne od najskupljih komponenti električnih vozila. Međutim, naglo povećanje popularnosti električnih vozila je rezultiralo smanjenjem cijene baterija (smanjenje troškova proizvodnje, pad cijene komponenti baterije i novi dizajn baterija), iako je još uvijek cijena električnih vozila veća u poređenju sa cijenom konvencionalnih vozila. U odnosu na 2009. godinu, cijena kilovat-časa baterije je opala za oko 80 %, dok se još značajniji pad cijena očekuje do 2025. godine. U cilju smanjenja cijene baterija, kompanija *Tesla* je 2014. godine počela sa izgradnjom najveće fabrike baterija – *Gigafactory* – za koju je projektovano da samostalno dostigne godišnji stepen proizvodnje litijum-jonskih baterija koji je zabilježen 2013. godine. Proizvodnom ogromnog broja baterija godišnje, predviđeno je da se iskoriste prednosti ekonomije obima i na taj način postigne veliki pad cijene litijum-jonskih baterija, kako bi električna vozila postala dostupna za širu upotrebu¹⁷¹⁸.

U principu, baterija predstavlja ključnu komponentu koja obezbjeđuje energiju za napajanje motora električnog vozila. Baterija se sastoji od više ćelija povezanih zajedno, koje služe da konvertuju hemijsku u električnu energiju. Budući da ćelije sadrže pozitivnu i negativnu elektrodu (anoda i katoda) povezane elektrolitom, hemijskom reakcijom između elektroda i elektrolita dolazi do generisanja električne energije. Prilikom punjenja ovih baterija dolazi do okretanja hemijske reakcije, čime se baterija vraća u napunjeno stanje. Imajući u vidu navedenu strukturu baterije, jasno je da se kombinacijom velikog broja materijala i elektrolita mogu dobiti baterije različitih karakteristika.

Generalno govoreći, baterija se može posmatrati kao „crna kutija“ koja treba da zadovolji određene zahtjeve. Ovi zahtjevi uključuju odgovarajuću vrijednost specifične gustine energije, specifične snage, specifične energije, opsega radne temperature, amper-sat efikasnosti, stope samopražnjenja, broja životnih ciklusa i broja ciklusa punjenja. Pored navedenog, potrebno je uzeti u obzir i uticaj različitih faktora – temperature, stope punjenja i pražnjenja, oblika baterije i načina punjenja – na performanse baterije. Deng i ostali su u [54] dali pregled najvažnijih zahtjeva koje baterije u električnim vozilima moraju da zadovolje kako bi se postigla veća konkurentnost sa vozilima sa motorima sa unutrašnjim sagorijevanjem. Navedeni zahtjevi su prikazani u Tabeli 3.2.1.

¹⁷ https://www.tesla.com/en_EU/gigafactory

¹⁸ Do sada je izgrađena samo trećina projektovane fabrike.

Tabela 3.2.1 Zahtjevi za odabir baterija u električnim vozilima

Karakteristike baterije	Najvažniji zahtjevi
Specifična energija/gustina energije	>750 Wh/L i 350 Wh/kg po ćeliji
Cijena	<100\$/kWh po ćeliji
Brzina punjenja i snaga	80% stepena napunjenosti Δ SOC (eng. <i>State of Charge</i>) za 15 minuta ¹⁹
Životni vijek	15 godina
Performanse	Minimalni uticaj okoline na performanse
Sigurnost	Zaštita od požara i eksplozije

Međutim, navedeni zahtjevi su definisani za „idealnu“ bateriju, tako da je u praktičnom smislu jako teško izdvojiti jedan tip baterije koji zadovoljava sve navedene zahtjeve, zbog čega je potrebno napraviti kompromis između pojedinačnih zahtjeva.

Do sada je razvijen samo mali broj komercijalnih električnih baterija koje su pogodne za korišćenje u električnim vozilima. Ove tehnologije obuhvataju: olovno-kisjelinske, niki-kadmijumske, niki-metal-hidridne i litijum-jonske baterije. Danas, najzastupljenija tehnologija baterija u električnim vozilima su litijum-jonske baterije.

U sljedećoj tabeli su prikazane prednosti i mane navedenih baterija²⁰.

Tabela 3.2.2 Pregled prednosti i mana osnovnih tipova baterije

Tip baterije	Prednosti	Mane
Olovno-kisjelinske (Pb-PbO₂)	<ul style="list-style-type: none"> Niska cijena i jednostavna tehnologija za proizvodnju, Pouzdana i „zrela“ tehnologija (predstavlja izum iz 1859. godine), Mala stopa samopražnjenja – jedna od najmanjih među svim tipovima baterija, Lako održavanje, baterija nema izražen efekat „memorije“ koji bi uticao na smanjenje broja životnih ciklusa, 	<ul style="list-style-type: none"> Mala gustina energije, što predstavlja ograničavajući faktor za primjenu ovih baterija, Dozvoljeno je samo nekoliko ciklusa potpunog pražnjenja baterije, Loš uticaj na životnu sredinu, Ograničen transport olovno-kisjelinske tečnosti, zbog opasnosti od curenja u okolinu,

¹⁹ Iako vrijeme potrebno za punjenje u najvećoj mjeri zavisi od karakteristika punjača, važni ograničavajući faktor za omogućavanje brzog punjenja su karakteristike materijala od kojeg je napravljena baterija.

²⁰ https://batteryuniversity.com/learn/archive/whats_the_best_battery

		<ul style="list-style-type: none"> • Mogućnost termalnog bjekstva usljed neprikladnog punjenja,
Nikl-kadmijumske (NiCd)	<ul style="list-style-type: none"> • Brzo i jednostavno punjenje, • Veliki broj ciklusa punjenja i pražnjenja (uz dobro održavanje, može da ima i do 1000 ciklusa punjenja i pražnjenja), • Jednostavno skladištenje i transport, • Ekonomična cijena, najjeftinija baterija kada je u pitanju jedinična cijena po ciklusu, • Dostupna u različitim veličinama, 	<ul style="list-style-type: none"> • Relativno mala gustina energije (u poređenju sa drugim tipovima baterija), • Izražen efekat baterijske „memorije“, • Loš uticaj na životnu sredinu, • Relativno visoka stopa samopražnjenja,
Nikl-metal-hidridne (NiMH)	<ul style="list-style-type: none"> • 30 do 40 % veći kapacitet u odnosu na standradne NiCd, • Manji efekat „memorije“ u odnosu na NiCd, • Jednostavno skladištenje i transport, • Nemaju štetan uticaj na životnu sredinu, 	<ul style="list-style-type: none"> • Ograničen životni vijek baterije, • Za punjenje je potrebno obezbijediti kompleksan algoritam (tokom punjenja dolazi do oslobađanja velike količine toplote), • Visoka stopa samopražnjenja, • Dolazi do degradacije performansi u slučaju čuvanja na visokim temperaturama, • Komplikovano održavanje,
Litijum-jonske (Li-ion)	<ul style="list-style-type: none"> • Visoka specifična gustina energije, specifična energija i specifična snaga • Relativno mala stopa samopražnjenja (stopa samopražnjenja je upola manja u odnosu na NiCd i NiHM), • Lako održavanje (nema izražen efekat „memorije“). 	<ul style="list-style-type: none"> • Zahtijeva zaštitno kolo koje služi da ograniči napon i struju, • Prilikom transporta se moraju poštovati odgovarajuće regulative, • Skupa proizvodnja.

Tehničke karakteristike navedenih tipova baterija su prikazane u Tabeli 3.2.3.

Tabela 3.2.3 Tehničke karakteristike pojedinih tipova baterija za električna vozila [55]

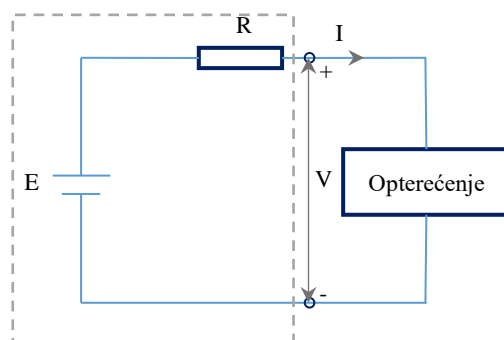
Karakteristike	NiCd	NiHM	Pb-PbO ₂	Li-ion
Radni temperaturni opseg [°C]	0-50	0-50	-20-45	-20-60
Specifična energija [Wh/kg]	60-80	60-120	30-60	100-275
Specifična gustina energije [Wh/l]	60-150	100-300	60-100	200-735
Specifična snaga [W/kg]	120-150	250-1000	75-100	350-3000
Napon ćelije [V]	1,35	1,35	2,1	3,6
Broj ciklusa	2000	500	500-800	400-3000

Prilikom odabira baterije, jedna od najznačajnijih karakteristika koja se mora uzeti u obzir je opseg radne temperature koji govori o mogućnosti baterije da funkcioniše normalno pri različitim vrijednostima temperature. Iz navedene tabele je jasno da najveći radni opseg imaju litijum-jonske i olovno-kisjelinske baterije, a pored navedenog obje mogu da podnesu temperaturu od $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ²¹. Dodatno, po pitanju specifične gustine energije (koja ima veliki uticaj na domet električnih vozila), specifične snage, specifične energije i broja radnih ciklusa, litijum-jonske baterije se ističu po najvećim vrijednostima ovih parametara, što je bio i jedan od presudnih faktora koji je uticao na porast njihove primjene. U odnosu na kriterijume prikazane u Tabeli 3.2.1, jasno je da litijum-jonske baterije zadovoljavaju veći broj kriterijuma, iako zahtjevi za specifičnom gustinom energije i cijenom još uvijek nisu zadovoljeni.

3.2.1.1.1 Ekvivalentno kolo baterije

U cilju modelovanja procesa punjenja i pražnjenja baterije, koriste se ekvivalentne šeme koje predstavljaju manju ili veću aproksimaciju stvarnog „ponašanja“ baterije.

Najjednostavnija, ali i najčešće primijenjivana ekvivalentna šema baterije je prikazana na slici 3.2.3.

**Slika 3.2.3** Ekvivalentna šema baterije

²¹ Iako pri ovoj temperaturu dolazi do povećanog stepena samopražnjenja litijum-jonske baterije.

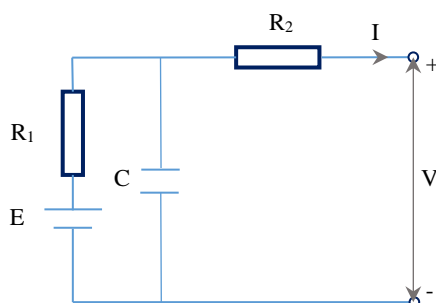
Baterija se modeluje kao naponski izvor napona E (napon praznog hoda) i unutrašnje otpornosti R , dok je napon na izlazu baterije V . Pod pretpostavkom da struja I protiče kroz bateriju (smjer pražnjenja), primjenom drugog Kirhofovog zakona se dobija:

$$V = E - IR. \quad (3.1)$$

Dakle, prilikom pražnjenja, napon na izlazu iz baterije zavisi od struje koja protiče kroz bateriju i manji je od E za pad napona IR . U slučaju da je struja jednaka nuli, napon na izlazu je jednak naponu E (napon praznog hoda jer nije priključeno opterećenje).

Iako je predstavljeni model koristan za predstavljanje osnovnih karakteristika baterije, navedenim ekvivalentnim kolom se ne modeluje dinamičko ponašanje baterije. Na primjer, u slučaju da se opterećenje priključi na bateriju, iz navedenog modela slijedi da napon odmah pada na nižu vrijednost. U realnosti, naponu je potrebno određeno vrijeme da padne na nižu vrijednost.

Na slici 3.2.4 je prikazana šema koja na bolji način simulira dinamičke procese u bateriji. Prelazni procesi u bateriji se modeluju uz pomoć kondenzatora kapacitivnosti C .



Slika 3.2.4 Primjer ekvivalentne šeme baterije kojom se modeluju dinamički procesi u bateriji

Važno je naglasiti da se u ekvivalentnim šemama pretpostavlja da su napon E i unutrašnja otpornost R konstantne vrijednosti, iako E i R zavise od brojnih faktora. Naime, napon praznog hoda pokazuje veliku zavisnost od stepena napunjenosti baterije. Budući da porastom stepena napunjenosti baterije raste i napon praznog hoda, monotono rastuća funkcija se može odrediti korišćenjem regresionog algoritma, odnosno određivanjem matematičke zavisnosti korišćenjem odgovarajućih modela (eksponencijalni, polimijalni, *Gauss*-ov model itd.) [56].

Uzimajući u obzir uticaj temperature i stepena napunjenosti baterije, *Gauss*-ova funkcija zavisnosti napona praznog hoda od stepena napunjenosti baterije glasi:

$$E = \sum_{i=1}^n a_n e^{-\left(\frac{S-b_n}{c_n}\right)^2} \quad (3.2)$$

gdje su a_n , b_n i c_n koeficijenti čija vrijednost zavisi od radne temperature, E napon praznog hoda za određenu vrijednost temperature, a S je stepen napunjenosti baterije.

Za procjenu koeficijenata a_n , b_n i c_n koristi se funkcija srednje kvadratne greške (eng. *Root Mean Square Error* – RMSE):

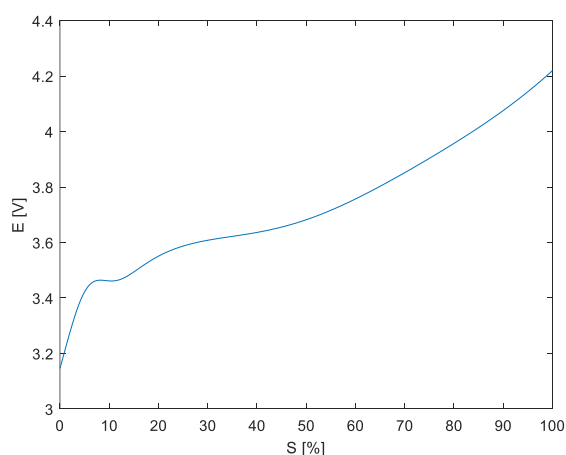
$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum (E_i - E_i^{(s)})^2} \quad (3.3)$$

gdje je n broj eksperimentalno dobijenih vrijednosti E , E_i vrijednost napona praznog hoda dobijena preko *Gauss*-ovog modela, dok je $E_i^{(s)}$ eksperimentalno dobijena vrijednost napona praznog hoda.

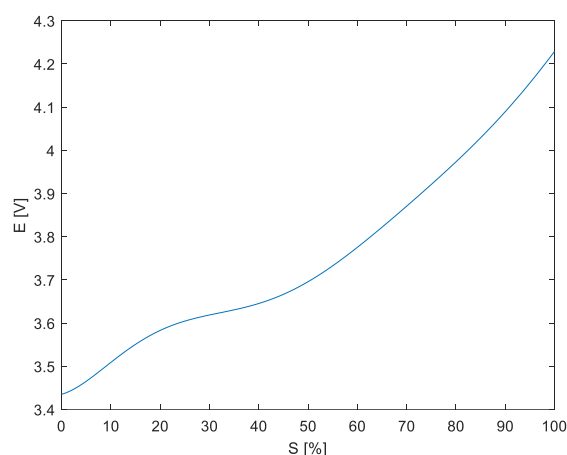
Kako napon praznog hoda zavisi i od radne temperature, za različite vrijednosti temperature potrebno je utvrditi različite koeficijente a_n , b_n i c_n , odnosno različite krive zavisnosti. U radu [57] su primjenom eksponencijalne regresije za *Gauss*-ovu funkciju 4. reda ($n=4$) dobijene vrijednosti koeficijenata za različite temperature prikazane u Tabeli 3.2.4.

Tabela 3.2.4 Vrijednosti koeficijenata a_n , b_n , i c_n dobijene primjenom eksponencijalne regresije

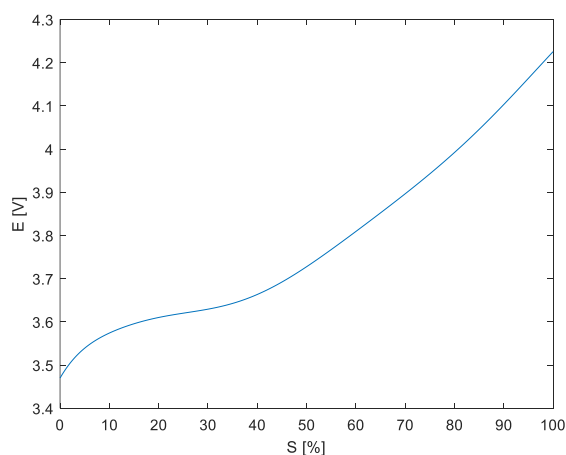
T(°C)	a ₁	b ₁	c ₁	a ₂	b ₂	c ₂	a ₃	b ₃	c ₃	a ₄	b ₄	c ₄
45	5,067	1,635	0,747	2,744	0,598	0,598	2,027	0,0159	0,411	0,163	0,051	0,053
25	5,163	1,794	1,665	0,329	0,327	0,327	1,59	0,0647	0,441	5,184	-0,531	0,306
0	4,329	1,305	0,805	2,043	0,397	0,498	1,762	-0,011	0,336	0,472	-0,105	0,152
-20	4,184	1,327	0,706	2,264	0,483	0,519	2,744	-0,152	0,485	-0,003	0,361	0,053



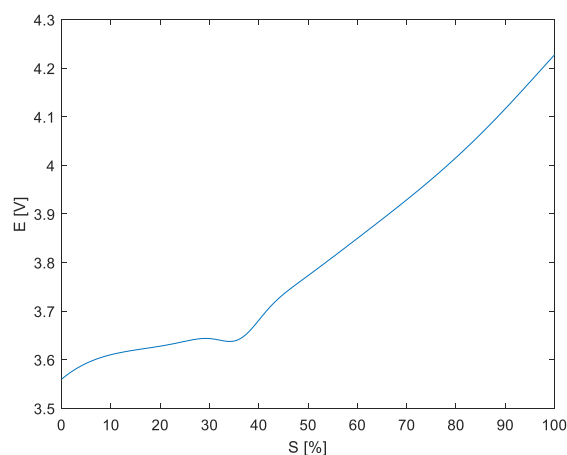
a)



b)



c)



d)

Slika 3.2.5 Funkcije promjene napona praznog hoda od stepena napunjenosti baterije dobijene korićenjem koeficijenata iz tabele pri temperaturi od (a) 45°C, (b) 25°C, (c) 0°C i (d) -20°C

Sa grafika je jasno da sa povećanjem stepena napunjenosti baterije, raste i napon praznog hoda E . Dodatno, poredeći karakteristike za različite temperature, vidljivo je da se sa povećanjem temperature smanjuje *cut-off* napon. Odnosno, što je manja temperatura veća je snaga koja se ne može iskoristiti iz baterije.

3.2.2. Električni motori

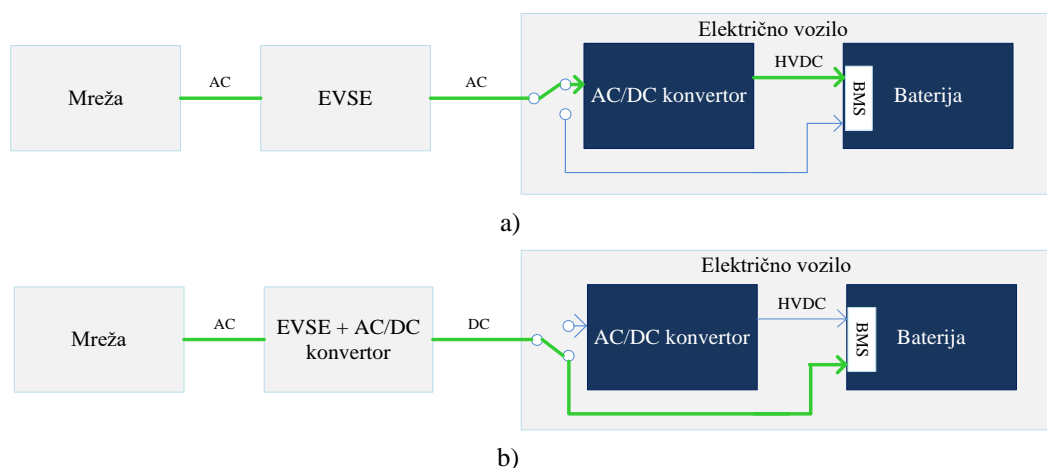
Električni motor predstavlja središnji element električnog vozila, koji služi za konverziju električne u mehaničku energiju. Prilikom regenerativnog kočenja, električni motor se može ponašati i kao generator, kada dolazi do punjenja baterije. Zahtjevi koji se stavljaju pred izbor motora u električnom vozilu uključuju: veliki opseg brzina, velika efikasnost, robustnost, pouzdanost, razumna cijena, male dimenzije i velika snaga. U tom cilju se mogu koristiti jednosmjerni i naizmjenični motori. Jednosmjerni motori se obično koriste u slučajevima kada se ne zahtijeva velika snaga (do 4 kW), dok se naizmjenični koriste za vozila kojima je potrebna veća snaga (preko 5 kW). U savremenim električnim vozilima se najčešće koriste asinhroni motori, koračni motori i sinhroni motori sa permanentnim magnetom [58].

3.3. Punjenje električnih vozila

Jedan od osnovnih preduslova za povećanje popularnosti električnih vozila na određenom području jeste izgradnja guste mreže stanica za njihovo punjenje. Stoga, nedovoljno ulaganje u njihov razvoj predstavlja ograničavajući faktor za elektrifikaciju transporta. Međutim, izgradnja adekvatne mreže stanica za punjenje električnih vozila na nacionalnom nivou predstavlja veliki izazov čak i za razvijene države [59-61]. Važan aspekt koji se mora uzeti u obzir prilikom planiranja lokacija za izgradnju punionica, osim praktičnosti njenog pozicioniranja na određenom mjestu (npr. u blizini tržnih centara, poslovnih kvartova itd.), jeste i sposobnost mreže da podnese dodatno opterećenje na odabranoj lokaciji i, s tim u vezi, potreba za investiranjem u taj dio mreže.

Punjenje baterije električnih vozila se postiže povezivanjem električnog vozila na opremu za punjenje električnih vozila (eng. *Electric Vehicle Supply Equipment – EVSE*), odnosno stanicu za punjenje električnih vozila. U slučaju naizmjenične EVSE, oprema za punjenje električnih vozila služi za nadzor, upravljanje i komunikaciju sa vozilom prilikom punjenja, dok u slučaju jednosmjernih EVSE, pored navedenih, ima i ulogu konverzije naizmjenične u jednosmjernu struju. S tim u vezi, razlikuju se dva tipa energetske pretvarača koji se koriste za konverziju naizmjenične u jednosmjernu struju (konvertori): sistem, odnosno punjač koji se nalazi izvan vozila (eng. *off-board charger*) i punjač koji se nalazi u samom vozilu (eng. *onboard charger*) [62].

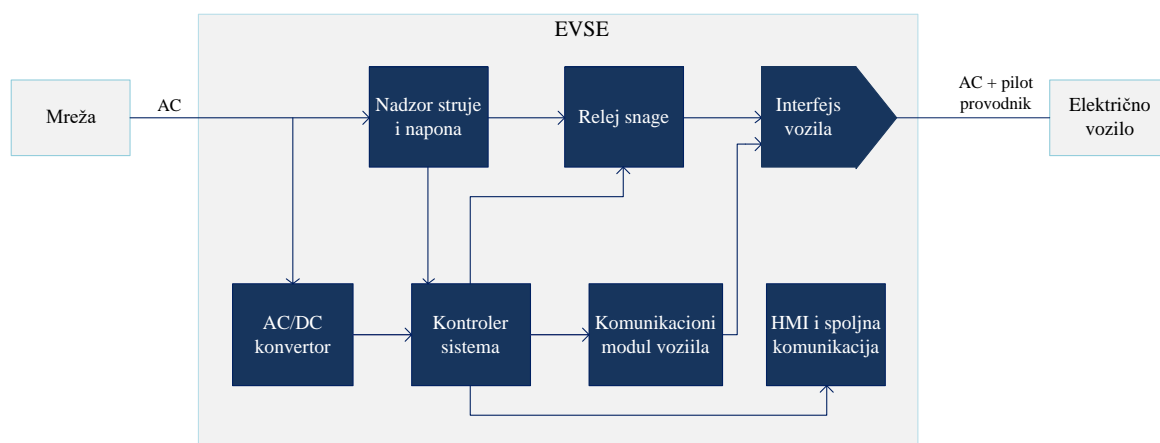
Na slici 3.1.1 je prikazan princip rada naizmjeničnog i jednosmjernog sistema punjenja. Jasno je da se korišćenjem jednosmjernih EVSE (slika 3.1.1 (b)) zaobilazi punjač koji se nalazi u vozilu i jednosmjerna struja direktno napaja bateriju. Sa druge strane, kod naizmjeničnih stanica za punjenje električnih vozila se za ispravljanje naizmjenične struje koristi punjač unutar vozila.



Slika 3.3.1 Blok šema naizmjeničnog (a) i jednosmjernog (b) sistema punjenja

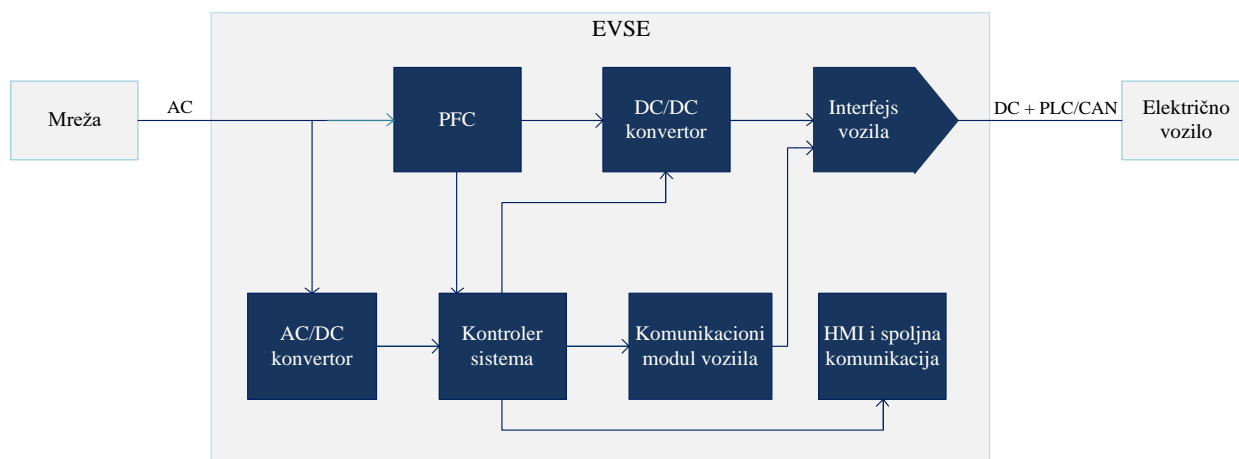
Imajući u vidu značaj punjača (konvertora) u procesu punjenja električnog vozila, velika efikasnost i smanjenje troškova punjača je ključna za povećanje popularnosti ovih vozila.

Blok šema sa elementima naizmjenične EVSE je prikazana na slici 3.3.2. Podsystem za nadzor struje i napona služi za praćanje vrijednosti struje i napona tokom punjenja. Zaštitni element – relej – ima ulogu da prekine punjenje u slučaju da napon ili struja pređu određenu vrijednost (na signal kontrolera). Interfejs za vozilo kontroliše signal sa pilot kontakta (Mod 3 punjenja – Potpoglavlje 3.3.3.3), čija je funkcija da uspostavi osnovnu komunikaciju između vozila i stanice za punjenje prilikom konekcije. Većina stanica za punjenje električnih vozila ima barem neki vid interfejsa za komunikaciju sa korisnikom, kako bi se olakšalo njeno korišćenje i podešavanje željenih veličina prilikom punjenja. Na kraju, kako bi navedene komponente mogle da obavljaju svoju funkciju, potrebno je da imaju obezbijeđeno napajanje, što se postiže dodavanjem AC/DC konvertora koji se napaja iz mreže.



Slika 3.3.2 Blok šema naizmjenične EVSE

Sa druge strane, na slici 3.3.3 je prikazana blok šema jednosmjerne stanice za punjenje električnog vozila. Osnovna razlika u odnosu na naizmjeničnu stanicu je prisustvo konvertora (AC/DC i DC/DC) unutar same stanice. Prvi stepen konvertora AC/DC obezbjeđuje konverziju trofazne naizmjenične struje u jednosmjernu, dok DC/DC konvertor omogućava dobijanje stabilnog jednosmjernog napona kojim se dalje napaja vozilo (odnosno baterija u vozilu) [63].



Slika 3.3.3 Blok šema jednosmjerne EVSE

3.3.1. Nivoi punjenja

U zavisnosti od vrijednosti snage punjenja, može se definisati nekoliko nivoa punjenja:

- Normalno punjenje,
- Umjereno-brzo punjenje i
- Brzo punjenje.

Važno je naglasiti da se ovi nivoi punjenja definišu za tipična putna vozila, odnosno manja teretna vozila. Za manja vozila (poput električnog bicikla ili trotineta), punjenje pri snagama koje odgovaraju normalnom punjenju, predstavlja brzo punjenje (zbog malog kapaciteta baterije ovih vozila).

3.3.1.1. Normalno punjenje

Normalno punjenje podrazumijeva punjenje pri snazi koja se može obezbijediti preko standardne utičnice u domaćinstvu. Ovaj nivo punjenja odgovara Nivou 1 punjenja definisanog standardom SAE-J1772, koji se koristi u SAD-u.

Nominalne vrijednosti struje i napona na standardnoj utičnici u domaćinstvu variraju u različitim djelovima svijeta. U većini evropskih država, nominalna vrijednost napona na utičnici je 230 V, dok je nominalna vrijednost struje 16 A, iz čega slijedi da se snaga punjenja može kretati do 3,68 kW. Sa druge strane, u nekim državama su nominalne vrijednosti struje i napona na utičnici niže (npr. u Ujedinjenom Kraljevstvu 13 A, dok je u Švajcarskoj 10 A), pa je samim tim i snaga punjenja manja.

U principu, ako se uzme u obzir standardna utičnica u Evropi (230 V, 16 A), pri kapacitetima baterije od 30 kWh, primjenom normalnog punjenja moguće je napuniti električno vozilo tokom noći.

Sa druge strane, kako je u SAD-u nominalni napon utičnice u domaćinstvu 120 V, dok je nominalna struja 15 A, snaga normalnog punjenja iznosi oko 1,8 kW. Uz ovako malu snagu, vozilo sa baterijom istog kapaciteta bi se punilo duplo duže nego u Evropi, što za veće kapacitete baterija nije praktično. Međutim, čak i pri ovako niskoj snazi, u slučaju da se dnevno ne pređu velika rastojanja vozilom (gradska voznja), ovaj nivo punjenja može biti adekvatan.

3.3.1.2. Umjereno-brzo punjenje

Pod umjereno-brzim punjenjem se podrazumijeva punjenje električnog vozila pri snagama koje su nešto veće od snage standardne utičnice u domaćinstvu, ali koja se može obezbijediti bez većih intervencija na tipičnoj kućnoj ili komercijalnoj instalaciji. Ovaj nivo punjenja odgovara Nivou 2 u SAD.

U Evropi, distributivni sistem je u svim djelovima uglavnom trofazni naizmjenični, sa faznim naponom u vrijednosti od 230 V i linijskim naponom od 400 V. Trofazni sistem omogućava dobijanje mnogo veće struje u odnosu na jednofazni, odnosno:

$$P = \sqrt{3} \cdot 400 \cdot 16 \cdot \cos \varphi = 11,085 \text{ kW za } \cos \varphi = 1 \quad (3.4)$$

gdje je:

$\cos \varphi$ faktor snage potrošača.

Ovaj nivo snage omogućava punjenje vozila sa baterijom kapaciteta od 30 kWh za manje od tri sata, što je veliki pomak u odnosu na normalno punjenje. Za slučaj da je nominalna struja utičnice 32 A, moguće je puniti vozilo pri snazi od oko 22 kW, čime bi se obezbijedilo još kraće vrijeme punjenja za isti kapacitet baterije.

Trofazno punjenje, osim što omogućava korišćenje mnogo veće snage prilikom punjenja, je povoljno i za samu mrežu, jer omogućava da se opterećenje ravnomjerno rasporedi na tri faze, za razliku od monofaznog punjenja, koje bi u određenim slučajevima izazvalo nesimetriju u mreži. Važno je naglasiti da je prilikom opredjeljenja za ovu varijantu punjenja potrebno provjeriti da li punjač u vozilu (AC/DC konvertor) ima mogućnost trofaznog punjenja.

3.3.1.3. Brzo punjenje

Za brzo punjenje električnih vozila je potrebno obezbijediti mnogo veći nivo snage punjenja u odnosu na normalno i umjereno-brzo punjenje, pa je samim tim potrebno koristiti specijalnu dodatnu infrastrukturu za punjenje.

Brzo punjenje se može realizovati korišćenjem jednosmjernih ili naizmjeničnih EVSE. U slučaju korišćenja jednosmjerne EVSE, konvertor koji ispravlja naizmjeničnu struju predstavlja dio EVSE, pa je stoga i sama stanica za punjenje mnogo većih dimenzija. Samim tim, snaga punjenja nije ograničena karakteristikama punjača u vozilu, tako da se mogu postići mnogo veće snage punjenja. Sa druge strane, kod naizmjeničnih EVSE, koristi se punjač unutar vozila, tako da su dimanzije stanice za punjenje mnogo manje, ali je zbog toga snaga punjenja ograničena.

Imajući u vidu da se snage kod brzog punjenja kreću do 150 kW kod jednosmjernih, odnosno 43 kW kod naizmjeničnih EVSE, moguće je napuniti električno vozilo sa baterijom velikog kapaciteta za oko pola sata. Prema tome, brzo punjenje omogućava prevazilaženje jednog od osnovnih nedostataka električnih vozila u odnosu na konvencionalna.

Međutim, i pored velike prednosti koje pruža brzo punjenje električnog vozila, ono sa sobom nosi i veliki broj nedostataka:

- visoka cijena infrastrukture za brzo punjenje, naročito u slučaju jednosmjernih EVSE, u poređenju sa umjereno-brzim i normalnim punjenjem.

- potreba za korišćenjem teških kablova, velikog poprečnog presjeka, kako bi se omogućio prenos velikih snaga,
- značajno povećanje opterećenja distributivne mreže, a ukoliko bi se punjenje poklopilo sa vršnim opterećenjem konkretnog dijela sistema, javila bi se potreba za dodatnim ulaganjem u mrežu (izgradnja novih trafostanica, povećanje presjeka vodova distributivne mreže itd.) i
- finalna faza punjenja baterije električnog vozila se mora vršiti pri niskim strujama, što nije moguće obezbijediti prilikom brzog punjenja, tako da bi posljednju fazu punjenja bilo potrebno sprovesti tokom noći [64].

3.3.2. Tipovi konekcije

U skladu sa standardom IEC 61851-1, konekcija između kabla i vozila može biti izvedena na tri načina:

- kabl je trajno vezan za vozilo – Slučaj A,
- kabl se priključuje na vozilo i na EVSE, odnosno nije trajno vezan ni za jedan ni za drugi element – Slučaj B,
- kabl je trajno vezan za EVSE – Slučaj C.

Slučaj A konekcije se najčešće koristi kod malih vozila sa baterijama manjeg kapaciteta. Sa druge strane, Slučaj B se često koristi za normalno i umjereno brzo punjenje, dok se Slučaj C koristi za brzo punjenje, kada je potrebno obezbijediti kabl velikog poprečnog presjeka, tako da vozači ne moraju da nose sa sobom ovakav kabl.

3.3.3. Modovi punjenja

Budući da postoji više tipova infrastrukture različite složenosti koja se koristi za punjenje električnih vozila, definišu se modovi punjenja. Internacionalnim standardom IEC 61851-1 su definisana četiri moda punjenja, koja su predstavljena u sljedećim potpoglavljima.

3.3.3.1. Mod 1

Mod 1 predstavlja najjednostavniji mod punjenja, koji obuhvata punjenje električnog vozila sa standardne utičnice u domaćinstvu, struje 16 A i maksimalnog napona 250 V monofazno, odnosno 480 V trofazno. S obzirom na praktičnost predstavljenog rješenja, navedeni mod punjenja predstavlja najdostupniju i najčešću opciju za punjenje električnog vozila (naravno, u državama u kojima je ovaj mod dozvoljen).

Osnovna mana ovog moda je nepostojanje adekvatne dodatne zaštite tokom punjenja. Naime, sigurnost se obezbjeđuje odgovarajućom zaštitom kućne instalacije (osiguračem, prekidačem, FID sklopkom, itd.) i pravilnim uzemljenjem. U slučaju da zaštita instalacije nije ispravna ili da uzemljenje nije dobro dimenzionisano, kvar prilikom punjenja bi doveo do havarije.

Ukoliko je ugrađena FID sklopka, ovakvi kvarovi bi doveli do isključenja, pa samim tim ne bi bio ugrožen život ljudi u objektu. Međutim, veliki broj starih kuća (instalacija) nema ugrađenu FID sklopku, i korisnici često nijesu u saznanju da li imaju ugrađenu FID sklopku kada stavljaju vozilo da se puni. S tim u vezi, neke države ostavljaju korisnicima mogućnost

da na svoju odgovornost pune pri Modu 1, dok je u većini država u SAD-u ovaj mod punjenja zabranjen.

Aдекватna zaštita prilikom punjenja električnih vozila je važna, jer standardne utičnice dimenzionisane za domaćinstvo možda neće moći da podnesu kontinualni protok maksimalne struje u dužem vremenskom periodu (punjenje bi u ovom slučaju trajalo u prosjeku oko 8 sati).

3.3.3.2. Mod 2

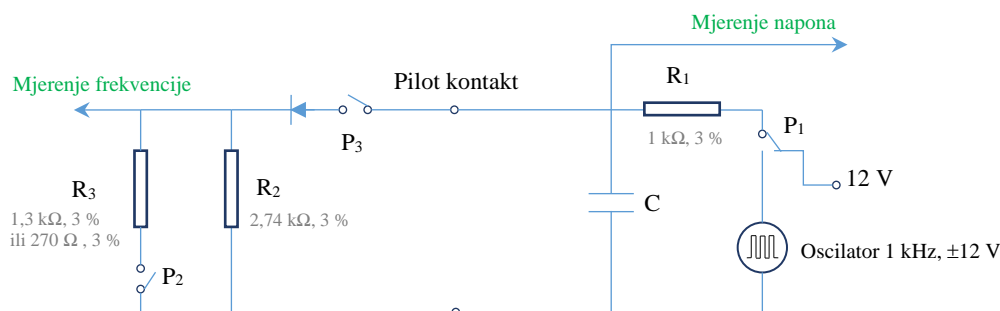
Za razliku od Moda 1, Mod 2 se odnosi na punjenje vozila korišćenjem specijalnog kabla koji sadrži upravljački i zaštitni uređaj (eng. *In-Cable Control and Protection Device* – IC-CPD). Kabl se, kao i u prethodnom modu, priključuje na standardnu utičnicu, pri čemu je u ovom slučaju maksimalna struja 32 A, dok su maksimalne vrijednosti napona identične kao u Modu 1. IC-CPD uređaj vrši funkciju upravljanja i zaštite istovremeno i ima ulogu detekcije diferencijalne struje, tj. poređenja dozvoljene vrijednosti ove struje sa njenom operativnom vrijednošću i otvaranja zaštitnog kola u slučaju da njena vrijednost prekorači dozvoljenu vrijednost.

Mod je uveden u cilju obezbjeđenja zaštite ljudi od napona dodira prilikom punjenja električnih vozila. Mod 2 je prvobitno predstavljao prelazno rješenje za SAD (umjesno Moda 1), ali je počeo da se primjenjuje i u ostatku svijeta zbog većeg nivoa zaštite u odnosu na Mod 1, a opet manje cijene u odnosu na Mod 3 i Mod 4.

Međutim, osnovni nedostatak ovog moda je to što zaštitni uređaj štiti samo kabl i vozilo, dok je element koji je najpodložniji kvaru – utikač – nezaštićen.

3.3.3.3. Mod 3

Mod 3 podrazumijeva korišćenje posebne infrastrukture za punjenje električnog vozila i punjača unutar samog vozila. Dakle, naizmjenična struja preko EVSE dolazi do konvertora u vozilu, gdje se ispravlja i napaja bateriju u vozilu. EVSE obuhvata upravljačke i zaštitne funkcije, koje uključuju potvrdu ispravnog uzemljenja i konekcije između EVSE i vozila. Pored navedenog, EVSE može da kontroliše vrijednost struje punjenja i podesi je na vrijednost ispod maksimalne termički dozvoljene struje kabla. U ovom modu, imajući u vidu da se ne koristi standardna, već posebna oprema za punjenje električnog vozila, maksimalna struja punjenja iznosi 250 A, dok je maksimalna vrijednost napona 250 V, monofazno, odnosno 450 V, trofazno.



Slika 3.3.4 Šema kontrolnog pilota za Mod 3 punjenja

U zavisnosti od statusa prekidača P_1 , P_2 i P_3 , dobijaju se različiti naponi na pilot kontaktu, tačnije, između pilot kontakta i zemlje. Naime, ovo se može iskoristiti za prikazivanje različitih faza punjenja električnog vozila. Prije nego što se električno vozilo priključi na EVSE,

prekidači P_2 i P_3 su otvoreni. U ovom slučaju, napon na pilot kontaktu je 12 V i EVSE ima informaciju da vozilo još uvijek nije priključeno.

Kada se električno vozilo priključi na kabl, dolazi do uključivanja prekidača P_3 , tako da napon na pilot kontaktu opada na vrijednost od oko 9 V. Vrijednost napona 9 V šalje signal EVSE da je vozilo priključeno na kabl, ali ova vrijednost napona za vozilo znači da EVSE nije još uvijek spremna da otpočne punjenje. Tek nakon što se prekidač P_1 prebaci na oscilator, električno vozilo dobija signal da je EVSE spremna za punjenje vozila. Nakon što primi ovaj signal, električno vozilo uključuje prekidač P_2 , tako da napon na pilot kontaktu pada na vrijednost od oko 6 V, odnosno 3 V i šalje signal EVSE da je i vozilo spremno za punjenje. U ovom slučaju napon na pilot kontaktu zavisi od otpornosti otpornika R_3 , koja zavisi od potrebe za uključivanjem ventilatora tokom punjenja. U slučaju da uključivanje ventilatora nije potrebno, vrijednost R_3 je 1,3 k Ω , a napon na pilot kontaktu pada na 6 V. Sa druge strane, u slučaju da je uključivanje ventilatora potrebno, vrijednost R_3 je 270 Ω , tako da napon pada na oko 3 V²².

Na ovaj način se postiže prilično jednostavna komunikacija između EVSE i električnog vozila uz pomoć promjene napona na pilot kontaktu.

Kada se vozilo napuni ili u slučaju da se iz nekog razloga punjenje mora prekinuti ranije, otvara se prekidač P_2 i napon na pilot kontaktu se vraća na vrijednost 9 V, što znači da vozilo više nije spremno za punjenje.

3.3.3.4. Mod 4

Mod 4 obuhvata punjenje električnog vozila preko stanice za punjenje električnog vozila, koja sadrži ispravljač, što znači da se vozilo direktno puni jednosmjernom strujom. U ovom modu, za razliku od prethodnih, napon može dostići i do 600 V, a maksimalna struja do 400 A. Naravno, veći nivoi struje i napona zahtijevaju i mnogo ozbiljniji sistem zaštite i komunikacije u odnosu na prethodne modove punjenja.

Potrebno je naglasiti da je u ovom slučaju samo moguć tip C konekcije kabla za punjenje, gdje je kabl trajno vezan za stanicu za punjenje.

3.3.4. Standardi za punjenje električnih vozila (EVSE)

U Evropi, oprema za punjenje električnih vozila i konvertori prilikom svog rada moraju zadovoljiti sljedeće standarde [65]:

- IEC/EN 61851-1, opšti zahtjevi,
- IEC/EN 61851-21, zahtjevi za povezivanje električnog vozila na ESVE,
- IEC/EN 61851-22, naizmjenična EVSE,
- IEC/EN 61851-23, jednosmjerna EVSE,
- IEC/EN 61851-24, komunikacioni protokol,
- IEC/EN 62196-1, IEC 62196-2 i IEC 62196-3, utikači, utičnice i kabl,
- IEC 61000, EN 55011 i EN 55022, elektromagnetska kompatibilnost i
- IEC 60950, sigurnost IT opereme.

²² <https://www.allaboutcircuits.com/technical-articles/four-ev-charging-modes-iec61851-standard/>

Dodatno, kako oprema za punjenje može biti izložena različitim ekstremnim uslovima rada, kao što su visoke temperature, vibracije, prašina itd, ona mora zadovoljiti dodatne uslove: -40°C do 105°C ambijentalna temperatura, -40°C do 70°C temperatura tečnog rashlađivača, IP6K9K i IP6K7 klasa zaštite.

3.3.5. Topologije AC/DC konvertora

Konvertori, bez obzira na tip (AC/DC, AC/AC, DC/AC), funkcionišu na principu sekvenci upravljačkih impulsa, koji dovode do učestalog uključivanja i isključivanja prekidačkih elemenata. Samim tim, konvertori izazivaju izobličenje struje koja se preuzima iz mreže, odnosno do pojave viših harmonika u ulaznoj struji. Viši harmonici utiču na talasni oblik i karakteristike ulazne struje ili napona. Ovaj efekat nelinearnog potrošača rezultira „zaprljanjem“ mreže, što negativno utiče na funkcionisanje ostalih potrošača [66].

Faktor snage se definiše preko sljedeće formule:

$$\cos \varphi = \frac{P}{S} \quad (3.5)$$

gdje je $\cos \varphi$ faktor snage potrošača, P aktivna snaga, a S prividna snaga, a može se prikazati i kao proizvod faktora distorzije i faktora pomjeraja:

$$\cos \varphi = K_d \cdot K_\theta \quad (3.6)$$

gdje je K_d faktor distorzije, a K_θ faktor pomjeraja.

Faktor distorzije, koji predstavlja količnik efektivnih vrijednosti osnovne i ukupne ulazne struje, ima za cilj da kvantifikuje nivo izobličenja strujnog talasa. Međutim, imajući u vidu da ovaj faktor predstavlja prosti količnik efektivnih vrijednosti struja, njegova vrijednost je bliska jedinici i za izrazito izobličene talase. Stoga, u cilju boljeg prikazivanja nivoa prisustva viših harmonika mnogo češće se koristi totalna harmonijska distorzija (eng. *Total Harmonic Distortion* – THD).

$$THD = \sqrt{\frac{I_{2ef}^2 + I_{3ef}^2 + I_{4ef}^2 + \dots + I_{nef}^2}{I_{1ef}^2}} \quad (3.7)$$

gdje je I_{1ef} efektivna vrijednost osnovnog harmonika ulazne struje, a I_{kef} za $k = 2, 3, \dots, n$ efektivna vrijednost k -tog harmonika ulazne struje.

Drugim riječima, THD faktor predstavlja korijen odnosa zbira kvadrata efektivnih vrijednosti svih viših harmonijskih komponenti ulazne struje i kvadrata efektivne vrijednosti fundamentalne komponente struje. Standardima IEC 61000-4-7 i IEC 61000-4-30 je definisan način mjerenja sadržaja viših harmonika u ulaznoj struji ili naponu.

Važno je naglasiti da velika vrijednost faktora harmonijskog izobličenja struje može dovesti do neispravnog rada potrošača, kao i nekih važnih elemenata elektroenergetskog sistema (npr. može doći do prekomjernog zagrijavanja energetskog transformatora, čime se skraćuje njegov životni vijek), ili u najgorem slučaju do trajnog kvara na uređaju. Pored navedenog, ukoliko mreža na mjestu priključenja potrošača nije dovoljno jaka, visok stepen harmonijskog izobličenja struje dovodi do visokog stepena harmonijskog izobličenja napona [67]. Prema tome, i korisnici i operatori sistema moraju da održavaju vrijednost THD faktora

struje i napona u dozvoljenim granicama. Standardom EN 50160 je definisana dozvoljena totalna harmonijska distorzija napona u vrijednosti od 8 %, dok je standardom IEC 61000-3-2 definisan nivo harmonijske distorzije koji uređaji naznačene struje do 16 A mogu da emituju, a standardom IEC 61000-3-12 uređaji struje do 75 A.

Da bi se izbjeglo „zaprljanje mreže“, odnosno, da bi se smanjila koncentracija neželjenih viših harmonika struje, potrebno je koristiti odgovarajuće elemente za korekciju faktora snage (eng. *Power Factor Correction* – PFC). Ovi elementi, u zavisnosti od složenosti kola, se dijele na:

- pasivne elemente za korekciju faktora snage (filtri) i
- aktivne elemente za korekciju faktora snage (aktivna kola).

Cilj elemenata sa korekcijom faktora snage je da transformišu talasni oblik ulazne struje na način da bude što bliži sinusoidalnom obliku napona, smanjujući zaprljanje mreže i poboljšavajući faktor snage potrošača.

Filtri predstavljaju najjednostavniju vrstu elemenata za korekciju faktora snage. Dakle, na samom ulazu u element (koji stvara više harmonike) postavlja se AC filter čija je funkcija da koriguje nisku vrijednost faktora snage. Osnovne prednosti ovih elemenata su velika jednostavnost, niska cijena i robustnost. Međutim, njima se ne može postići efikasno smanjenje harmonijske distorzije, pa stoga nisu povoljni za primjenu kod većih nivoa snaga (maksimalno do 100 W). Takođe, zbog niske vrijednosti učestanosti mrežnog napona, za postizanje željene vrijednosti THD faktora bi se morali koristiti kondenzatori i kalemovi velikih dimenzija.

Aktivni elementi za korekciju faktora snage sadrže konvertore sa odgovarajućim upravljačkim kolom. Upravljačko kolo mjeri talasne oblike ulaznog napona i struje, tako da se generisanjem odgovarajućih upravljačkih impulsa postiče da struja bude u fazi sa naponom. Ovim se omogućava automatska korekcija faktora snage, odnosno, teorijski faktor snage preko 0,95. Aktivni elementi za korekciju faktora snage, za razliku od pasivnih elemenata, se mogu koristiti za širok dijapazon ulaznih napona. Takođe, oni efikasno smanjuju vrijednost harmonijske distorzije ulazne struje, pa se mogu primijenjivati za veće nivoe snage (preko 100 W).

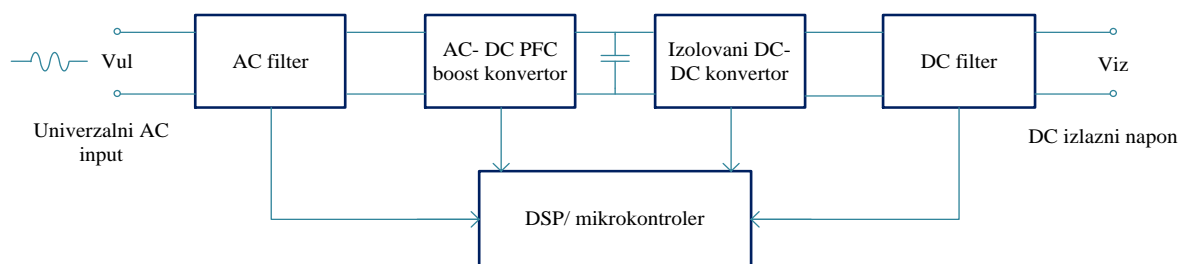
S tim u vezi, u cilju ograničenja nivoa izobličenja ulaznog strujnog talasa i regulacije izlaznog napona u električnim vozilima se koriste ispravljači sa korekcijom faktora snage, koji omogućavaju da se postigne faktor snage blizak jedinici.

Ispravljač sa korekcijom faktora snage predstavlja ključni element koji omogućava prenos električne energije od mreže do vozila. U principu, ispravljači se mogu podijeliti na:

- jednostepene i
- dvostepene ispravljače.

Jednostepeni ispravljač je pogodan za korišćenje kod sistema manje snage sa olovno-kisjelinskim baterijama. Budući da se u električnim vozilima najčešće koriste litijum-jonske baterije velikog kapaciteta, njihovo punjenje se vrši primjenom dvostepenih ispravljača.

Na slici 3.3.5 je prikazana blok šema dvostepenog ispravljača. Dvostepeni ispravljač sadrži ispravljač sa korekcijom faktora snage, koji ima ulogu da ispravi ulaznu struju, i čoper (DC/DC konvertor), koji prilagođava nivo napona na izlazu zahtjevima baterije. Dvostepeni ispravljači se najčešće koriste kod sistema veće snage i pogodni su za punjenje litijum-jonske baterije.



Slika 3.3.5 Blok šema dvostepenog ispravljača

Generalno govoreći, izvedbe ispravljača sa korekcijom faktora snage se mogu razlikovati u odnosu na faktore prikazane u sljedećoj tabeli.

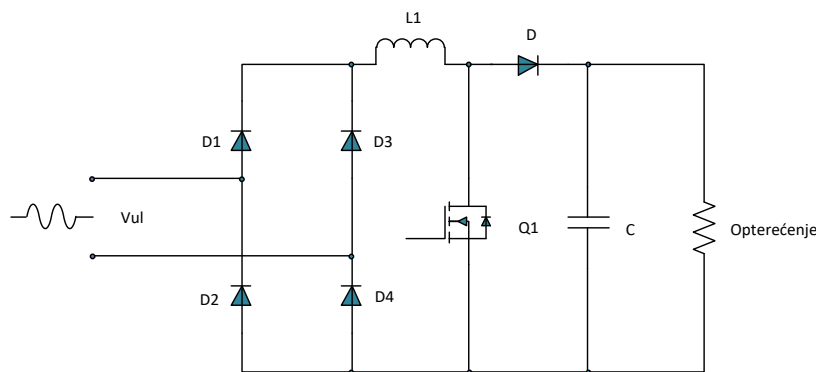
Tabela 3.3.1 Vrste ispravljača sa korekcijom faktora snage

Faktori	Tipovi ispravljača
Smjer tokova snaga	jednosmjerni ili dvosmjerni
Tip konvertora	galvanski izolovan ili neizolovan
Tip izlaznog napona	konstantni ili varijabilni
Totalni broj kvadranta	jedan, dva ili četiri
Osnova DC izlaza	<i>buck</i> , <i>boost</i> ili <i>buck-bust</i>
Tipovi opterećenja	nelinearni, linearni

Kao što je navedeno u potpoglavlju 3.3.1, različiti nivoi punjenja zahtijevaju različite nivoe snaga konvertora. U odnosu na snagu, konvertori se mogu podijeliti na monofazne i trofazne konvertore.

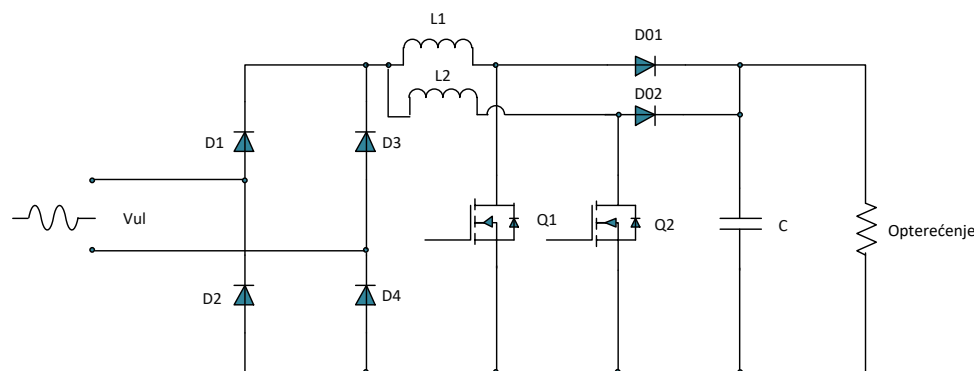
3.3.5.1. Monofazne topologije

U cilju postizanja korekcije faktora snage, implementiran je veliki broj topologija PFC ispravljača. Najpopularnija i najjednostavnija topologija PFC ispravljača je **konvencionalni boost konvertor sa korekcijom faktora snage** (slika 3.3.6). Ova topologija predstavlja kombinaciju diodnog mosta, koji ispravlja ulazni napon, i standardne *boost* sekcije, koja služi da dobijeni jednosmjerni napon prilagodi bateriji. Veliki nedostatak navedene topologije su izraženi gubici u diodnom mostu za veće nivoe snage, i velika pulsacija struje kroz kondenzator, koja predstavlja razliku struje diode i izlazne jednosmjerne struje kojom se napaja baterija. Visok nivo gubitaka dovodi do zagrijavanja diodnog mosta, pa samim tim dolazi do degradacije njegove efikasnosti. Takođe, za prenos velikih snaga je potrebno koristiti kalem velikih dimenzija. Stoga, ova topologija ima ograničenu primjenu (za sisteme snage ispod 1 kW).



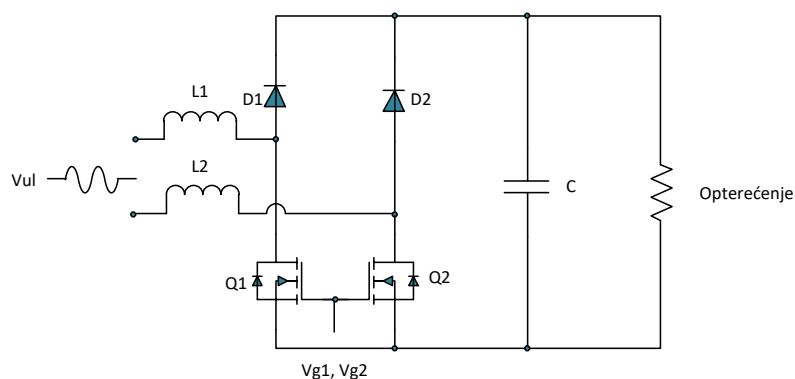
Slika 3.3.6 Konvencionalni boost konvertor sa korekcijom faktora snage

Smanjenje pulsacije ulazne struje se može postići primjenom **interleaved boost konvertora sa korekcijom faktora snage** (slika 3.3.7). Ova topologija sadrži diodni most i dvije paralelno vezane boost sekcije, čiji su upravljački signali fazno pomjereni za 180° . Pomjeranjem pulsacija struja kroz kalemove za 180° se postižu mnogo manje pulsacije ulazne struje u odnosu na konvencionalni *boost konvertor*. Na ovaj način dolazi do smanjenja emitovanja elektromagnetskih smetnji, kao i smanjenja naponskog naprezanja kondenzatora na izlazu iz konvertora. Dodatno, budući da je ulazna struja podijeljena na dvije prekidačke *boost* sekcije, značajno se smanjuje naprezanje pojedinačnih prekidačkih komponenti.



Slika 3.3.7 Interleaved boost konvertor sa korekcijom faktora snage

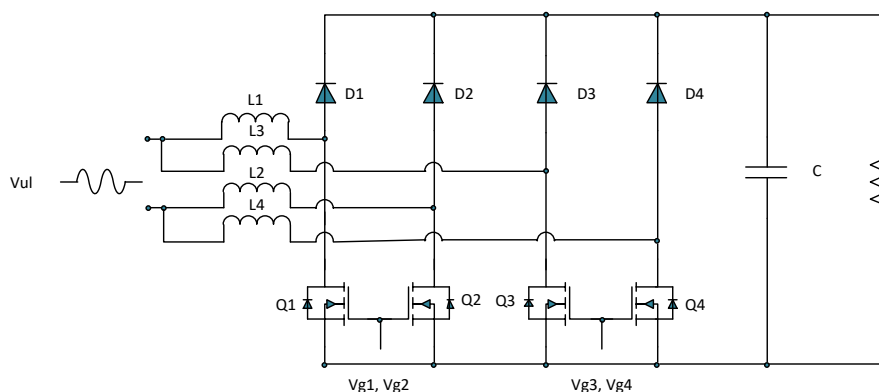
Imajući u vidu nedostatke prethodno navedene topologije, **bezmosni boost konvertor sa korekcijom faktora snage** (slika 3.3.8) predstavlja unaprijeđenu verziju konvencionalnog *boost* konvertora. Ova topologija sadrži dva n kanalna MOSFET-a na čije gejtove se dovodi isti signal. Ovim konvertorom se izbjegava korišćenje ulaznog diodnog mosta, ali je zadržana klasična *boost* PFC topologija. Jasno je da se ovom topologijom eliminišu povećani gubici koji nastaju u diodnom mostu, tako da se bezmosni boost konvertor sa korekcijom faktora snage može koristiti u sistemima koji zahtijevaju snage konverzije preko 1 kW. Međutim, ova topologija izaziva elektromagnetne smetnje zbog kalemova koji se koriste na ulazu.



Slika 3.3.8 Bezmosni boost konvertor sa korekcijom faktora snage

Na kraju, **bezmosnim interleaved topologijom sa korekcijom faktora snage** se postiže mnogo veća efikasnost u odnosu na prethodno predstavljene monofazne topologije. Ova topologija predstavlja kombinaciju *interleaved* boost PFC konvertora i bezmosnog PFC konvertora. U odnosu na interleaved konvertor koji sadrži diodni most, ova topologija uvodi dva dodatna MOSFET-a, a četiri spore diode iz diodnog mosta su zamijenjene dvijema brzim diodama. Gejt ulazi MOSFET-ova Q1 i Q2 su povezani, i na njih se dovodi gejt signal koji je pomjeren za 180° u odnosu na gejt signal koji se dovodi na MOSFET-ove Q3 i Q4, koji su takođe povezani. Na ovaj način se postiže da se pulsacije ulazne struje, koja predstavlja zbir struja iz kalemova, značajno smanje, pošto su pulsacije struja iz kalemova suprotno orjentisane pa se međusobno poništavaju. Dodatno, kako su gejt signali pomjereni za 180° , udvostručava se prekidačka učestanost i na taj način se postiže mnogo manja pulsacija ulazne struje.

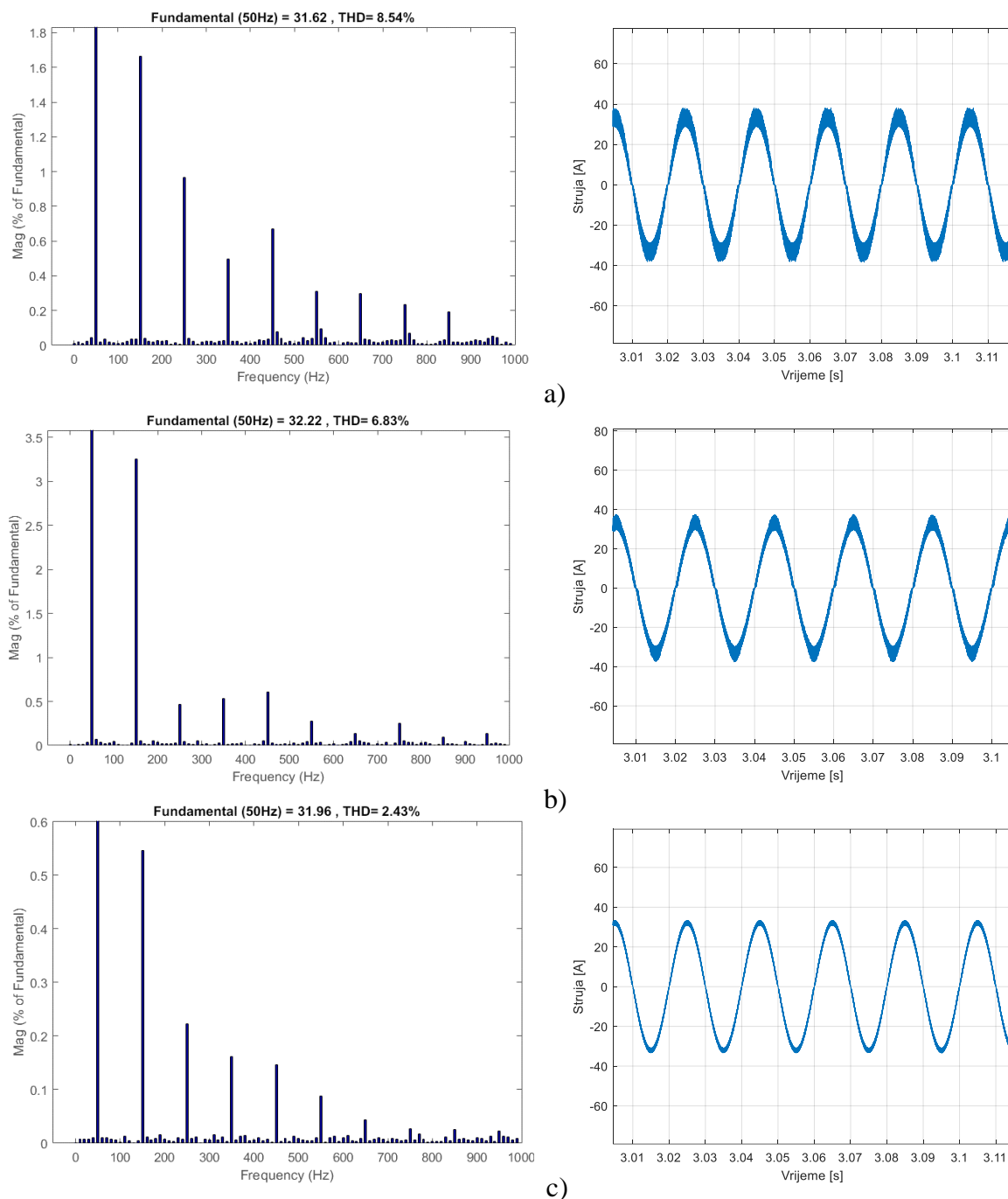
Ovu topologiju karakteriše velika efikasnost, ulazni faktor snage blizak jedinici i niski sadržaj viših harmonika u ulaznoj struji. Samim tim, ova topologija je pogodna za primjenu kod sistema snage iznad 3,5 kW i može se koristiti kod normalnog punjenja [68].



Slika 3.3.9 Bezmosni interleaved konvertor sa korekcijom faktora snage

3.3.5.1.1 Poređenje nivoa izobličenja ulazne struje različitih monofaznih konvertora

U cilju poređenja nivoa izobličenja ulazne struje koje nastaje usljed primjene konvencionalnog, *interleaved* i bezmosnog *interleaved boost* konvertora sa korekcijom faktora snage, na slici 3.3.10 su prikazani rezultati simulacije punjenja baterije električnog vozila napona 400 V pri snazi 3,5 kW i čisto sinusoidalnom naponu na ulazu od 230 V primjenom navedenih konvertora. Simulacije su sprovedene u programskom paketu Matlab Simulink 2016.



Slika 3.3.10 (a) THD faktor i talasni oblik struje konvencionalnog boost konvertora, (b) THD faktor i talasni oblik struje interleaved boost konvertora, (c) THD faktor i talasni oblik struje bezmosnog interleaved boost konvertora

Za iste ulazne podatke, konvencionalni *boost* konvertor daje najgore rezultate, odnosno najveću vrijednost THD faktora – 8,54 %. Naizmjeničnim radom dvije *boost* sekcije postiže se manje izobličenje ulazne struje, što je demonstrirano nešto nižom vrijednošću THD faktora *interleaved boost* konvertora (6,83 %). Na kraju, primjenom bezmosnog *interleaved boost* konvertora, sa četiri *boost* sekcije, dobija se najniža vrijednost THD faktora (2,43 %) čime se on ističe u odnosu na ostala dva tipa konvertora. Dodatno, posmatrajući talasne oblike ulazne struje, najizraženije harmonijsko izobličenje se javlja kod konvencionalnog konvertora, što je prikazano oscilacijama kod „trbuha“ sinusoide. Sa druge strane, struja kod bezmosnog

interleaved boost konvertora je gotovo idealna sinusoida, sa jako malim izobličenjima. Prema tome, od sva tri posmatrana monofazna konvertora, *interleaved bezmosni boost* konvertor sa korekcijom faktora snage predstavlja najbolju opciju za primjenu kod električnih vozila.

3.3.5.2. Trofazne topologije

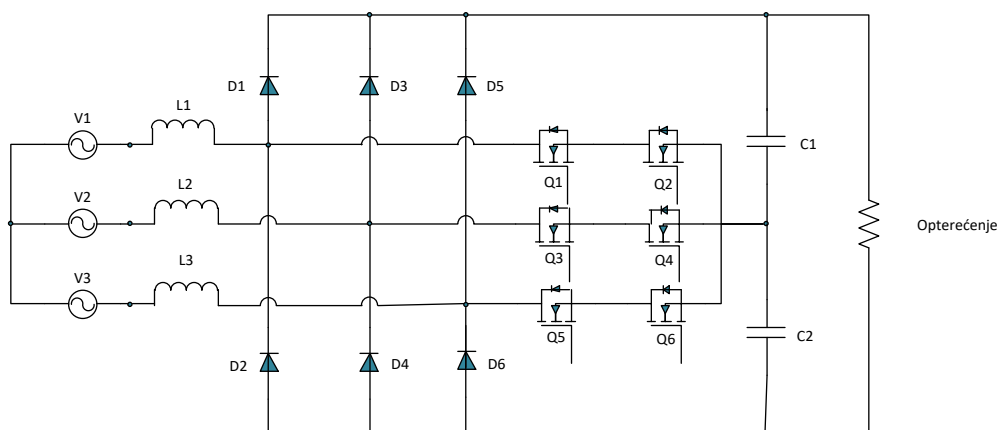
Veći nivoi snage punjenja se postižu trofaznim napajanjem iz mreže, pa je samim tim potrebno koristiti trofazne ispravljače sa korekcijom faktora snage. Budući da je ovdje riječ o velikim snagama prenosa, jedan od najvažnijih zahtjeva koji se uzima u obzir prilikom odabira trofazne topologije jeste velika efikasnost. Generalno govoreći, trofazne topologije mogu biti izvedene na dva načina koja se međusobno razlikuju prema nivou složenosti izvedbe i broju komponenti, i to kao:

1. Tri monofazna konvertora;
2. Jedan trofazni konvertor.

Ulazni napon u pojedinačni monofazni konvertor može biti ili fazni (između faze i neutralnog provodnika) ili linijski napon (između dvije faze). U principu, ovo rješenje predstavlja „utrostručene“ monofazne konvertore, gdje su pojedinačni zahtjevi i podsistemi za svaki od konvertora isti kao i kod monofazne topologije. S tim u vezi, ovo rješenje karakteriše veća jednostavnost i efikasnost u odnosu na jedinstvenu trofaznu topologiju. Dodatno, kako svaka faza ima posebni konvertor, elektronski elementi nisu izloženi visokim vrijednostima struje, pa su i zahtjevi za filtriranjem manji. Samim tim, mogu se koristiti manje komponente u pojedinačnim konvertorima. Takođe, modularna topologija smanjuje stresiranje upravljačkih elemenata, omogućavajući da se koriste jednostavniji i jeftiniji kontroleri. Međutim, ovo rješenje zahtijeva mnogo veći broj elemenata i podсистema u odnosu na jedinstveni trofazni konvertor.

Sa druge strane, jedinstveni trofazni konvertor sadrži mnogo manji broj komponenti u odnosu na rješenje sa tri monofazna konvertora. Međutim, elementi ovog konvertora su izloženi većim vrijednostima struja, zbog čega se moraju koristiti veće i robustnije komponente. Takođe, njega karakteriše mnogo veća kompleksnost u pogledu upravljanja (upravljačkog algoritma), što iziskuje primjenu složenijih kontrolera. Izlazni napon iz ovih konvertora je reda 700 V, zbog čega se zahtijeva ili primjena čopera koji mogu raditi pod visokim naponom, ili korišćenje redno vezanih čopera, kako bi se smanjilo naprezanje pojedinačnih komponenti. Najpopularnije topologije trofaznih konvertora sa korekcijom faktora snage u primjeni su trofazni *Totem-pole* i *Vienna* konvertor sa korekcijom faktora snage.

Vienna ispravljač naišao na mnogo širu primjenu u posljednjih nekoliko godina [69]. Ovaj konvertor (slika 3.3.12) karakteriše velika efikasnost (98 % i više), nizak nivo totalne harmonijske distorzije (ispod 2 %) i veća gustina snage. Ova topologija se ističe zbog rada u kontinualnom režimu (eng. *Continuous Conduction Mode* – CCM), istovremenog trokratnog prekidanja i manjeg naponskog naprezanja komponenti. Istovremeno trokratno prekidanje omogućava raspodjelu struje koja prolazi kroz pojedinačne komponente, čime se dozvoljava upotreba kalemova manjih dimenzija. Ovim se duplo smanjuje naponsko naprezanje elemenata konvertora i postiže veća efikasnost konverzije [70].



Slika 3.3.11 Vienna ispravljač sa korekcijom faktora snage i impulsno-širinskom modulacijom

Tradicionalno, za upravljanje Vienna ispravljačem su se koristili histerezisni kontroleri. Međutim, kako ove kontrolere karakteriše velika složenost dizajna, u skorije vrijeme se mnogo češće primjenjuju kontroleri bazirani na srednjoj vrijednosti struje. Iako se kod ovih kontrolera mnogu javiti problemi prilikom implementacije zbog potrebe za izvođenjem dvije kontrolne petlje, logika upravljanja je mnogo jednostavnija nego u slučaju korišćenja kontrolera na bazi histerezisa. Početak primjene jednostavnih kontrolera je bio okidač za ubrzano korišćenje ove topologije u industrijskim procesima.

3.3.6. Čoperi

Generalno govoreći, čoperi mogu biti izvedeni kao neizolovani ili izolovani, sa tokom snage u jednom (eng. *unidirectional*), odnosno dva (eng. *bidirectional*) smjera.

Neizolovani čoperi, kako im i samo ime kaže, predstavljaju DC/DC konvertore koji galvanski povezuju naponski izvor i opterećenje. Imajući u vidu da se na ovaj način ne obezbjeđuje zaštita opterećenja od kvarova na napojnoj strani, i pored velikog broja prednosti (niska cijena, velika efikasnost, mali broj komponenti), ovi čoperi su našli primjenu samo kod sistema male snage.

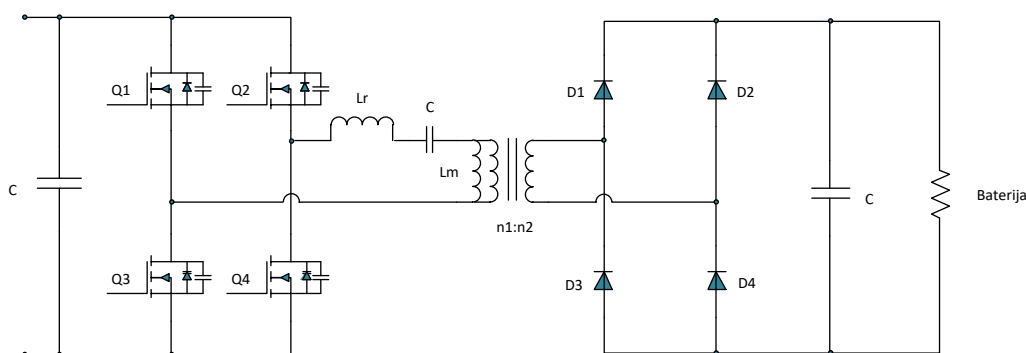
Sa druge strane, izolovani čoperi obezbjeđuju galvansku izolovanost primarnog i sekundarnog kola (odnosno izvora i opterećenja) i na taj način štite opterećenje od kvarova na strani izvora i obrnuto. U odnosu na neizlovene konvertore, ovi čoperi sadrže veći broj komponenti i pogodni su za primjenu kod sistema velikih snaga. Postojanje transformatora, iako povećava cijenu i gubitke u ovom konvertoru, obezbjeđuje dodatnu opciju za regulaciju izlaznog napona, jer se odabirom njegovog prenosnog odnosa može uticati na postizanje željene vrijednosti napona na izlazu iz čopera [71].

Prilikom odabira topologije čopera koji se može primijenjivati unutar punjača električnog vozila, moraju biti zadovoljeni sljedeći zahtjevi:

- galvanska izolovanost,
- rad pri većim snagama prenosa,
- velika efikasnost (preko 95 %),
- mali nivo elektromagnetskih smetnji,
- male pulsacije izlaznog napona i struje (da bi se izbjeglo pregrijavanje baterije, a samim tim i smanjenje njenog životnog vijeka) i

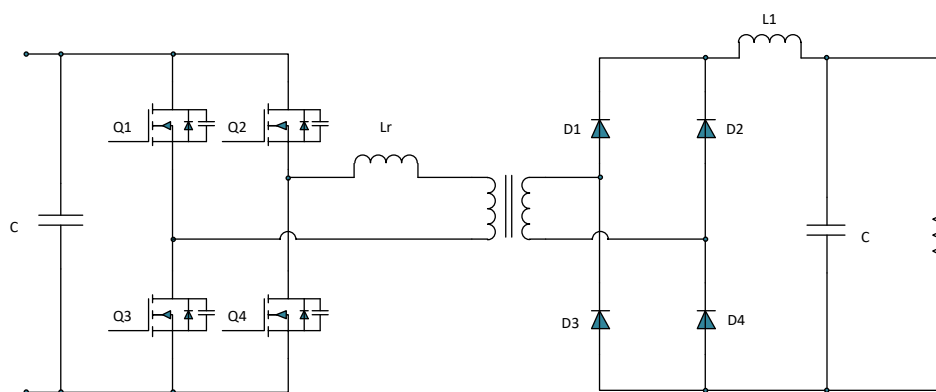
- što manja cijena.

Jedna od topologija čopera koja ima sve veću primjenu kod električnih vozila je **rezonantni LLC (kalem-kalem-kondenzator) konvertor**. Zahvaljujući sposobnosti da održava izlazni napon na konstantnoj vrijednosti u trenucima kada ulazni napon prolazi kroz nulu, ova topologija je prvobitno našla široku primjenu u telekomunikacionoj industriji. Međutim, sposobnost prekidanja pri nultoj struji i naponu omogućila je njihovu primjenu i u punjačima za električna vozila u skorije vrijeme. Rezonantni LLC konvertor može biti izveden ili kao polumosni ili kao punomosni, pri čemu je primjena punomosnog konvertora pogodnija za sisteme većih snaga (smanjuje naprezanje komponenti i primjenom punomosnih konvertora se postiže bolje iskorišćenje magnetskog jezgra).



Slika 3.3.12 Punomosni rezonantni LLC konvertor

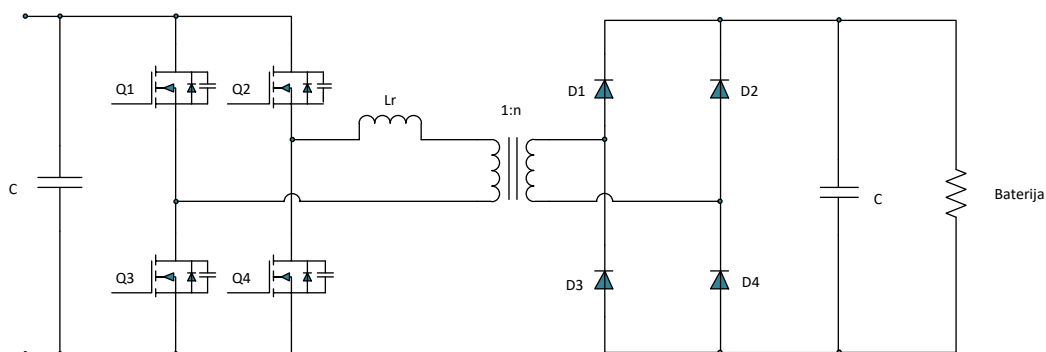
Punomosni konvertori sa faznim pomjerajem i sa prekidanjem pri nultom naponu (eng. *Zero-Voltage Switch – ZVS*) se primjenjuju kod sistema velikih snaga sa visokom vrijednošću ulaznog napona. Prekidanje pri nultom naponu kod ovih konvertora se postiže uz pomoć rasipne induktivnosti. Međutim, glavni nedostatak ove topologije je ograničeni ZVS opseg, povećani gubici na primaru transformatora i izraženi visokonaponski šumovi na izlaznoj sekundarnoj strani transformatora.



Slika 3.3.13 Punomosni konvertor sa faznim pomjerajem i sa prekidanjem pri nultom naponu

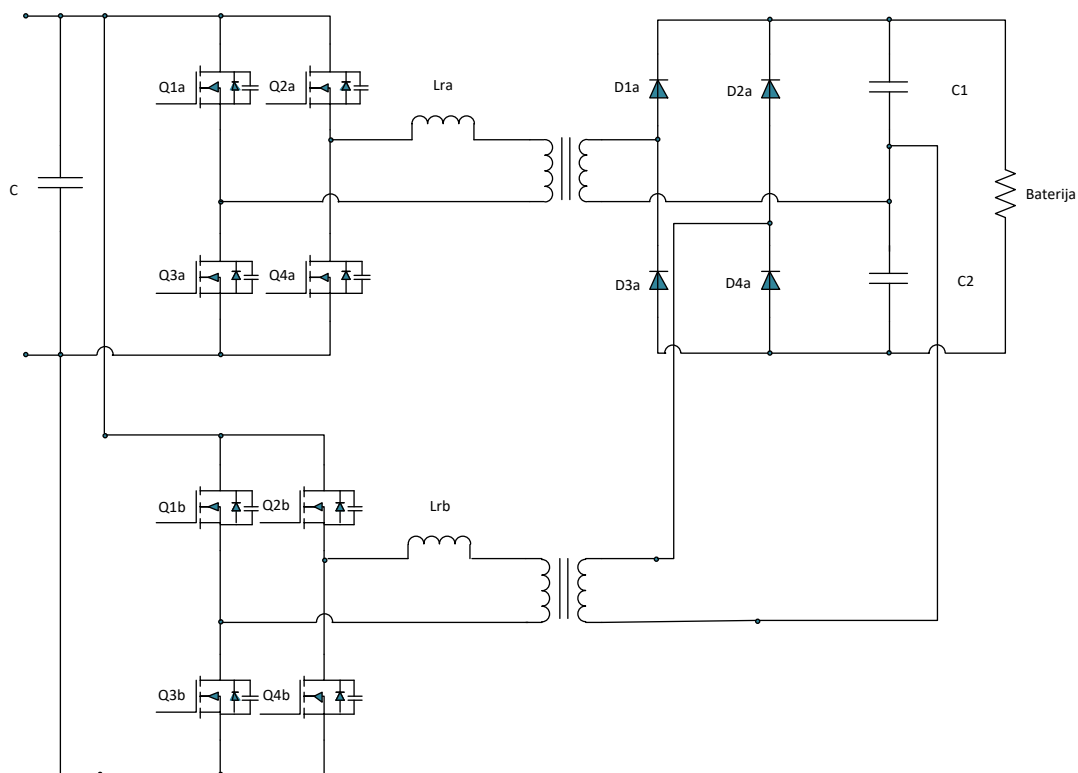
Smanjenje oscilacija napona na sekundaru transformatora se može postići primjenom **punomosnog konvertora sa izlaznim kapacitivnim filterom**. Punomosni inverter sa MOSFET-ovima Q1, Q2, Q3 i Q4 se nalazi sa primarne strane transformatora, pri čemu se prekidačima Q1 i Q2 upravlja korišćenjem impulsno-širinske modulacije, dok Q3 i Q4 rade sa faktorom popunjenosti 50 %. Ovaj konvertor može da radi u graničnom (eng. *Boundary*

Conduction Mode – BCM) i diskontinualnom režimu (eng. *Discontinuous Conduction Mode – DCM*).



Slika 3.3.14 Punomosni konveror sa izlaznim kapacitivnim filterom

Nedostatak navedenih topologija koji se ogleda u velikim pulsacijama struje kondenzatora se može ublažiti primjenom *interleaved* čopera. U principu, *interleaved* topologija obuhvata dva paralelno vezana konvertora, čiji su upravljački signali fazno pomjereni za 180° , gdje se ukupna ulazna snaga ravnomjerno raspodjeljuje na dvije sekcije i samim tim se smanjuje naponsko naprezanje komponenti. **Interleaved konvertor sa udvostručavanjem napona i prekidanjem pri nultom naponu** (slika 3.3.15), omogućava postizanje smanjenja naponskog naprezanja kondenzatora na izlazu uz značajno manji broj komponenti. Redukcija broja potrebnih komponenti je postignuta dodavanjem još jednog izlaznog kondenzatora. Ovaj konvertor može da radi u diskontinualnom i graničnom režimu rada. Dodatno, i kontinualni režim rada je moguć, iako se zbog povećanog naprezanja komponenti on ne preporučuje.



Slika 3.3.15 Interleaved konvertor sa udvostručavanjem napona i prekidanjem pri nultom naponu

3.3.7. Pametno punjenje električnih vozila i koncept injektiranja energije iz vozila u mrežu

Kako je očekivano da se usljed punjenja električnih vozila značajno poveća opterećenje postojećeg distributivnog sistema, i to u različitim trenucima i na različitim lokacijama, javila se neophodnost razvoja strategija pametnog punjenja električnih vozila. Značaj i prednosti pametnog punjenja se naročito ističu za predviđenu ogromnu penetraciju električnih vozila, kada bi nekontrolisano punjenje dovelo do ozbiljnih problema u mreži.

Iako stvaraju dodatno opterećenje za sistem, veliki broj istraživanja je pokazao da električna vozila mogu predstavljati veoma važan element u distributivnom sistemu, čijim se optimalnim upravljanjem (u pogledu punjenja i injektiranja u mrežu) mogu postići značajni benefiti. Usluge koje bi vozilo moglo da pruži elektroenergetskom sistemu obuhvataju injektiranje uskladištene električne energije iz vozila u mrežu u periodu vršnog opterećenja (kada je cijena na tržištu visoka) – V2G, učešće u regulaciji frekvencije i napona, skladištenje električne energije iz intermitentnih obnovljivih izvora, smanjenje gubitaka u distributivnom sistemu itd. Međutim, jasno je da razvoj koncepta pametne mreže, koji obuhvata primjenu dvostrane komunikacije, naprednog sistema mjerenja, senzora, centralizovanih i distribuiranih upravljačkih jedinica (Potpoglavlje 2.6.3), predstavlja preduslov za efikasno korišćenje systemske vrijednosti električnih vozila i implementaciju algoritama pametnog punjenja i injektiranja energije iz vozila u mrežu [72].

Generalno govoreći, pametno punjenje obuhvata definisanje nivoa snage punjenja električnih vozila u određenim vremenskim intervalima primjenom odgovarajućeg kontrolnog sistema, dok V2G predstavlja pametno punjenje sa mogućnošću dvostranog toka električne energije, u kojem, pored punjenja, dolazi i do injektiranja uskladištene električne energije iz baterije vozila u mrežu, takođe u skladu sa željenim ciljem optimizacije. V2G predstavlja relativno novu tehnologiju koja „povećava vrijednost“ električnog vozila u elektroenergetskom sistemu. U odnosu na koncept pametnog punjenja, za implementaciju V2G je potrebno obezbijediti dodatne komponente [73].

Da bi električno vozilo bilo „kvalifikovano“ da učestvuje u ovom sistemu, potrebno je obezbijediti punjač sa dvosmjernim tokom energije i dodatni komunikacioni modul. Već je napomenuto u Potpoglavlju 3.3.1 da u zavisnosti od nivoa punjenja, može se koristiti ili punjač u vozilu (naizmjenični sistem: normalno, umjereno-brzo i brzo punjenje) ili punjač u stanici za punjenje (jednosmjerni sistem: brzo punjenje), pa se, generalno govoreći, samim tim V2G može realizovati i za normalno, i za umjereno-brzo i za brzo punjenje. Međutim, umjereno-brzo punjenje ima najveći potencijal u ovom pogledu, zbog balansa snage punjenja i pražnjenja i cijene ugradnje stanica za punjenje ovog nivoa u kućama ili na poslovnim parkinzima. Dodatno, injektiranje u mrežu preko brzih punionica bi se moglo ostvarivati i na javnim parkinzima, gdje je broj električnih vozila koja borave duže vrijeme na jednom mjestu jako veliki, naročito kako cijena brzih punionica bude opadala.

Kada je u pitanju unapređenje komunikacione infrastrukture vozila, osim osnovne komunikacije koja postoji sa EVSE prilikom punjenja, potrebno je obezbijediti dodatni komunikacioni modul, koji bi mogao da kontroliše punjenje i pražnjenje vozila u zavisnosti od signala dobijenog iz mreže. S tim u vezi, u vozilo se ugrađuju komunikacioni čipovi poput VSL (eng. *Vehicle Smart Link*), dok se komunikacija sa mrežom ostvaruje korišćenjem nekog od komunikacionih protokola.

Pored obezbjeđivanja punjača sa dvosmjernim konvertorom i komunikacionog sistema, važno je definisati učesnika koji će vozilu da šalje upravljački signal (ovaj stepen je zajednički i za pametno punjenje). U slučajevima kada broj električnih vozila na određenom području nije veliki, ovu funkciju bi mogao da obavlja i ODS. Međutim, imajući u vidu da se očekuje sve veća penetracija ovog tipa vozila, uloga lokalizovanih jedinica koje bi koordinisale odziv električnih vozila na signale iz mreže (bilo ekonomske ili tehničke) dobija sve više na značaju. U principu, agregator bi primljeni signal od ODS-a, prosljeđivao električnim vozilima koji pripadaju njegovoj oblasti (ili sa kojima ima sklopljen ugovor). Imajući u vidu da se primarna funkcija električnih vozila ne odnosi na pružanje usluga distributivnom sistemu, agregator mora uzeti u obzir da će u određenom trenutku samo dio vozila biti parkiran i priključen na mrežu, pa će samim tim i odziv vozila i mogućnost pružanja određene usluge biti manja.

Značaj i benefiti koje donosi agregator za električna vozila, odnosno distribuirane resurse je ogroman. Naime, budući da tržišta za pomoćne i balansne usluge uglavnom imaju definisanu minimalnu snagu učešća (donja granica je obično 1 MW), a kako je snaga injektiranja električnog vozila ograničena punjačem, učešće pojedinačnog električnog vozila na takvim tržištima je gotovo nemoguće. Uzimajući u obzir snagu umjereno-brzog punjenja, od kojeg se očekuje da bude najčešće zastupljeni tip punjenja za V2G (do 22 kW), bilo bi potrebno koordinisati injektiranje najmanje 45 vozila kako bi se stvorila mogućnost za učešće ovih vozila na tržištu. Sa druge strane, čak ako bi se obezbijedilo učešće vozila posredstvom brzih punionica snage i do 150 kW, pojedinačno vozilo ne bi moglo da samostalno učestvuje na tržištu, već bi bilo potrebno obezbijediti injektiranje još najmanje 7 vozila pri istoj snazi. Međutim, agregator bi mogao, u slučaju da sklopi ugovor sa više vlasnika električnih vozila, u njihovo ime da daje ponude na tržištu i na taj način obezbijedi prevazilaženje barijere za učešće malih, distribuiranih resursa na tržištu. Prema tome, može se izvesti zaključak da će agregatori igrati ključnu ulogu u stvaranju uslova da električna vozila pružaju usluge operatorima sistema i u omogućavanju njihovog učešća na odgovarajućim tržištima.

Na kraju posljednji, ali ne i najmanje važni element koji mora biti obezbijeđen u cilju implementacije V2G sistema, je napredni sistem mjerenja električne energije. Imajući u vidu da će agregator imati ulogu da koordiniše punjenje i pražnjenje velikog broja vozila prilikom pružanja usluga distributivnom sistemu, potrebno je da isti ima podatke o snazi punjenja ili pražnjenja vozila u realnom vremenu. Dodatno, budući da usluge koje pružaju vozila mogu biti i lokalne (smanjenje odstupanja napona u određenom dijelu mreže), potrebno je obezbijediti visok stepen granularnosti podataka koje dobija agregator. Napredni sistem mjerenja električne energije bi na taj način omogućio povećanje kvaliteta i pouzdanosti, kao i optimizaciju upravljačkog dijela V2G sistema. U principu, pored drugih mjernih veličina, osnovna uloga naprednog sistema mjerenja će biti da mjeri energiju potrošnje i energiju koja je injektirana u mrežu, kako bi se mogla fakturisati pružena usluga, kao i angažovana snaga. Sa ovog aspekta je jako važno obezbijediti veliku klasu tačnosti brojila, kako bi se obezbijedio željeni odziv vozila na signal koji dobija od agregatora.

Dodatno, važno je naglasiti da tipični učesnik na tržištu pomoćnih usluga je pojedinačni korisnik sistema, ne skup korisnika kao u slučaju agregatora, pa je stoga i mjerenje i obezbjeđenje brzog odziva mnogo jednostavnije. S tim u vezi, potrebno je da upravljački, komunikacioni i mjerni sistem kod agregatora i korisnika budu što napredniji i pouzdaniji, kako bi se prevazišao problem manjka koordinacije i sporog odziva [74].

4. Koordinacija punjenja električnih vozila u tradicionalnom distributivnom sistemu

Uprkos ambicioznim ciljevima za povećanje energetske efikasnosti, koji bi rezultirali smanjenjem potrošnje električne energije, planirana elektrifikacija transporta i grijanja će zasigurno dovesti do povećanja potreba za proizvodnjom, prenosom i distribucijom električne energije. Jasno je da bi nekontrolisano povećanje potrošnje električne energije, prije svega, rezultiralo potrebom za izgradnjom dodatnih proizvodnih kapaciteta, a u slučaju da se punjenje vozila podudara sa vršnim opterećenjem sistema, i do potrebe za povećanjem kapaciteta prenosne i distributivne mreže.

Kao što je već rečeno u Potpoglavlju 2.6.2, liberalizacija elektroenergetskog sektora, tačnije proizvodnog sektora, je dovela do preusmjeravanja rizika koji nosi izgradnja novih proizvodnih kapaciteta sa korisnika na investitore i rezultirala razvojem veleprodajnog tržišta. S tim u vezi, cijena električne energije na tržištu se formira na osnovu ponude i potražnje za električnom energijom u datom vremenskom intervalu. Veća potražnja u određenim satima (naročito vršnim) usljed punjenja električnih vozila, može rezultirati potrebom za angažovanjem proizvodnih objekata sa većom marginalnom cijenom što bi dovelo do povećanja cijene električne energije na tržištu u posmatranom satu. Sa druge strane, kada su u pitanju ulaganja u prenosnu i distributivnu mrežu (Potpoglavlje 2.1), njih karakteriše velika „diskontinualnost“ (eng. *lumpiness*). Tačnije, ne postoji mogućnost da se kapacitet vodova ili transformatora kontinualno povećava kad god je potrebno, već se mreža dimenzioniše tako da ima veći kapacitet koji će moći da zadovolji potrebe u narednih nekoliko decenija. Dimenzionisanje kapaciteta vodova i transformatora se vrši u odnosu na vršno opterećenje sistema, što znači da bi se naglim povećanjem vršnog opterećenja javila potreba za povećanjem kapaciteta velikog dijela mreže, što bi iziskivalo velika ulaganja u distributivni sistem, i posljedično povećanje tarifa za korišćenje distributivnog sistema.

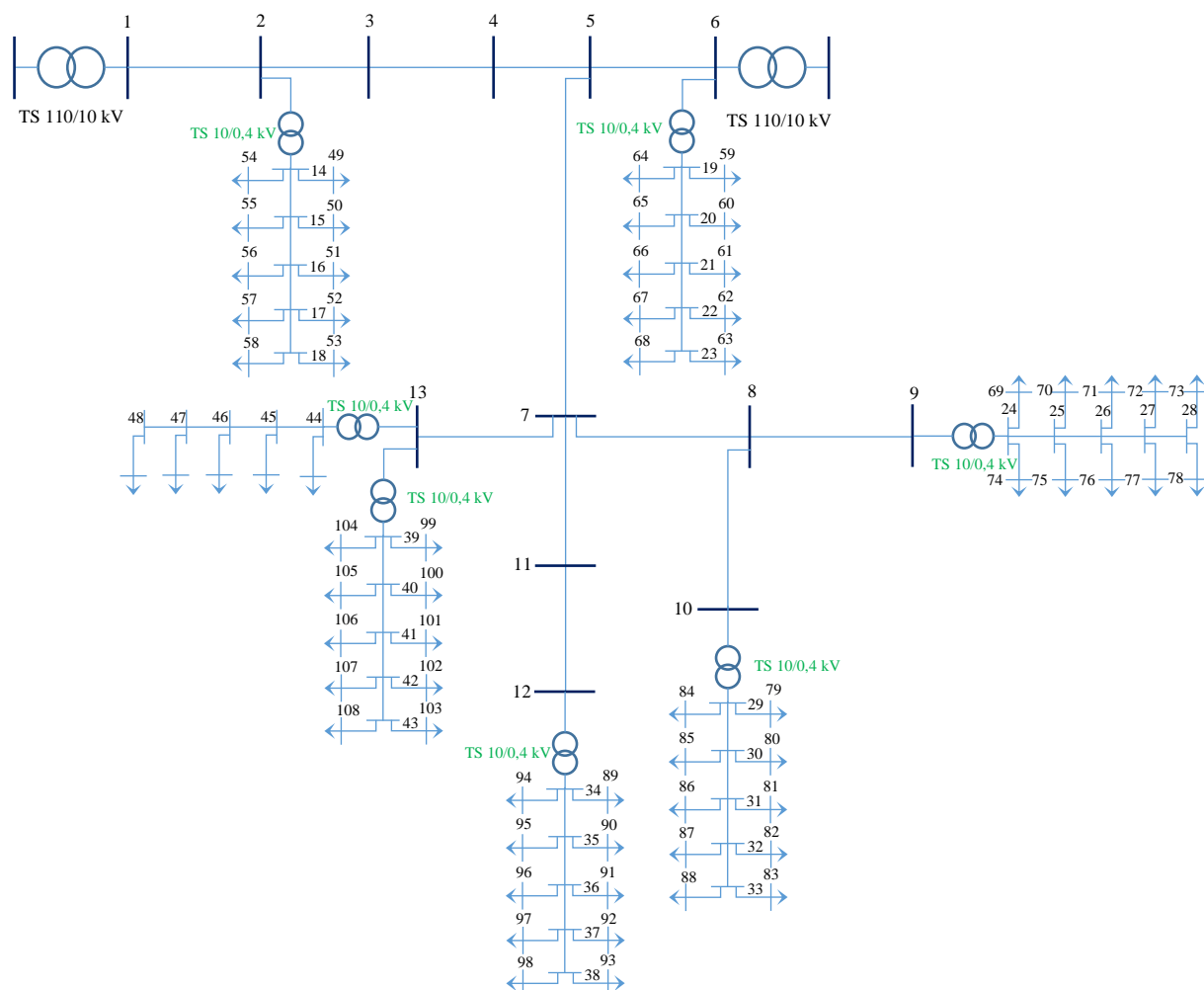
Pored navedenog, nekontrolisano povećanje vršnog opterećenja bi dovelo do brojnih operativnih problema u mreži, kao što je povećanje gubitaka (i ovaj aspekt se može posmatrati sa ekonomskog stanovišta) i narušavanje kvaliteta napona, odnosno opadanje napona u čvorovima ispod vrijednosti definisanih standardom EN 50160. Već je ranije istaknuto da konvertori koji se koriste unutar punjača za električna vozila dovode do injektiranja viših harmonika u mrežu (Potpoglavlje 3.3.5), što u slučaju narušavanja ograničenja može da dovede do pogrešnog rada ili čak kvara na potrošačima, a uz to dovodi do prevelikog termičkog naprezanja transformatora. Međutim, problem „zaprljanja“ mreže se može riješiti primjenom PFC konvertora i odgovarajućih upravljačkih algoritama, tako da ovaj aspekt neće biti predmet dalje analize.

U cilju analize uticaja punjenja električnih vozila na mrežu, u narednom dijelu će biti prikazane tri varijante punjenja u „tradicionalnom“²³ distributivnom sistemu, i to: nekoordinisano, punjenje tokom niže tarife i pametno punjenje.

²³ Važno je naglasiti da se riječ „tradicionalni“ u ovom kontekstu koristi za opisivanje distributivnog sistema koji ne sadrži distribuirane izvore, već se napajanje obezbjeđuje samo iz tačaka konekcije sa prenosnim sistemom. Kako je već rečeno u Potpoglavlju 3.3.7, za primjenu algoritma pametnog punjenja je potrebno obezbijediti ugradnju naprednog sistema mjerenja i telekomunikacione mreže za prenos komunikacionih i upravljačkih signala

4.1. Početne pretpostavke i ulazni podaci

Analiza će biti izvršena na mreži prikazanoj na slici 4.1.1, koja predstavlja modifikovanu verziju IEEE srednjenaponske (10 kV) mreže sa 13 čvorova [75]. Naime, srednjenaponska mreža sa 13 čvorova je modifikovana na način što je na pojedine srednjenaponske čvorove priključena niskonaponska (0,4 kV) radialna mreža. Dakle, posmatra se mreža sa 108 čvorova, od kojih čvorovi 1 i 6 predstavljaju tačke konekcije sa prenosnim sistemom, dok čvorovi od 44 do 108 predstavljaju čvorove na koje su priključeni potrošači.



Slika 4.1.1 Topologija dijela srednjenaponske i niskonaponske distributivne mreže

Važno je naglasiti da su simulacije izvršene u petnaestominutnoj rezoluciji, odnosno posmatrano je ukupno 96 vremenskih intervala.

U cilju analize uticaja punjenja električnih vozila na distributivni sistem, posmatrana su četiri tipa vozila i to: *Mitsubishi iMiEV*, *Fiat 500e*, *Mercedes B* i *Nissan Leaf* (2016). Podaci o tipu i kapacitetu baterija u ovim vozilima su prikazani u Tabeli 4.1.1.

od mreže do vozila, pa je s tog aspekta jasno da ovaj nivo komunikacije odstupa od tradicionalne distributivne mreže koja je egzistirala prije nekoliko decenija.

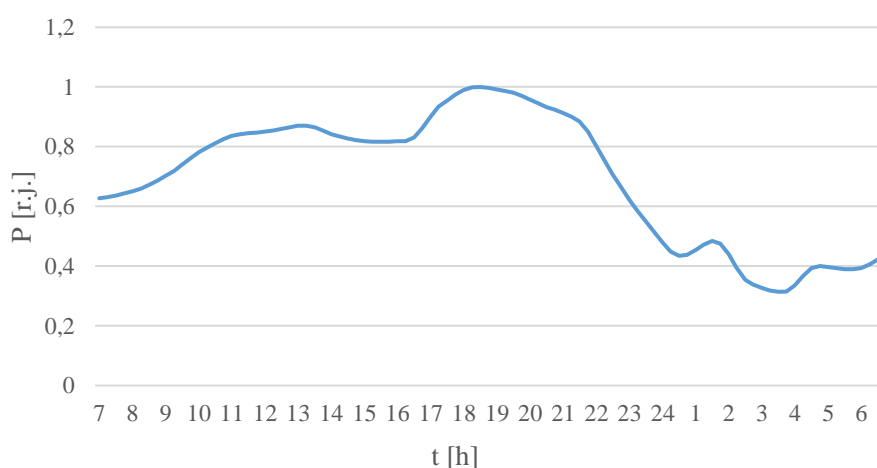
Tabela 4.1.1 Modeli električnih vozila

Redni broj	Model	Tip baterije	Kapacitet baterije
1	<i>Mitsubishi iMiEV</i>	Litijum jonska	16 kWh
2	<i>Fiat 500e</i>	Litijum jonska	24 kWh
3	<i>Mercedes B</i>	Litijum jonska	28 kWh
4	<i>Nissan Leaf (2016)</i>	Litijum jonska	30 kWh

Kako nije preporučljivo da se baterija isprazni do kraja, biće posmatrani slučajevi kada je potrebno u toku vremena punjenja napuniti samo 80 % kapaciteta baterije, odnosno 12,8; 19,2; 22,4 i 24 kWh respektivno.

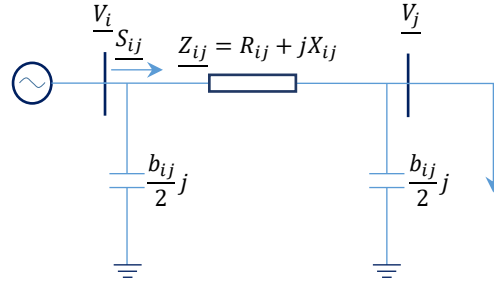
Čvorovi na koje će biti priključena vozila su određeni primjenom binomne raspodjele, odnosno generisanjem broja jedan (koji označava da je na posmatrani čvor priključeno vozilo), odnosno nula (koji označava suprotni ishod) u pojedinim potrošačkim čvorovima mreže. Vjerovatnoća da se generiše pozitivan ishod (broj jedan) je 0,5, koja u principu predstavlja penetraciju električnih vozila od oko 50 % (u odnosu na ukupan broj domaćinstava u prikazanoj mreži), odnosno 1, koja označava penetraciju električnih vozila od 100 %. Nakon što se odaberu čvorovi (domaćinstva) na koje su priključena vozila, primjenom uniformne raspodjele se definiše tip vozila u odgovarajućem čvoru, odnosno generiše se broj od jedan do četiri, gdje jedan predstavlja prvi model – Mitsubishi iMiEV, dva – Fiat 500e itd.

Pod pretpostavkom da je riječ o potrošačima koji imaju slične navike, odnosno šablone potrošnje električne energije (slično vrijeme dolaska sa posla i korišćenja uređaja u domaćinstvu), i u cilju smanjenja kompleksnosti modela u dijelu modelovanja potrošnje, biće uzeto da svi potrošači imaju identičan jedinični dnevni dijagram potrošnje, odnosno da je faktor jednovremenosti jednak jedinici. Navedeni jedinični dijagram opterećenja je prikazan na slici 4.1.2²⁴. Vršno opterećenje pojedinačnih domaćinstava se kreće u intervalu od 11 do 16 kW.

**Slika 4.1.2** Dnevni dijagram opterećenja

²⁴ Napomena: prikaz na grafiku ide od 7:00 h do 6:59 h, zbog kontinualnog prikaza punjenja vozila, koje mora biti napunjeno do 7 h (pretpostavljeno vrijeme odlaska na posao).

Na slici 4.1.3 je prikazana šema jednostavnog kola, koje se sastoji od generatora, voda modelovanog preko Π šeme i opterećenja. Za ovo jednostavno kolo će biti izvedene formule za aktivnu i reaktivnu snagu koje će biti korišćene u modelu.



Slika 4.1.3 Ekivalentna šema

Na osnovu I i II Kirhofovog zakona, struja u grani se može izraziti kao:

$$\underline{I}_{ij,t} = \frac{V_{i,t}e^{j\theta_{i,t}} - V_{j,t}e^{j\theta_{j,t}}}{\sqrt{3}Z_{ij}e^{j\varphi_{ij,t}}} + \frac{b_{ij}}{2\sqrt{3}}V_{i,t}e^{j(\theta_{i,t}+\frac{\pi}{2})}, \quad (4.1)$$

gdje je $\underline{I}_{ij,t}$ kompleksna vrijednost struje između čvorova i i j ; $V_{i,t}$, $V_{j,t}$ efektivna vrijednost linijskog napona u čvoru i , odnosno u čvoru j ; θ_i , θ_j fazni stav napona u čvoru i , odnosno u čvoru j ; Z_{ij} impedansa grane između čvorova i i j ; $\varphi_{ij,t}$ argument impedanse; a b_{ij} susceptansa otočnih grana prema zemlji.

Kompleksna vrijednost prividne snage između čvorova i i j se može izraziti kao:

$$\underline{S}_{ij,t} = \sqrt{3}V_{i,t}e^{j\theta_{i,t}}\underline{I}_{ij,t}^*, \quad (4.2)$$

odnosno:

$$\underline{S}_{ij,t} = V_{i,t}e^{j\theta_{i,t}} \frac{V_{i,t}e^{-j\theta_{i,t}} - V_{j,t}e^{-j\theta_{j,t}}}{Z_{ij}e^{-j\varphi_{ij,t}}} + V_{i,t}e^{j\theta_{i,t}} \frac{b_{ij}}{2} V_{i,t}e^{-j(\theta_{i,t}+\frac{\pi}{2})}, \quad (4.3)$$

$$\begin{aligned} \underline{S}_{ij,t} = & \frac{V_{i,t}^2}{Z_{ij}} \cos(\varphi_{ij}) + j \frac{V_{i,t}^2}{Z_{ij}} \sin(\varphi_{ij}) - \frac{V_{i,t}V_{j,t}}{Z_{ij}} \cos(\theta_{i,t} - \theta_{j,t} + \varphi_{ij}) - \\ & - j \frac{V_{i,t}V_{j,t}}{Z_{ij}} \sin(\theta_{i,t} - \theta_{j,t} + \varphi_{ij}) - j \frac{b_{ij}}{2} V_{i,t}^2, \end{aligned} \quad (4.4)$$

koja se dalje može razložiti na aktivnu komponentu:

$$P_{ij,t} = \text{Re} \{ \underline{S}_{ij,t} \} = \frac{V_{i,t}^2}{Z_{ij}} \cos(\varphi_{ij}) - \frac{V_{i,t}V_{j,t}}{Z_{ij}} \cos(\theta_{i,t} - \theta_{j,t} + \varphi_{ij}), \quad (4.5)$$

i reaktivnu komponentu:

$$Q_{ij,t} = \text{Im} \{ \underline{S}_{ij,t} \} = \frac{V_{i,t}^2}{Z_{ij}} \sin(\varphi_{ij}) - \frac{V_{i,t}V_{j,t}}{Z_{ij}} \sin(\theta_{i,t} - \theta_{j,t} + \varphi_{ij}) - \frac{b_{ij}}{2} V_{i,t}^2. \quad (4.6)$$

Pored navedenog, potrebno je obezbijediti da sistem bude izbalansiran, odnosno da je suma snaga koje se stiču u čvor jednaka nuli. Dakle, za svaki čvor $i=1, 2, \dots, n$ treba da važi da je:

$$\sum_{g=1}^k P_{gi,t} - \sum_{p=1}^m P_{pi,t} = \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n P_{ij,t}, \quad (4.7)$$

gdje je $P_{gi,t}$ aktivna snaga generatora g (injektiranja) priključenog na čvor i , k ukupan broj generatora priključenih na čvor i , $P_{pi,t}$ aktivna snaga potrošača p (preuzimanja) priključenog na čvor i , m ukupan broj potrošača priključenih na čvor i , a n je ukupan broj čvorova u mreži.

Identična jednačina mora biti zadovoljena i za reaktivnu snagu:

$$\sum_{g=1}^k Q_{gi,t} - \sum_{p=1}^m Q_{pi,t} = \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n Q_{ij,t}. \quad (4.8)$$

Kako su u prikazanoj mreži prisutna dva naponska nivoa (0,4 kV i 10 kV), zbog jednostavnijeg proračuna i poređenja podataka između različitih naponskih nivoa, korišćena je Metoda jediničnih vrijednosti. S tim u vezi, za bazne vrijednosti napona su uzeti nazivni naponi prikazanih mreža, dok je za baznu snagu, koja mora biti ista za cjelokupni sistem, uzeta vrijednost od 20 MVA. Odnosno, izabrane su sljedeće bazne vrijednosti:

$$U_{b1} = 10 \text{ kV}, U_{b2} = 0,4 \text{ kV} \text{ i } S_b = 20 \text{ MVA} \quad (4.9)$$

Imajući u vidu da je:

$$Z = \frac{U^2}{S} \quad (4.10)$$

Koristeći odabrane vrijednosti baznih napona i bazne snage, slijedi da je:

$$Z_{b1} = 5 \Omega \text{ i } Z_{b2} = 0,008 \Omega \quad (4.11)$$

Navedene bazne vrijednosti su korišćene za pretvaranje ulaznih podataka u jedinične vrijednosti, odnosno za pretvaranje dobijenih rezultata u apsolutne vrijednosti.

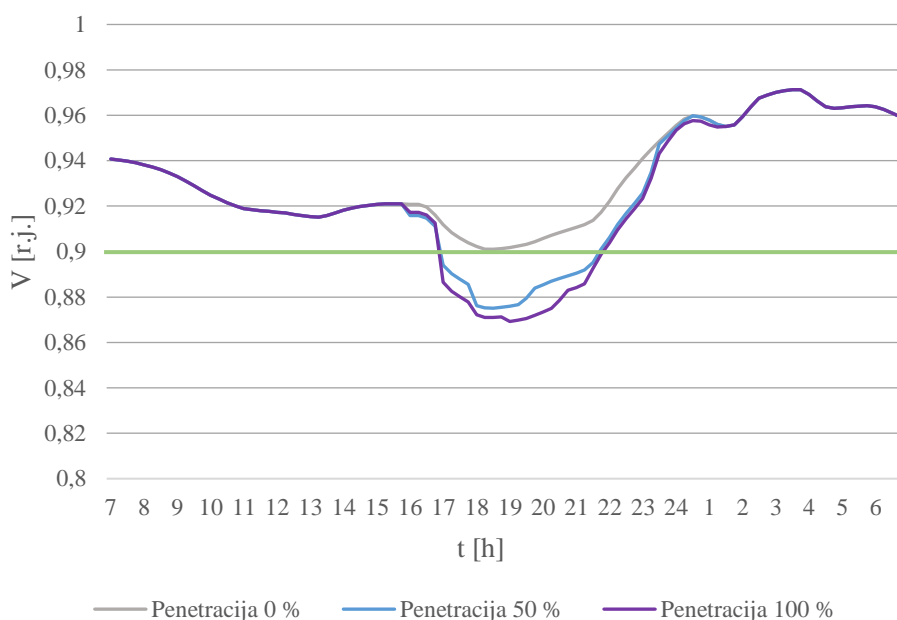
4.2. Varijanta 1 – Nekoordinisano punjenje električnih vozila

Prva analizirana varijanta predstavlja najizvjesniji scenario punjenja električnih vozila i odnosi se na situaciju kada se punjenje električnih vozila podudara sa vršnim opterećenjem u sistemu. Imajući u vidu da potrošači (domaćinstva) najviše opterećuju mrežu u periodu od 17 h do 20 h (u principu, u periodu nakon dolaska sa posla), jasno je da bi se bez odgovarajućih „signala“ od sistema, punjenje električnih vozila odvijalo u tom periodu, nakon što se dio baterije isprazni tokom radnog dana. S tim u vezi, analiza prve varijante ima za cilj da utvrdi promjenu naponskih prilika i gubitaka u mreži u slučaju nekoordinisanog punjenja električnih vozila.

Kako su modelovana četiri tipa električnih vozila različitog kapaciteta baterije, pri izabranoj konstantnoj snazi punjenja od 3,5 kW (koja je uzeta zbog ograničenja struje i napona na standardnoj utičnici – Mod 1) razlikuje se trajanje punjenja pojedinačnog tipa vozila. Shodno tome, punjenje 80 % ispražnjenog modela *Mitsubishi iMiEV* traje oko tri sata i 45 minuta, modela *Fiat 500e* oko pet sati i 30 minuta, modela *Mercedes B* oko šest sati i 30 minuta i modela *Nissan Leaf* oko 7 sati. Važno je naglasiti da zbog posmatranja diskretnih intervala od 15 minuta, snaga punjenja će se razlikovati u posljednjem petnaestominutnom intervalu.

Kako je riječ o situaciji kada se punjenje električnih vozila podudara sa vršnim opterećenjem, a ne očekuje se da će sva vozila započeti sa punjenjem istovremeno, modelovano je da punjenje električnog vozila u pojedinačnom čvoru počine ili u 16 h, 17 h, 18 h ili 19 h, u zavisnosti od ishoda definisanog normalnom raspodjelom.

Kako je napon lokalni parametar, biće posmatrane promjene napona čvora 83 u mreži prikazanoj na slici 4.1.1. Važno je naglasiti da je standardom EN 50160 definisano dozvoljeno odstupanje napona u odnosu na nominalnu vrijednost od 10 %, odnosno vrijednosti napona od 0,9 do 1,1 r.j. su dozvoljene standardom. Na slici 4.2.1 je prikazana promjena napona čvora 83 kada na mrežu nije priključeno nijedno vozilo, pri penetraciji vozila od oko 50 % i pri penetraciji vozila od 100 %.

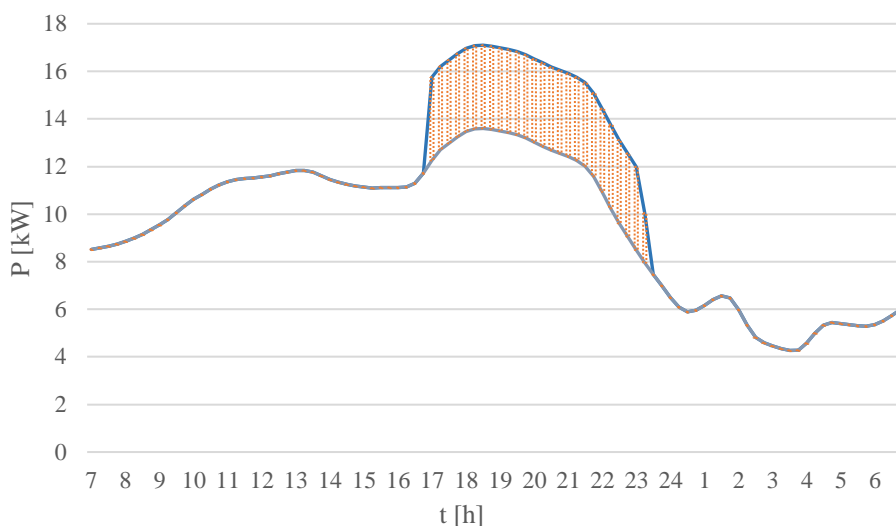


Slika 4.2.1 Promjena napona čvora 83 – nekoordinisano punjenje

U situaciji kada nijedno električno vozilo nije priključeno na sistem (grafik sive boje), pri izabranom opterećenju i parametrima mreže, napon se kreće u dozvoljenim granicama, iako u toku vršnih sati njegova vrijednost pada na donju granicu – situacija koja ilustruje realno stanje u krajnjim čvorovima radijalnog voda.

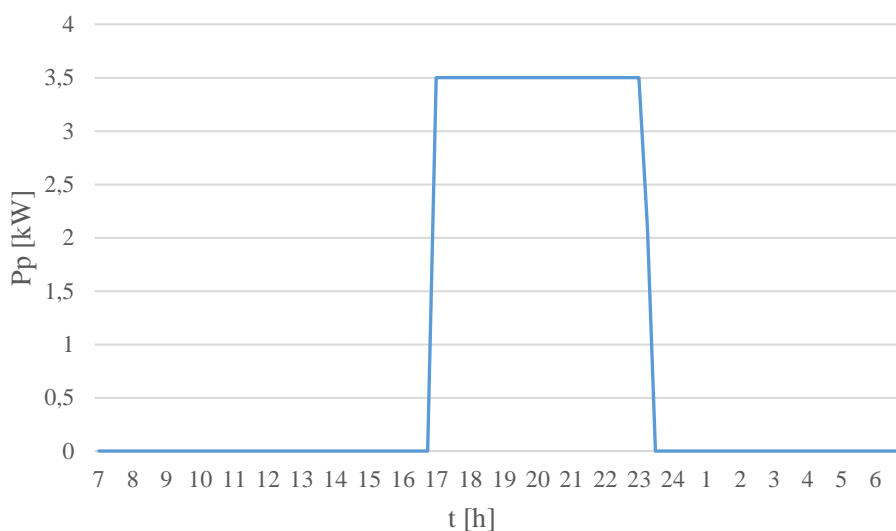
Plavi i lila grafici prikazuju promjenu napona posmatranog čvora u slučaju povećane penetracije električnih vozila. Usljed porasta vršne snage tokom punjenja vozila predmetnog čvora (slika 4.2.2), kao i uticaja povećanja vršne snage ostalih čvorova na koje su priključena vozila, dolazi do pada napona u posmatranom čvoru ispod vrijednosti dozvoljene standardom

EN 50160. Iako je porast opterećenja čvora 83 isti u situaciji kada je penetracija 50 % ili 100 %, pad napona je izraženiji u drugom slučaju zbog većeg opterećenja sistema (ostalih čvorova).



Slika 4.2.2 Dijagram opterećenja čvora 83 – nekoordinisano punjenje

Generisanjem slučajnih promjenljivih primjenom binomne i normalne raspodjele, dobijeno je da je vozilo marke *Mercedes B* počinje punjenje u 17 h u čvoru 83 predmetne mreže (slika 4.2.3). Kao što je ranije naglašeno, punjenje ovog modela vozila traje oko šest i po sati.



Slika 4.2.3 Promjena snage punjenja vozila u čvoru 83 – nekoordinisano punjenje

Kako su uređaji dimenzionisani da optimalno rade pri naznačenom naponu uz dozvoljena mala odstupanja ($\pm 10\%$), a operator distributivnog sistema ima obavezu da održava napon u granicama definisanim standardom EN 50160, odstupanja napona u normalnom pogonu su indikator neophodnosti ulaganja u mrežu, kroz npr. izgradnju nove TS 10/0,4 kV koja bi bila postavljena bliže čvoru u kojem napon odstupa (postizanje manjeg pada napona na 0,4 kV vodu).

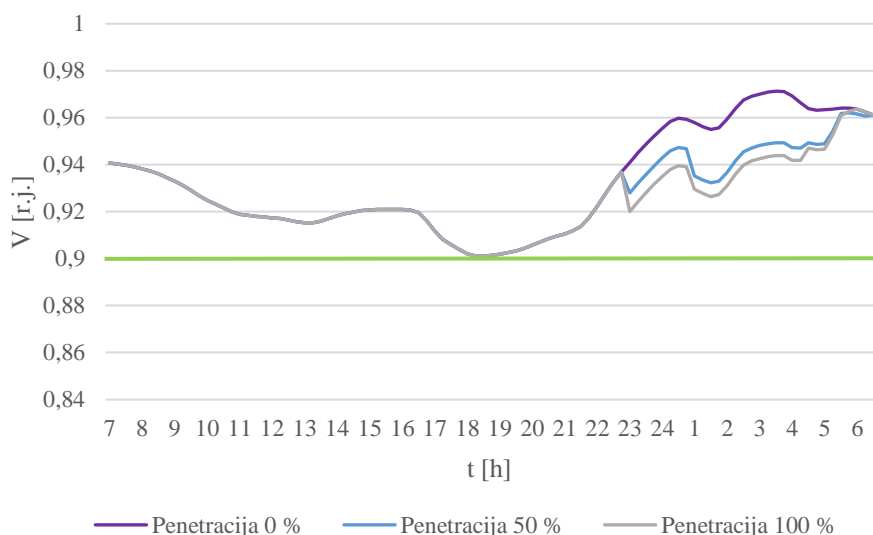
4.3. Varijanta 2 – Punjenje tokom niže tarife

U ovom dijelu je prikazano punjenje električnih vozila u sistemu u kojem postoji određeni (ali nizak) stepen vremenske granularnosti u utvrđivanju cijene, odnosno u kojem se razlikuje cijena električne energije (i ostalih komponenti računa) tokom dana, kada je potrošnja velika, i noću, kada je potrošnja jako mala. Na ovaj način se šalje ekonomski signal potrošačima da povećaju potrošnju tokom perioda kada je cijena manja, kako bi postigli veću ekonomsku efikasnost – smanjili račun za utrošenu električnu energiju, a i čime se posredno postiže veća efikasnost korišćenja mreže. Međutim, kako određena potrošnja u domaćinstvu ne može biti pomjerena (“neelastična potrošnja” – kuvanje, grijanje prostorija itd.), potrebno je iskoristiti mogućnost odlaganja određenog dijela potrošnje kod potrošača koji to dozvoljavaju („elastični potrošači“), među kojima su i električna vozila.

Period niže tarife u Crnoj Gori počinje u 23 h i traje do 7 h sljedećeg dana za periode zimskog računanja vremena, odnosno od 24 h do 8 h za periode ljetnjeg računanja vremena. Navedena simulacija će biti izvršena posmatrajući period zimskog računanja vremena.

Prema tome, mogući trenuci početka punjenja vozila su 23 h, 24 h, 1 h i 2 h²⁵, i za svaki pojedinačni čvor će biti izabrani primjenom normalne raspodjele. Vrijeme potrebno za punjenje 80 % kapaciteta baterije svakog od navedenih modela je isto kao i u slučaju nekoordinisanog punjenja, sa razlikom što u ovom slučaju neće doći do povećanja vršnog opterećenja sistema jer se punjenje odvija u satima kada je opterećenje mreže malo.

Promjena napona čvora 83 će biti posmatrana pri penetraciji električnih vozila od oko 50 % i 100 % (slika 4.3.1).



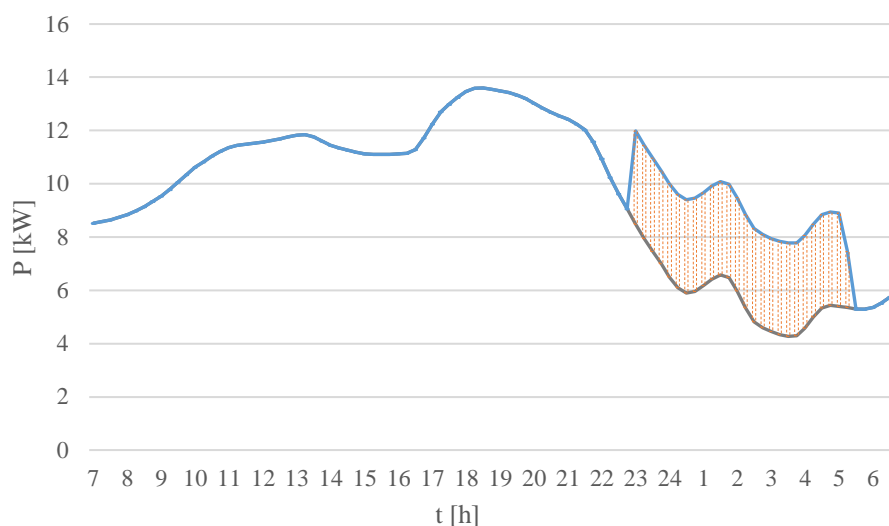
Slika 4.3.1 Promjena napona čvora 83 – punjenje tokom niže tarife

Iako u definisanom periodu punjenja električnih vozila dolazi do smanjenja napona, kao što je i očekivano, u predstavljenom modelu napon čvora 83 ne pada ispod donje granice definisane standardom EN 50160. Iz navedenog se može izvesti zaključak da se investiranje u

²⁵ Kako punjenje modela *Mercedes B* i *Nissan Leaf* traje 6 i po, odnosno 7 sati, njihovo punjenje može najkasnije početi u 24 h. Stoga, opcija početka punjenja u 1 i 2 h kod ova dva modela neće biti razmatrana, jer ona ne bi bila napunjenja do kraja u 7 h sljedećeg dana.

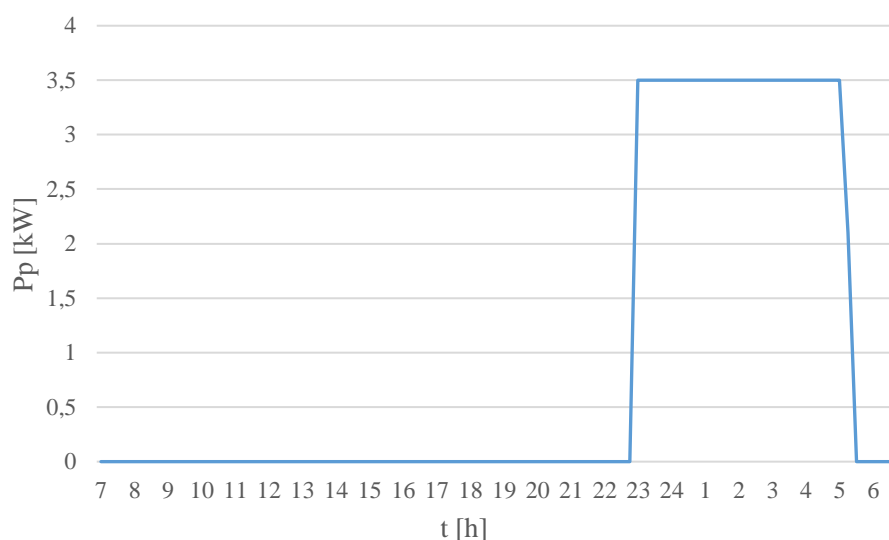
mrežu određenog kapaciteta može odložiti adekvatnim pomjeranjem potrošnje iz perioda kada je ona najveća u periode kada je jako mala.

Na slici 4.3.2 je prikazana promjena opterećenja čvora 83 usljed punjenja električnog vozila tokom noći. Odlaganje punjenja električnog vozila u ovoj situaciji ne dovodi do povećavanja vršnog opterećenja, već do blagog porasta potrošnje tokom noćnih sati, što, imajući u vidu da se mreža dimenzioniše da izdrži vršno opterećenje koje se dogodi u jednom kratkom trenutku tokom godine, potvrđuje prethodno navedenu konstataciju da odlaganje potrošnje dovodi do efikasnijeg korišćenja mreže.



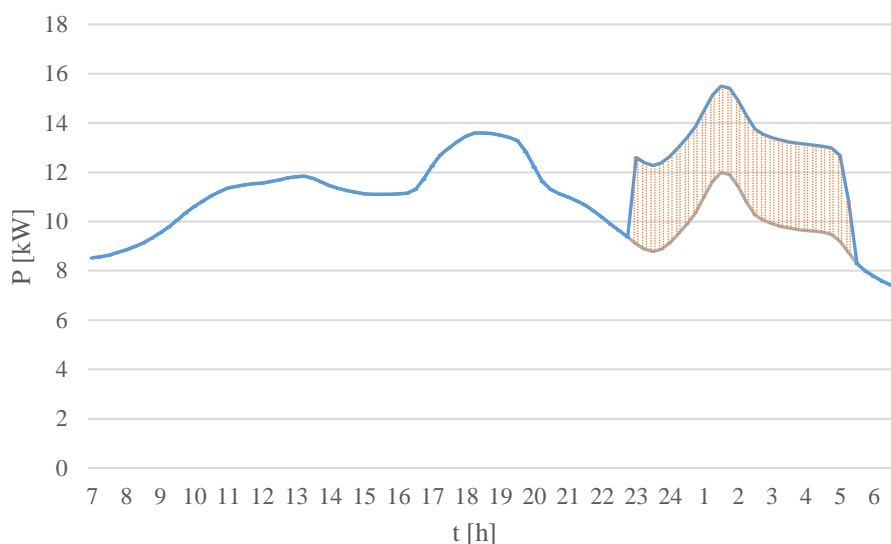
Slika 4.3.2 Dijagram opterećenja čvora 83 – punjenje tokom niže tarife

I u ovom slučaju je posmatrana situacija kada je vozilo marke *Mercedes B* priključeno na čvor 83. Punjenje ovog vozila počinje u 23 h i traje do 5 h i 30 minuta, kao što je prikazano na slici 4.3.3.



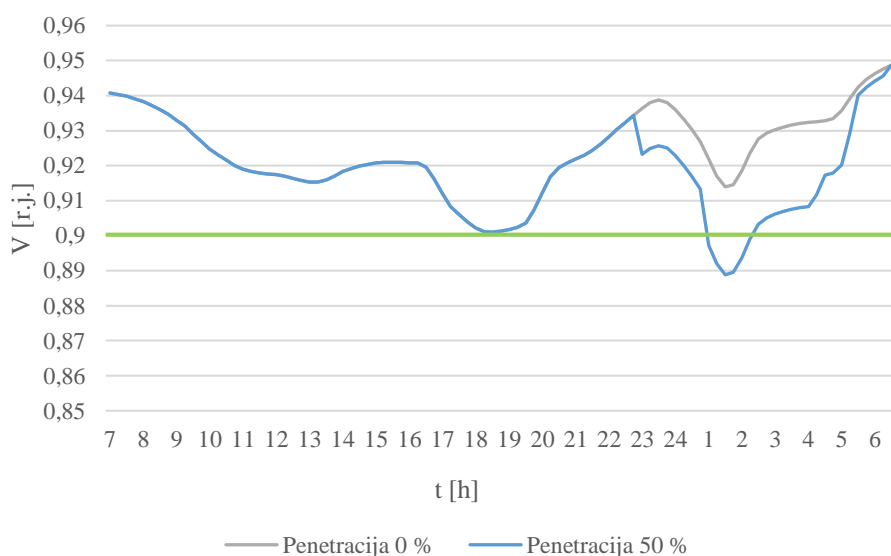
Slika 4.3.3 Promjena snage punjenja električnog vozila u čvoru 83 – punjenje tokom niže tarife

Međutim, kako je ekonomski signal za povećanje potrošnje tokom perioda kada je mreža manje opterećena prilično simplifikovan, odnosno ne uzima u obzir dodatnu koordinaciju koja bi bila neophodna u određenom trenutku, nekontrolisano pomjeranje potrošnje može rezultirati formiranjem novog vršnog opterećenja u periodu noćnih sati. Naglo povećanje opterećenja u tom periodu, na koje bi se dodalo opterećenje usljed punjenja vozila, bi moglo da dovede do situacije slične nekoordinisanom punjenju. Imajući navedeno u vidu, prikazana je promjena napona u čvoru 83 u situaciji kada je usljed odziva potrošača na ekonomski signal došlo do pomjeranja određenog dijela elastične potrošnje u noćne sate. Odnosno, posmatrano je punjenje električnog vozila u istoj mreži u istom periodu (od 23 h do 5 h i 30 minuta), ali za dijagram opterećenja prikazan na slici 4.3.4.



Slika 4.3.4 Dijagram opterećenja u čvoru 83 za veći „odziv“ potrošnje tokom niže tarife

Usljed odlaganja potrošnje je došlo do naglog povećanja opterećenja tokom noći (javio se manji lokalni maksimum opterećenja oko 1 h i 30 minuta, na koji se superponira snaga punjenja električnog vozila i dolazi do promjene krive napona u čvoru 83 prikazane na slici 4.3.5.



Slika 4.3.5 Promjena napona čvora 83 za slučaj većeg „odziva“ potrošnje tokom niže tarife

Dakle, u ovom slučaju čak i pri penetraciji električnih vozila od 50 % dolazi do pada napona u čvoru 83 ispod vrijednosti dozvoljene standardnom EN 50160. Samim tim, može se izvesti zaključak da i pored toga što je punjenje električnih vozila tokom noći bolja opcija u odnosu na nekoordinisano punjenje tokom vršnih sati, nekontrolisano povećanje opterećenja tokom noćnih sati može dovesti do narušavanja ograničenja u mreži i u ovom slučaju.

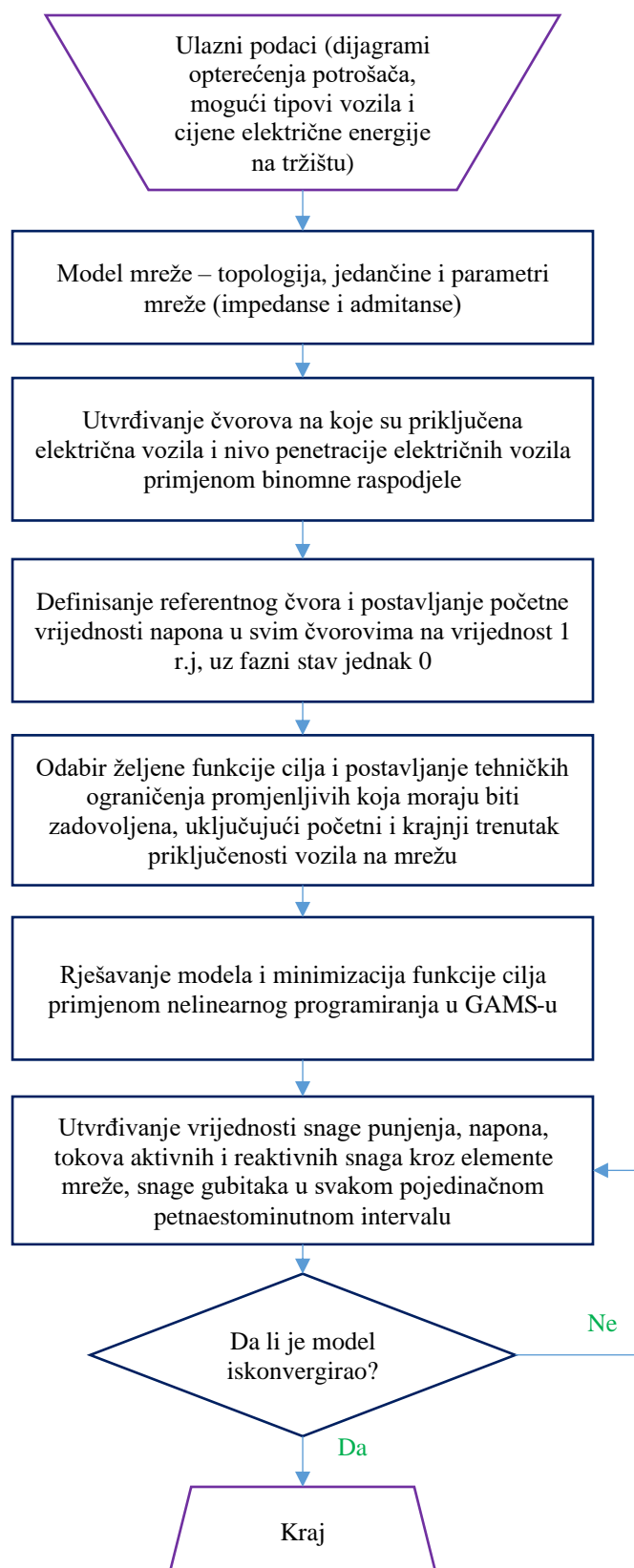
4.4. Varijanta 3 – Pametno punjenje

Za razliku od prethodne dvije varijante, u kojima se punjenje električnih vozila odvija u odabranom periodu pri konstantnoj snazi bez automatizovanog odziva promjene snage punjenja na signale iz mreže, pametno punjenje podrazumijeva koordinaciju između mreže i vozila.

Kao što je naglašeno u Potpoglavlju 3.3.7, da bi direktna koordinacija punjenja električnog vozila bila moguća, potrebno je obezbijediti komunikacioni sistem između vozila i mreže, lokalizovani sistem koji upravlja punjenjem vozila – agregator i odgovarajući napredni mjerni uređaj koji će slati podatke o mjernim veličinama tokom punjenja vozila. U zavisnosti od odabrane funkcije cilja, koordinacija punjenja električnih vozila ima za cilj postizanje boljih naponskih prilika u sistemu, smanjenje gubitaka aktivne energije, optimalnije korišćenje mreže, odlaganje potrebe za dodatnim ulaganjem u mrežu, i/ili davanje adekvatnog odgovora na tržišne signale, odnosno na promjenu cijene električne energije u satnoj rezoluciji.

Kako, generalno govoreći, vozila provedu veći dio dana parkirana, pretpostavljeno je da se vozilo oko 17 h priključuje na mrežu, pri čemu će tačno vrijeme početka i snaga njegovog punjenja biti određena na osnovu rezultata optimizacije. Kraj punjenja je određen trenutkom odlaska na posao (7 h), i vozilo u tom trenutku mora biti napunjeno do kraja (100 % kapaciteta baterije, ali uzimajući u obzir da je bilo ispražnjeno samo do nivoa 20 % kapaciteta, baterija vozila se u suštini puni do 80 % kapaciteta u ovom periodu).

Modelovani algoritam pametnog punjenja u GAMS-u (eng. *General Algebraic Modeling System*) je prikazan na slici 4.4.1.



Slika 4.4.1 Dijagram koordinacije punjenja električnih vozila

Navedeni optimizacioni dijagram je modelovan u GAMS-u, softveru koji je našao široku primjenu u rješavanju kompleksnih optimizacionih problema, kao što su pitanja optimizacije u elektroenergetskom sistemu [76, 77]. Imajući u vidu da je u ovom slučaju riječ o nelinearnom

modelu sa velikim brojem promjenljivih (veliki broj čvorova u distributivnom sistemu), u okviru GAMS-a je odabran CONOPT solver²⁶, kojeg karakteriše velika brzina konvergencije i tačnost dobijenih rezultata [78].

Kako utvrđivanje optimalnog šablona punjenja u velikoj mjeri zavisi od odabrane funkcije cilja, različite funkcije cilja dovode do različitih „optimalnih“ šablona punjenja. Iako se riječ „optimalno“, odnosno „efikasno“ odnosi na najjeftinije rješenje (minimizacija troškova) koje ispunjava sve tehničke uslove, u ovom radu će biti korišćeno više funkcija cilja, od kojih su određene funkcije više tehničke prirode:

1. Minimizacija odstupanja napona od nazivne vrijednosti (1 r.j.):

$$F_1 = \min \left(\sum_{t=1}^{96} \sum_{i=1}^n (1 - V_i)^2 \right), \quad (4.12)$$

gdje je V_i napon u čvoru i ; $i = 1, 2, 3, \dots, n$ redni broj čvora u mreži; a n je ukupan broj čvorova u mreži.

2. Kombinacija dvije funkcije cilja – minimizacija odstupanja napona i minimizacija troškova električne energije preuzete iz prenosnog sistema:

$$F_1 = \min \left(k_1 \sum_{t=1}^{96} \sum_{i=1}^n (1 - V_i)^2 + k_2 \sum_{t=1}^{96} \sum_{g=1}^m b_t P_{g,t} \right), \quad (4.13)$$

gdje je P_g injektirana snaga iz prenosnog sistema; b_t cijena sa dan unaprijed tržišta na hrvatskoj berzi CROPEX za 25.05.2021. godine; k_1, k_2 koeficijenti učešća pojedinih funkcija cilja u ukupnoj funkciji cilja; a $g = 1, 2, \dots, m$ broj čvorova „injektiranja“ u posmatranom sistemu.

3. Minimizacija aktivne snage gubitaka u svakoj grani ij :

$$F_2 = \min \left(\frac{1}{2} \sum_{t=1}^{96} \sum_{i=1}^n \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n r_{ij} \frac{P_{ij}^2 + Q_{ij}^2}{V_i^2} \right), \quad (4.14)$$

gdje je P_{ij} aktivna snaga kroz granu ij ; Q_{ij} reaktivna snaga kroz granu ij ; a r_{ij} aktivna otpornost grane između čvorova i i j .

Prilikom primjene navedenih funkcija cilja ne smije doći do narušavanja ograničenja u sistemu, odnosno, potrebno je uzeti u obzir sljedeća tehnička ograničenja:

1. Ograničenje efektivne vrijednosti napona koje je definisano standardnom EN 50160 za svako $t = 1, 2, 3, \dots, 96$:

$$V_{min} \leq V_{i,t} \leq V_{max}, \quad (4.15)$$

gdje je $V_{min} = 0,9$ r.j, a $V_{max} = 1,1$ r.j.

²⁶ https://www.gams.com/latest/docs/S_CONOPT.html

2. Ograničenje snage punjenja za svaki čvor i na koji je priključeno električno vozilo i za svako $t = 1, 2, 3, \dots, 96$, koje je posljedica korišćenja standardne utičnice u kućnoj instalaciji:

$$P_{min} \leq P_{pi,t} \leq P_{max} \quad (4.16)$$

gdje je $P_{min} = 0 \text{ kW}$, dok je $P_{max} = 3,5 \text{ kW}$.

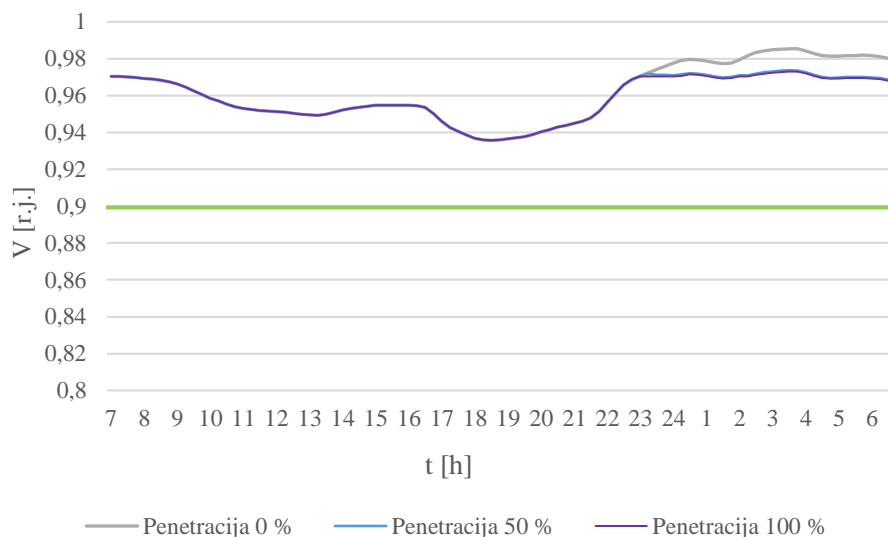
3. Stepen napunjenosti baterije na kraju perioda punjenja, za $t = 96$ mora biti jednako 100 % kapaciteta baterije (20 % koje je bilo prije početka punjenja + 80 % koje je napunjeno u datom periodu):

$$SOC_{i,96} = 100\% SOC_{i,maxv} \quad (4.17)$$

gdje je $SOC_{i,maxv}$ kapacitet vozila priključenog u čvor i .

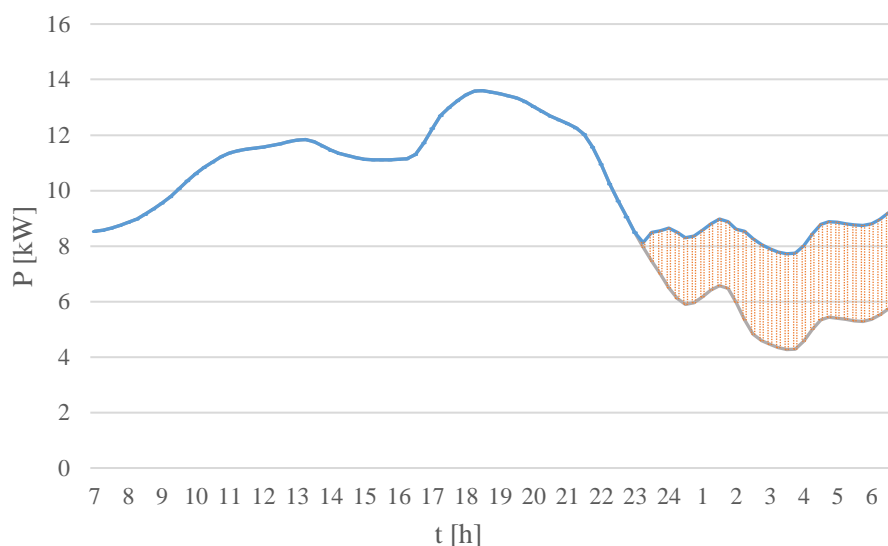
U ovom dijelu je važno naglasiti da je snaga punjenja u periodu od 7 h do 17 h podešena na 0 kW, zbog pretpostavke da punjenje vozila počinje tek po dolasku vozila kući oko 17 h.

Koristeći navedeni algoritam pametnog punjenja za prvu funkciju cilja (minimizacija odstupanja napona) i podešavanjem penetracije vozila na 50 % i 100 %, dobijene vrijednosti napona u čvoru 83 su prikazane na slici 4.4.2.

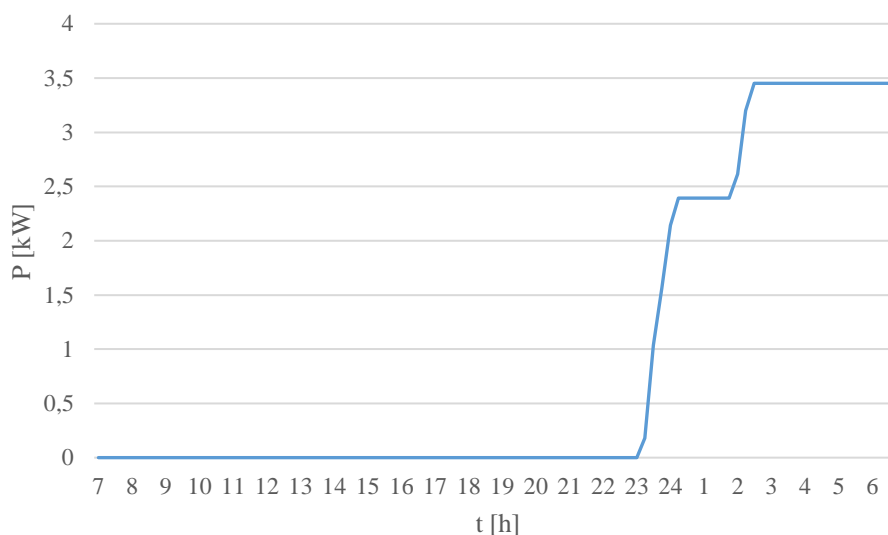


Slika 4.4.2 Promjena napona čvora 83 – minimizacija odstupanja napona

Kao što je i očekivano, za iste parametre mreže i isto opterećenje potrošača, primjenom algoritma pametnog punjenja kojim se minimizuje odstupanje napona postignut je najbolji profil napona u čvoru 83. U periodu punjenja vozila istog modela kao i u prethodna dva slučaja – Mercedes B – došlo je do manjeg pada napona od oko maksimalno 0,008 r.j. (razlika profila napona za slučaj penetracije od 0 %, penetracije od 50 % i penetracije od 100 %). Na slici 4.4.3 je prikazana promjena dijagrama opterećenja čvora 83 do koje je došlo prilikom punjenja električnog vozila, kao i snaga punjenja vozila tokom dana za nivo penetracije od 50 % (slika 4.4.4).



Slika 4.4.3 Dijagram opterećenja čvora 83 za penetraciju od 50 % – minimizacija odstupanja napona

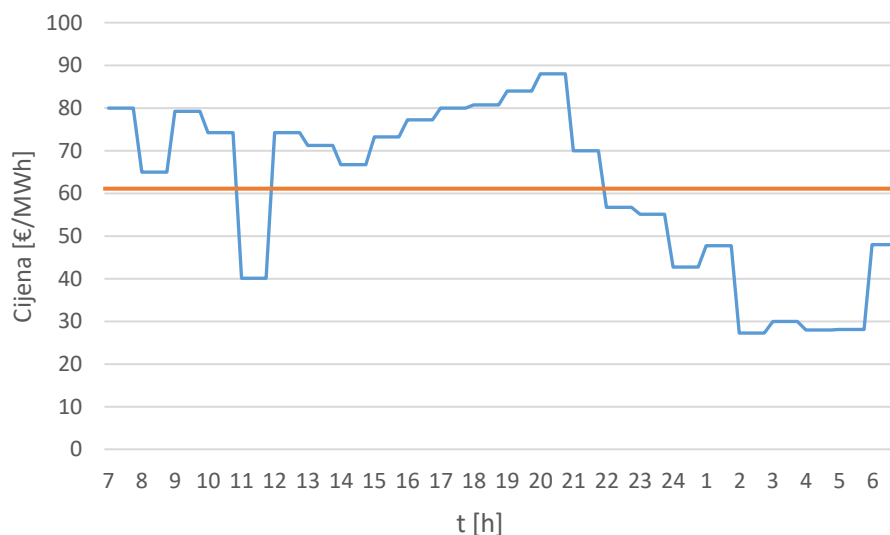


Slika 4.4.4 Promjena snage punjenja u čvoru 83 – minimizacija odstupanja napona

Iako je vozilo u principu priključeno na mrežu od 17 h, sa navedene slike je jasno da njegovo punjenje počinje tek u 23 h, zbog mnogo manjeg opterećenja mreže u tom periodu u odnosu na period od 17 h do 23 h. Snaga punjenja vozila nije konstantna, već je na početku snaga punjenja oko 66 % maksimalne, da bi se oko 2 h (kada snaga opterećenja domaćinstva značajno opadne) povećala na vrijednost od oko 3,47 kW. Sa slike 4.4.3 se jasno vidi da je snaga punjenja utvrđena tako da se dobije približno ujednačeno opterećenje domaćinstva u periodu punjenja vozila, odnosno gotovo da nije došlo do stvaranja novog lokalnog maksimuma opterećenja kao u prethodna dva slučaja.

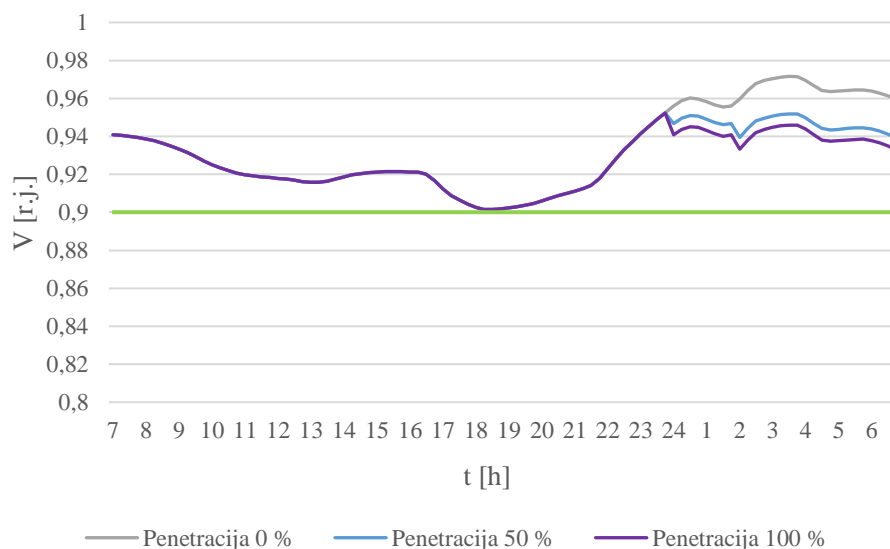
Kako prethodno navedenom optimizacijom punjenja električnog vozila nije uzeto u obzir kretanje cijene električne energije na tržištu, što je jako važan aspekt za korisnika²⁷, primijenjena je druga funkcija cilja, koja uzima u obzir i aspekt napona i aspekt cijene.

Satne vrijednosti cijene električne energije korišćene u simulaciji su prikazane na slici 4.4.5 (CROPEX 25.05.2021. godine). Sa navedene slike se vidi da već poslije 22 h, cijena počinje značajno da opada.



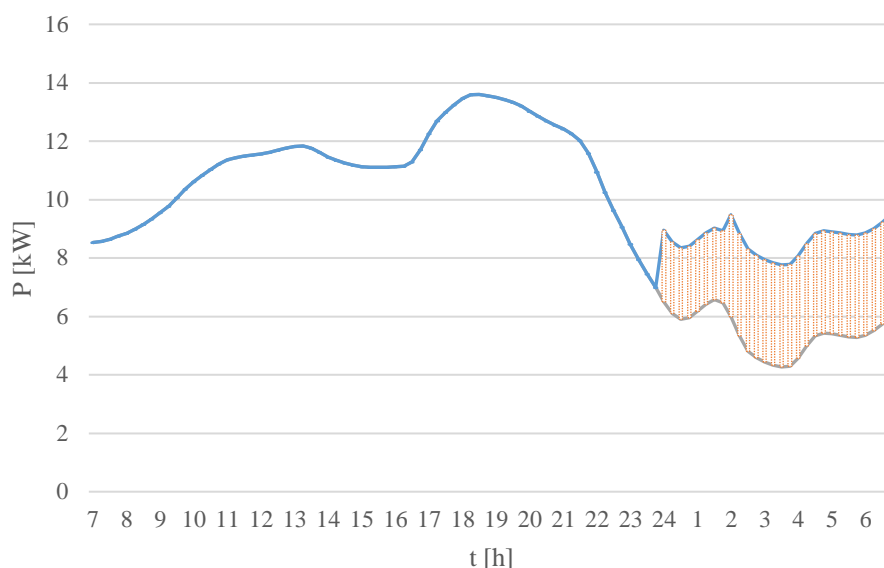
Slika 4.4.5 Promjena cijene električne energije na berzi u Hrvatskoj (25.05.2021. godine)

U ovom slučaju, dobijene su vrijednosti napona čvora 83 i snage punjenja vozila u periodu od 7 h do 6 h prikazane na slici 4.4.6.

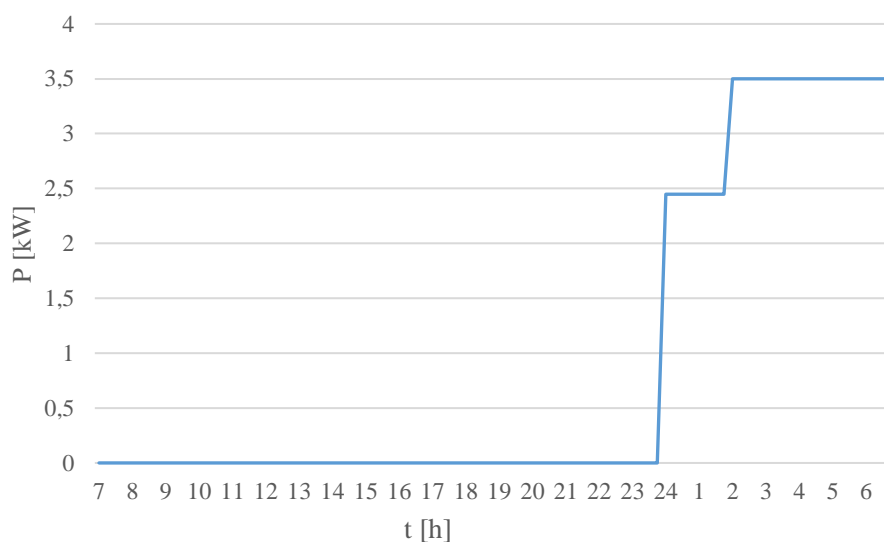


Slika 4.4.6 Promjena napona čvora 83 – minimizacija odstupanja napona i troškova preuzete električne energije

²⁷ U pogledu utvrđivanja kako će povećanje snage opterećenja uticati na račun za preuzetu električnu energiju.



Slika 4.4.7 Dijagram opterećenja čvora 83 za penetraciju od 50 % – minimizacija odstupanja napona i troškova preuzete električne energije



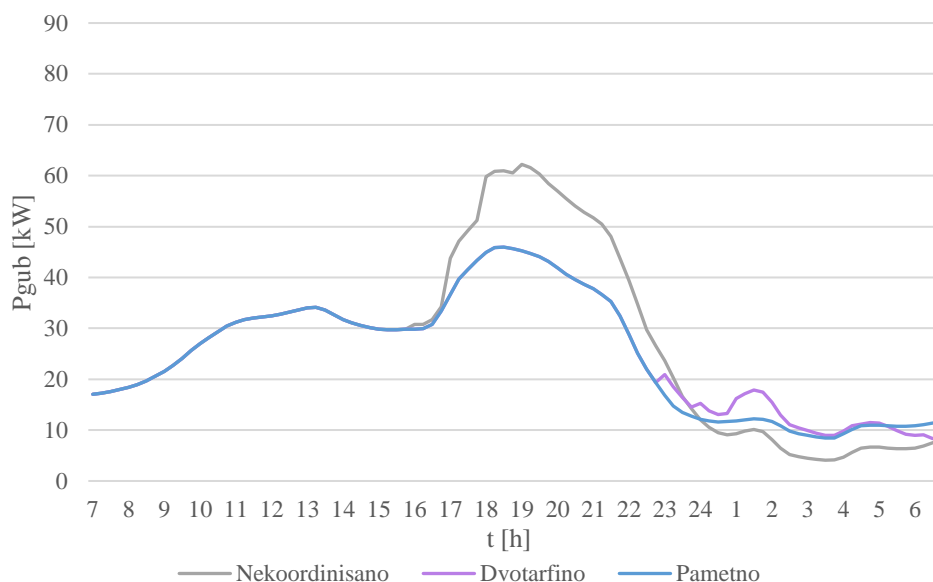
Slika 4.4.8 Promjena snage punjenja vozila u čvoru 83 za penetraciju od 50 % – minimizacija odstupanja napona i troškova preuzete električne energije

Kako su u suštini odabrane dvije funkcije cilja (i minimizacija odstupanja napona i cijene električne energije), odstupanje napona je ostalo u dozvoljenim granicama, ali nije vršeno njegovo dalje povećavanje, dok se početak punjenja električnog vozila pomjerio na 24 h (slika 4.4.8), kada je cijena niža. Takođe, kako je snaga punjenja na početku manja, kao i u prethodnom slučaju vršeno je ujednačavanje dijagrama opterećenja domaćinstva u periodu punjenja vozila (slika 4.4.7). Velika prednost ovog slučaja u odnosu na prethodni je u tome što se u njemu preuzima mnogo manja reaktivna snaga iz prenosnog sistema u odnosu na slučaj kada se samo minimizuje odstupanje napona.

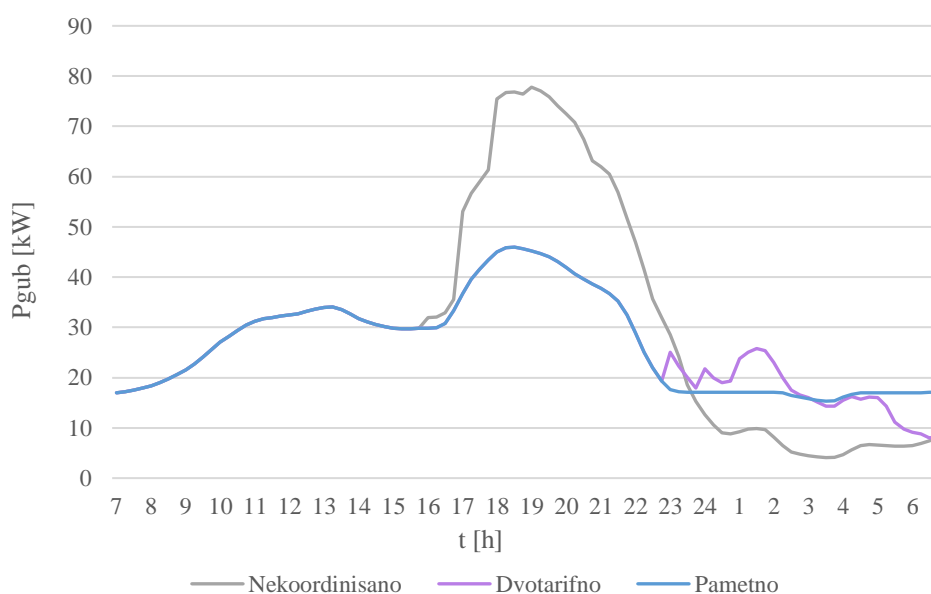
Na kraju, model je riješen primjenom funkcije minimizacije aktivne snage gubitaka i izvršeno je poređenje sa promjenom gubitaka u mreži u prethodna dva slučaja (nekoordinisano

punjenje i punjenje tokom niže tarife) za penetraciju vozila od 50 % i 100 %. Kako su varijabilni gubici recipročni aktivnoj i reaktivnoj snazi koja se prenosi vodom, povećanje vršne snage dovodi i do povećanja tehničkih gubitaka. Osim što su povećani gubici indikator smanjene efikasnosti korišćenja mreže, povećani gubici impliciraju povećanje količine električne energije koja je potrebna za njihovo pokrivanje.

Na slikama 4.4.9 i 4.4.10 su prikazane vrijednosti promjene snage gubitaka za slučaj nekoordinisanog punjenja, punjenja tokom niže tarife i pametnog punjenja kojim se optimizuje vrijednost gubitaka u mreži.



Slika 4.4.9 Promjena snage gubitaka u mreži za nekoordinisano, punjenje tokom niže tarife i pametno punjenje u slučaju penetracije električnih vozila od 50 %



Slika 4.4.10 Promjena snage gubitaka u mreži za nekoordinisano, punjenje tokom niže tarife i pametno punjenje u slučaju penetracije električnih vozila od 100 %

Kao što je i očekivano, prilikom nekoordinisanog punjenja dolazi do značajnog povećanja gubitaka tokom vršnih sati, i to u slučaju 100 % penetracije električnih vozila snaga gubitaka se povećava za oko 40 %. Povećanje snage gubitaka u ovom periodu uzrokuje značajno povećanje troškova za pokrivanje gubitaka u distributivnom sistemu. Naime, ukoliko se energija za pokrivanje gubitaka kupuje na berzi, a cijena električne energije je najveća tokom vršnih sati (period velike potražnje), troškovi za pokrivanje gubitaka će biti značajno povećani.

Sa druge strane, punjenjem vozila tokom niže tarife dolazi do povećanja gubitaka od oko 2,57 puta u 1 h. Međutim, imajući u vidu malu vrijednost gubitaka u ovom periodu, ovo povećanje neće značajno uticati na povećanje troškova za pokrivanje gubitaka. Sa druge strane, primjenom funkcije minimizacije gubitaka se dobijaju gotovo ujednačeni gubici u periodu punjenja vozila. Odnosno, izbjegava se pojava velikih lokalnih maksimuma opterećenja koji sa sobom nose i nešto veću cijenu električne energije. Iako u kratkom periodu snaga gubitaka prilikom punjenja tokom niže tarife je manja nego u slučaju koordinisanog punjenja, činjenica je da se u ovom slučaju ne formira novi lokalni maksimum opterećenja i samim tim ne postoji opasnost od pretjeranog povećavanja troškova gubitaka.

Posmatrajući rezultate simulacija za sve tri varijante, jasno je da se koordinacijom punjenja električnih vozila postižu mnogo bolje prilike u sistemu u odnosu na prve dvije varijante. Nekoordinisanim punjenjem električnih vozila dolazi do značajnog smanjenja napona u čvorovima mreže, što može dovesti do pada napona ispod dozvoljenog opsega odstupanja definisanog standardom EN 50160. Takođe, ova varijanta punjenja dovodi do povećavanja vršnog opterećenja sistema, koje može rezultirati ubrzanom potrebom za povećanjem kapaciteta voda/vodova ili trafostanice/trafostanica u sistemu, čime bi značajno porastao nivo investicija u distributivni sistem. Porast vršnog opterećenja sistema posljedično dovodi i do povećanja gubitaka u mreži, čime rastu troškovi za pokrivanje gubitaka u sistemu.

Sa druge strane, demonstrirano je da se punjenjem tokom niže tarife (na tržištima koja imaju taj vid vremenske granularnosti) ostvaruje jako mali uticaj na promjene prilika u mreži, naročito poredeći ovu varijantu sa varijantom nekoordinisanog punjenja. Kako je opterećenje tokom noći malo, povećanje opterećenja usljed punjenja električnih vozila ne dovodi do značajnog smanjenja napona niti do drastičnog povećanja gubitaka u sistemu. Međutim, kao što je i prethodno navedeno, u ovom slučaju postoji opasnost od prevelikog odziva potrošača tokom noći, kada bi došlo do stvaranja dodatnog vršnog opterećenja u tom periodu, što bi, nakon dodavanja opterećenja usljed punjenja električnih vozila, moglo rezultirati smanjenjem napona ispod dozvoljene donje granice odstupanja, kao i povećanjem gubitaka u sistemu. Ovaj aspekt je naročito važan imajući u vidu da se u ni u ovoj situaciji ne može vršiti kontrola nad odzivom potrošača, već bi se nekontrolisanim punjenjem i pomjeranjem ostale potrošnje mogla postići slična situacija kao u prethodnom slučaju.

Na kraju, predloženi model koordinacije punjenja električnih vozila omogućava optimizaciju punjenja električnih vozila kojom se minimizuje uticaj punjenja vozila na mrežu. Za razliku od prethodne dvije varijante, u ovom slučaju promjena dijagrama opterećenja potrošača ne dovodi do stvaranja novog vršnog opterećenja, niti do pogoršavanja prilika u sistemu, jer se primjenom ovog modela sa odgovarajućim funkcijama cilja, punjenje vozila raspoređuje tokom časova sa manjim opterećenjem. Demonstrirano je da se u zavisnosti od odabrane funkcije cilja optimizuju određene promjenljive u sistemu, dok se primjenom kombinacije dvije funkcije cilja može postići balans između odabranih vrsta optimizacije. Pored navedenog, za sve tri odabrane funkcije cilja je došlo do poravnanja dijagrama

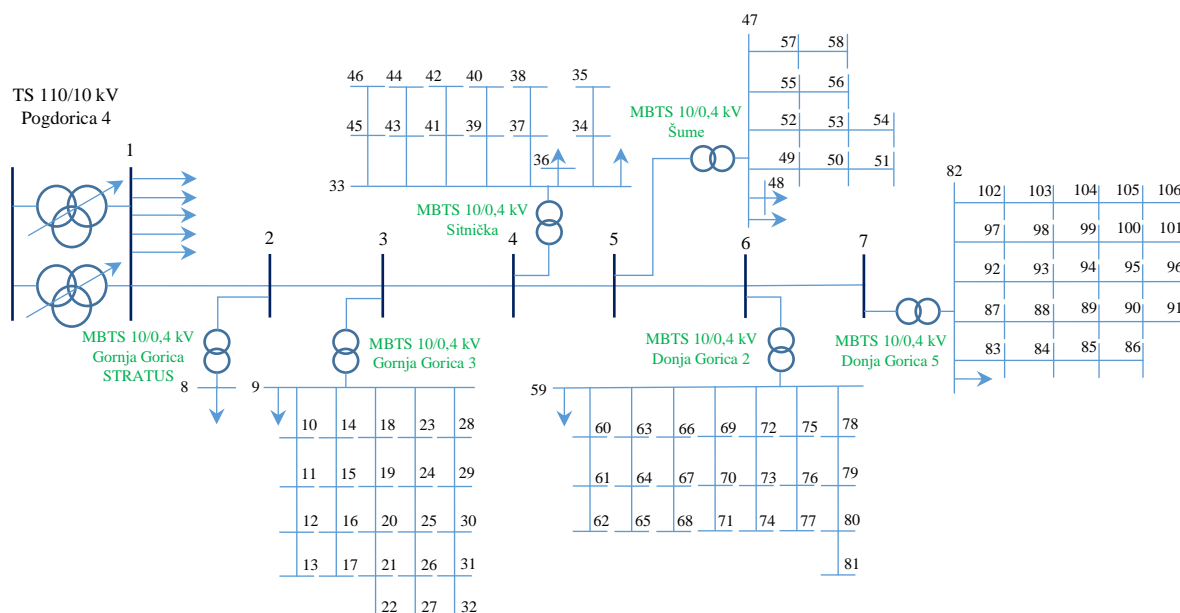
opterećenja u periodu punjenja električnih vozila, čime se, uopšteno govoreći, postiže veća efikasnost korišćenja mreže. Imajući prethodno navedeno u vidu, jasno je da varijanta tri pokazuje najbolje karakteristike i sa sobom nosi najmanji rizik od pogoršavanja prilika u sistemu usljed promjene dijagrama opterećenja u mreži. Dodatno, važno je naglasiti da je i pored značajne kompleksnosti modelovane mreže, postignuta velika brzina konvergencije algoritma pametnog punjenja.

4.5. Praktična primjena – izvod 10 kV Radoje Dakić 2

Kako bi opravdanost zaključaka iznesenih u prethodnom dijelu bila provjerena u realnom sistemu, izvršena je i simulacija sve tri varijante na dijelu 10 kV mreže u Podgorici, na izvodu 10 kV Radoje Dakić 2 iz TS 110/10 kV Podgorica 4²⁸. Ova mreža je u čvoru 7 povezana sa drugim 10 kV izvodom preko prekidača.

Jednopolna šema navedenog 10 kV izvoda je prikazana na slici 4.5.1. Važno je napomenuti da su zbog manjka raspoloživih podataka o 0,4 kV mreži navedenog izvoda, uzete određene aproksimacije koje se odnose na parametre 0,4 kV mreže. Broj potrošača po 0,4 kV izvodu je takođe aproksimiran, zbog ograničenja modela.

Dakle, posmatran je srednjenaponski izvod iz TS 110/10 kV Podgorica 4 sa ukupno 106 čvorova (slika 4.5.1). U skladu sa raspoloživim informacijama, na navedeni izvod su priključene sljedeće trafostanice: MBTS 10/0,4 kV Gornja Gorica Stratus, MBTS 10/0,4 kV Gornja Gorica 3, MBTS 10/0,4 kV Sitnička, MBTS 10/0,4 kV IRD Šume, MBTS 10/0,4 kV Donja Gorica 2 i MBTS Donja Gorica 5.

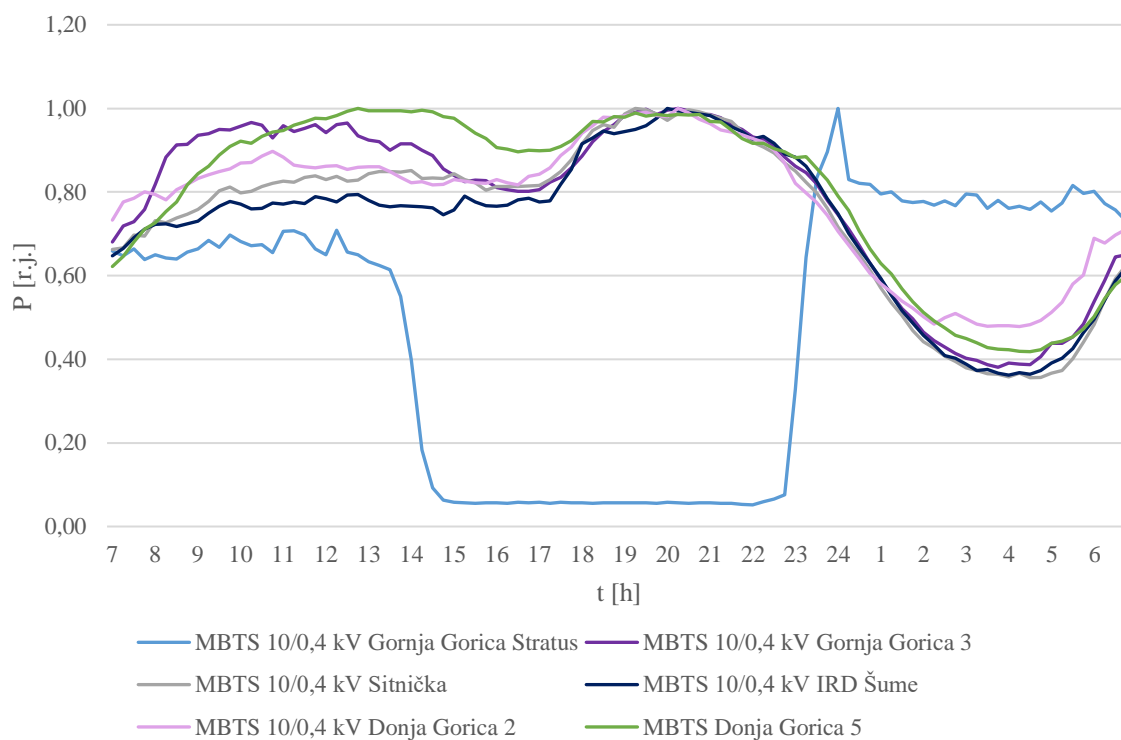


Slika 4.5.1 Izvod Radoje Dakić 2 iz TS 110/10 kV Podgorica 4 (sa aproksimiranom 0,4 kV mrežom)

Podaci o petnaestominutnoj potrošnji po TS 10/0,4 kV za mart 2020. godine su pretvoreni u odgovarajuće vrijednosti snage, nakon čega je određen prosječni dnevni dijagram za mart za

²⁸ Podaci su dobijeni od strane Operatora distributivnog sistema u Crnoj Gori – Crnogorskog elektrodistributivnog sistema (CEDIS)

svaku od TS 10/0,4 kV. Jedinični dijagrami potrošnje za sve TS 10/0,4 kV priključene na posmatrani izvod su prikazani na slici 4.5.2.



Slika 4.5.2 Jedinični dijagrami potrošnje za TS 10/0,4 kV na izvodu Radoje Dakić 2

Važno je naglasiti da je specifičnost dijagrama opterećenja za MBTS 10/0,4 kV Gornja Gorica Stratus posljedica činjenice da u ovom slučaju nije riječ o domaćinstvu, već o industrijskom potrošaču, kojem snaga potrošnje tokom dana pada na vrijednost blisku nuli, dok je opterećenje tokom niže tarife mnogo veće.

Dostavljeni podaci o petaestominutnoj potrošnji po TS 10/0,4 kV su, uz pretpostavku faktora jednovremenosti 1, raspodijeljeni između odabranog broja čvorova priključenih na tu trafostanicu primjenom normalne raspodjele²⁹, ali tako da njihova suma odgovara ulaznom podatku o opterećenju trafostanice.

Važno je naglasiti da su u ovom slučaju korišćene iste formule za promjenljive kao u prvobitnom modelu.

4.5.1. Nekoordinisano punjenje

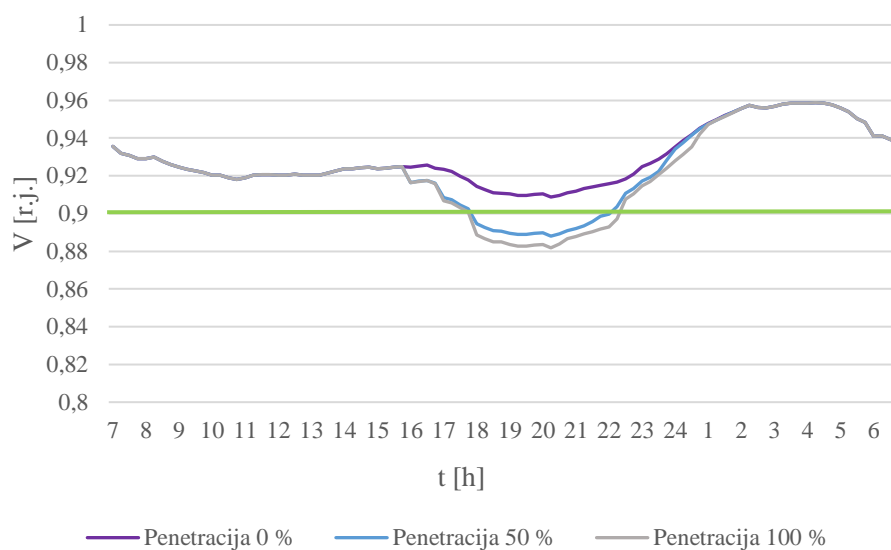
Punjenje električnih vozila u ovom slučaju je modelovano na isti način kao u osnovnoj varijanti 1. Dakle, čvorovi (od 9 do 106^{30}) na koje će biti priključena vozila su odabrani primjenom binomne raspodjele, dok je model vozila (od 1 do 4 – Potpoglavlje 4.1) u pojedinačnom čvoru odabran primjenom uniformne raspodjele. Imajući u vidu da su korišćeni isti modeli vozila, punjenje pojedinačnog modela traje oko tri sata i 45 minuta za *Mitsubishi iMiEV*, pet sati i 30 minuta za *Fiat 500e*, oko šest sati i 30 minuta za *Mercedes B* i oko 7 sati

²⁹ Broj potrošača priključenih po pojedinačnoj trafostanici je mnogo veći od modelovanog. Međutim, zbog ograničenja softvera i preglednije analize je uzet manji broj potrošača sa faktorom jednovremenosti 1.

³⁰ Čvorovi na koje su priključena domaćinstva.

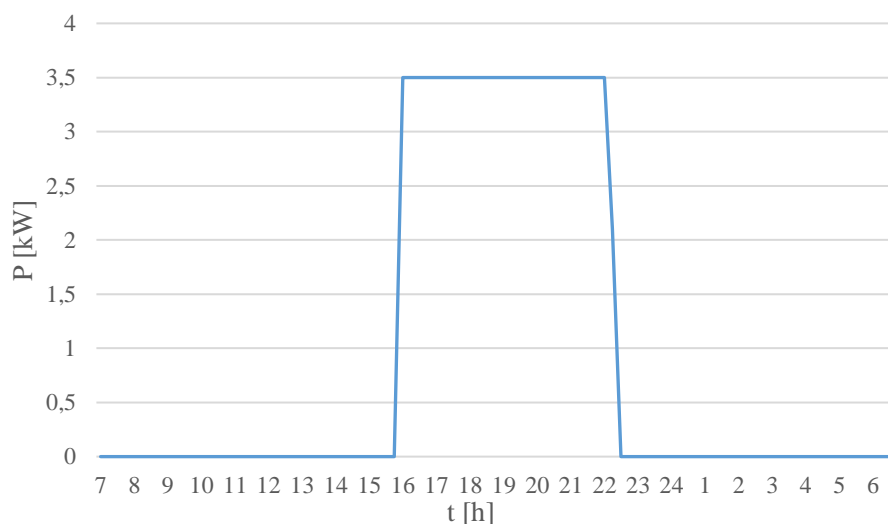
za *Nissan Leaf*. Početak punjenja vozila može biti izabran u 16 h, 17 h, 18 h ili 19 h, u zavisnosti od broja generisanog iz normalne raspodjele.

Na slici 4.5.3 je prikazana promjena naponskog profila u čvoru 81, koji se nalazi na kraju osmog izvoda iz MBTS 10/0,4 kV Donja Gorica 2 za različite nivoe penetracije električnih vozila: 0 %, 50 % i 100 %.

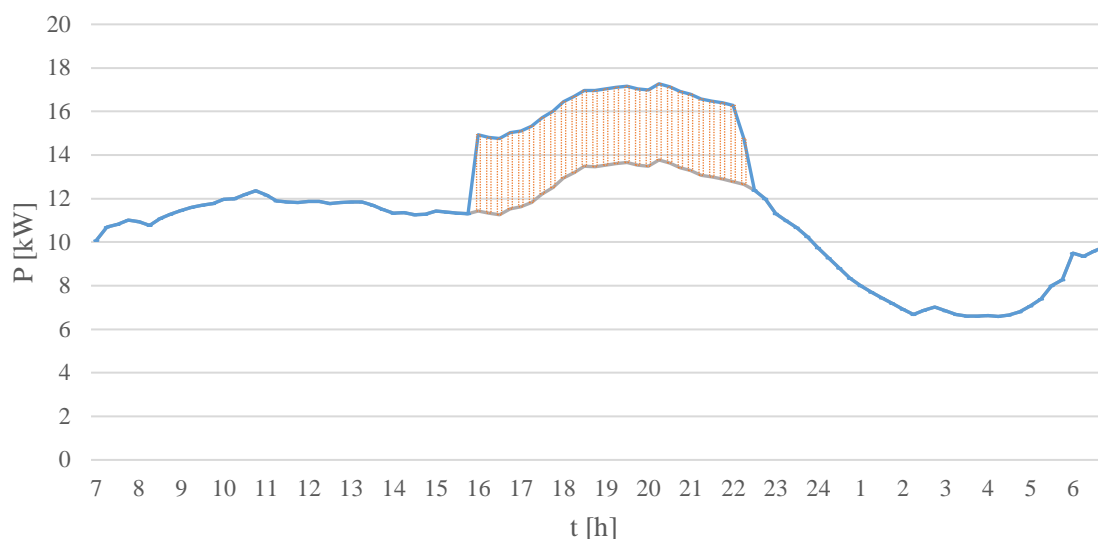


Slika 4.5.3 Promjena napona čvora 81 – nekoordinisano punjenje

Primjenom uniformne raspodjele je dobijeno da je na čvor 81 priključeno vozilo marke *Mercedes B*, čije je punjenje započeto u 16 h i trajalo je do 22 h i 30 minuta (slika 4.5.4). Samim tim, došlo je do povećanja snage opterećenja u tom periodu, kao što je prikazano na slici 4.5.5.



Slika 4.5.4 Promjena snage punjenja električnog vozila u čvoru 81 – nekoordinisano punjenje



Slika 4.5.5 Dijagram opterećenja čvora 81 – nekoordinisano punjenje

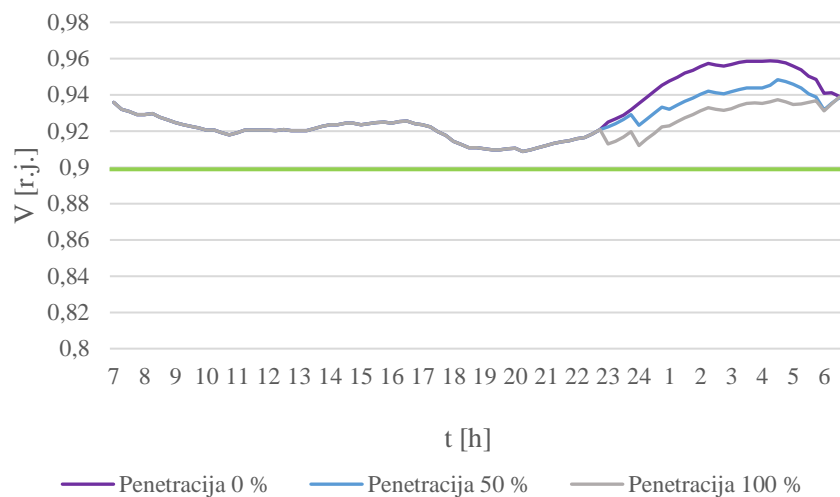
Iako je napon na čvoru 81 prije penetracije električnih vozila održavan na nešto većoj vrijednosti u odnosu na donju granicu 0,9 r.j, nakon penetracije vozila od 50 % već oko 18 h dolazi do pada napona u čvoru ispod donje granice. Dakle, može se izvesti isti zaključak kao u modelu testne mreže – nekontrolisano punjenje vozila u periodu vršnog opterećenja će najvjerojatnije dovesti do narušavanja tehničkih ograničenja u sistemu, što bi iziskivalo dodatna ulaganja u mrežu.

4.5.2. Punjenje tokom niže tarife

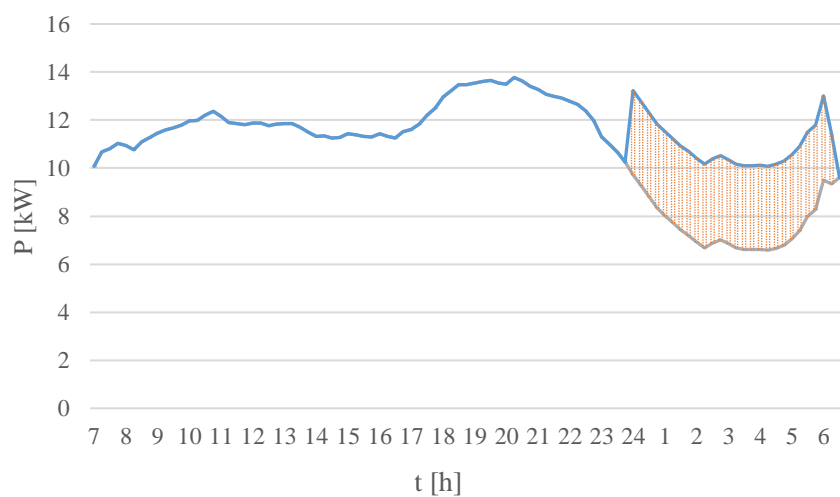
Kako je u Crnoj Gori već uveden koncept dvojne tarife – različite cijene tokom dana i noći, ova varijanta predstavlja realnu, ali i prilično optimističnu pretpostavku. Naime, u ovom slučaju je pretpostavljeno da će smanjenje cijene električne energije tokom noći naići na veliki odziv kod potrošača, odnosno na odziv kod svih potrošača koji imaju električna vozila, kako bi ograničili povećanje računa za preuzetu električnu energiju. U realnosti se može očekivati da određeni potrošači neće reagovati na ovaj cjenovni signal, bilo zbog potrebe za punjenjem vozila prije navedenog perioda, bilo zbog manje zainteresovanosti za promjenu cijene električne energije.

U svakom slučaju, cilj je utvrditi kakve bi bile promjene u sistemu u očekivanom najgorem mogućem slučaju, odnosno kada se punjenje vozila svih potrošača odvija u „istom“ periodu. Odabrani modeli i mogući počeci punjenja vozila (23 h, 24 h, 1 h ili 2 h) su isti kao i u slučaju osnovne varijante 2.

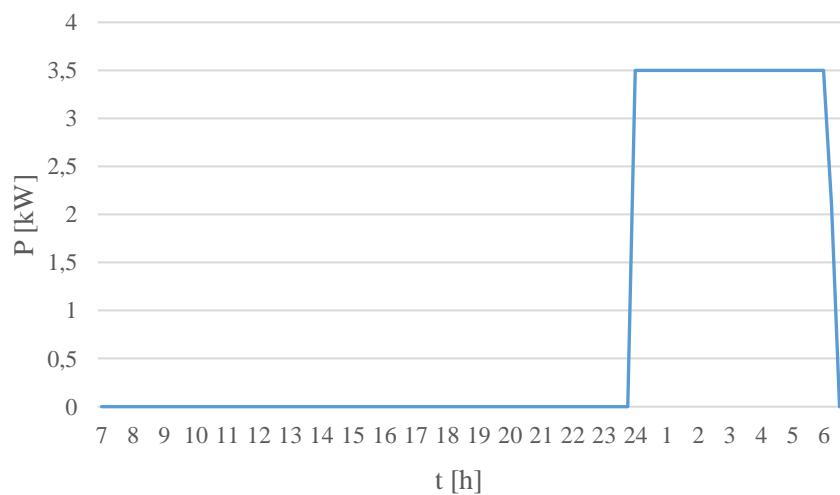
Na slikama 4.5.6, 4.5.7 i 4.5.8 su prikazane vrijednosti napona, dijagrama opterećenja i snage punjenja u čvoru 81.



Slika 4.5.6 Promjena napona čvora 81 – punjenje tokom niže tarife



Slika 4.5.7 Dijagram opterećenja čvora 81 – punjenje tokom niže tarife

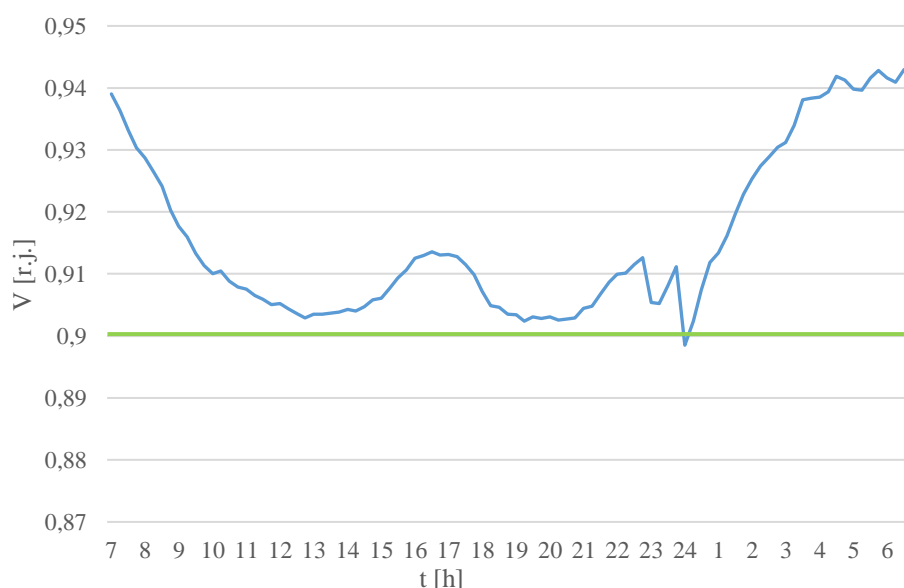


Slika 4.5.8 Promjena snage punjenja u čvoru 81 - punjenje tokom niže tarife

Na čvor 81 je priključeno vozilo *Mercedes B*, čije punjenje počinje u 24 h i traje do 6 h i 30 minuta ujutro. Sa prikazane slike je jasno da pri iznijetim pretpostavkama nije došlo do pada napona ispod donje granice od 0,9 r.j. u prikazanom čvoru, iako je oko 24 h (kada je vozilo počelo da se puni) došlo do izraženog pada napona u posmatranom čvoru.

Međutim, sa druge strane, u čvoru 96 (slika 4.5.9) je došlo do, iako malog, pada napona ispod donje granice utvrđene standardom EN 50160. Iako je odstupanje od donje granice jako malo, jasno je da bi u slučaju da se snaga potrošnje poveća za nekoliko procenata tokom noći došlo do još većeg odstupanja napona, koje bi iziskivalo dodatne troškove za rješavanje ovog problema.

Pored navedenog, važno je naglasiti da postoji rizik da dođe do formiranja dodatnog vršnog opterećenja u ovom periodu, u slučaju nekontrolisanog pomjeranja ostale potrošnje iz perioda više tarife u nižu, čime bi se dobila slična situacija kao u slučaju nekoordinisanog punjenja.

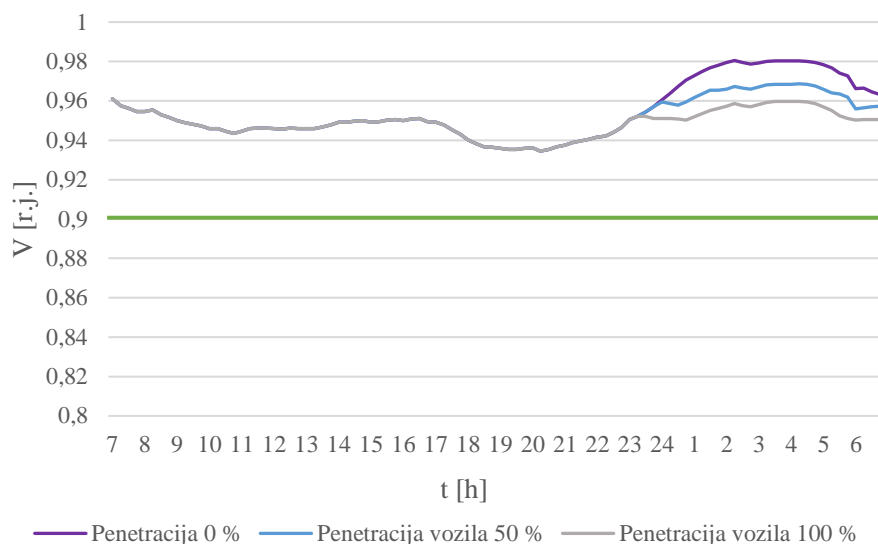


Slika 4.5.9 Promjena napona u čvoru 96 – punjenje tokom niže tarife

4.5.3. Pametno punjenje

Na kraju, izvršena je simulacija pametnog punjenja na dijelu distributivne mreže u Podgorici – Izvod Radoje Dakić 2 iz TS 110/10 kV Podgorica 4.

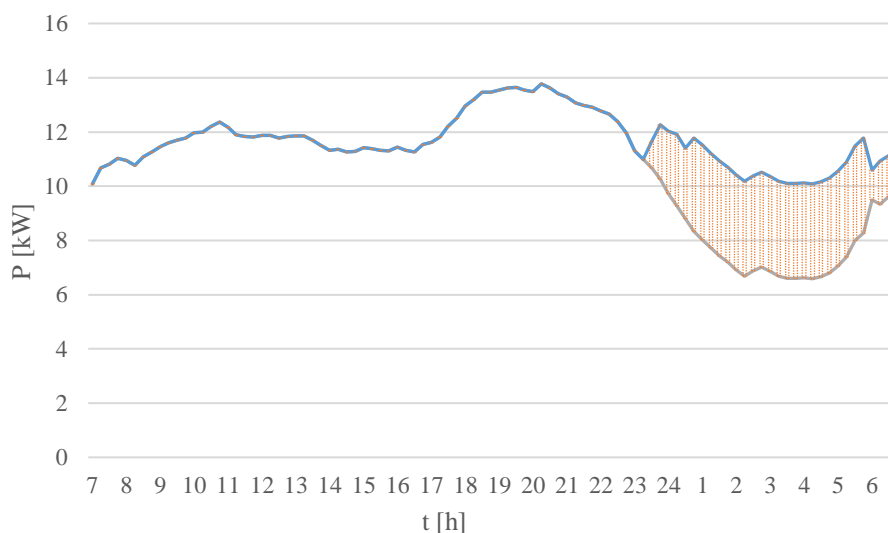
Prilikom primjene algoritma pametnog punjenja kojim se minimizuje odstupanje napona, dobijene vrijednosti napona u čvoru 81 su prikazane na slici 4.5.10.



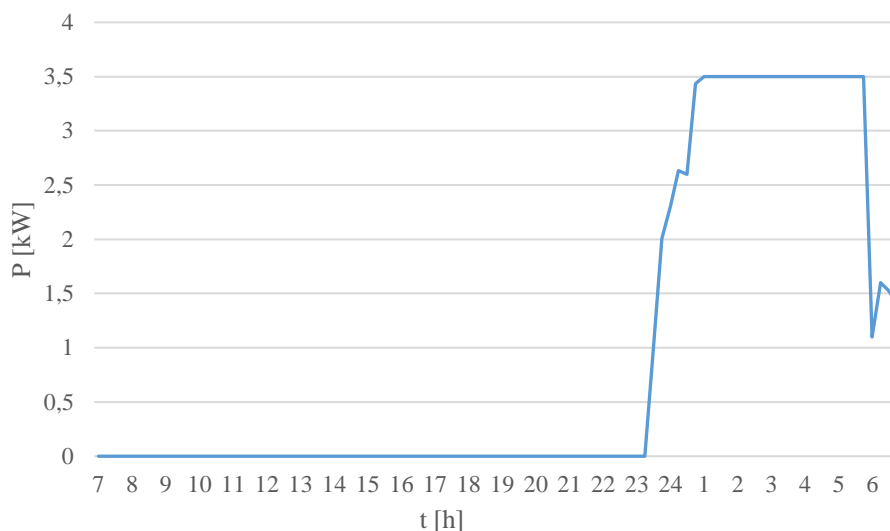
Slika 4.5.10 Promjena napona čvora 81 – minimizacija odstupanja napona

U odnosu na prethodne dvije varijante, vidljivo je da se u ovoj situaciji dobijaju mnogo bolje naponske prilike u sistemu, iz čega se može izvesti zaključak da bi sistem mogao da izdrži dodatnu vrijednost opterećenja, a da ne dođe do pada napona ispod dozvoljene vrijednosti.

Na slikama 4.5.11 i 4.5.12 je prikazan dijagram opterećenja čvora 81 kao i optimalne vrijednosti snage punjenja vozila marke *Mercedes B* kojim se postižu minimalna odstupanja napona u slučaju penetracije vozila od 100 %. Snaga punjenja vozila je raspoređena tako da ima najveću vrijednost u periodu od 1 h do 6 h, kada je opterećenje najmanje, dok je ostatak snage, potreban da se napuni 22,4 kWh baterije, raspoređen tokom sati kada je snaga opterećenja malo veća. Takođe, važno je naglasiti da usljed ograničenja maksimalne snage punjenja snagom utičnice, ne postoji veliki prostor za varijaciju snage punjenja, posebno imajući u vidu da u ovom slučaju vršno opterećenje počinje značajnije da se smanjuje tek oko 23 h, a da vozilo mora biti napunjeno do kraja do 7 h sljedećeg jutra.



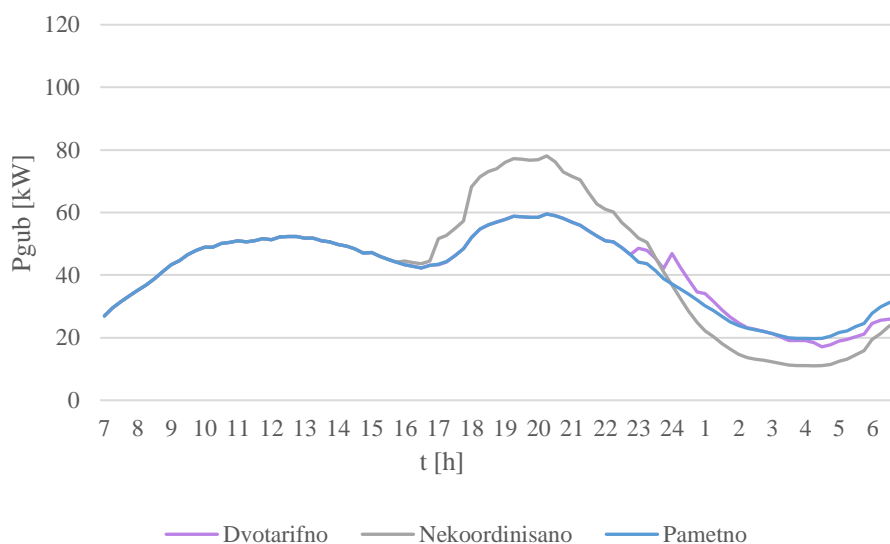
Slika 4.5.11 Dijagram opterećenja čvora 81 – minimizacija odstupanja napona



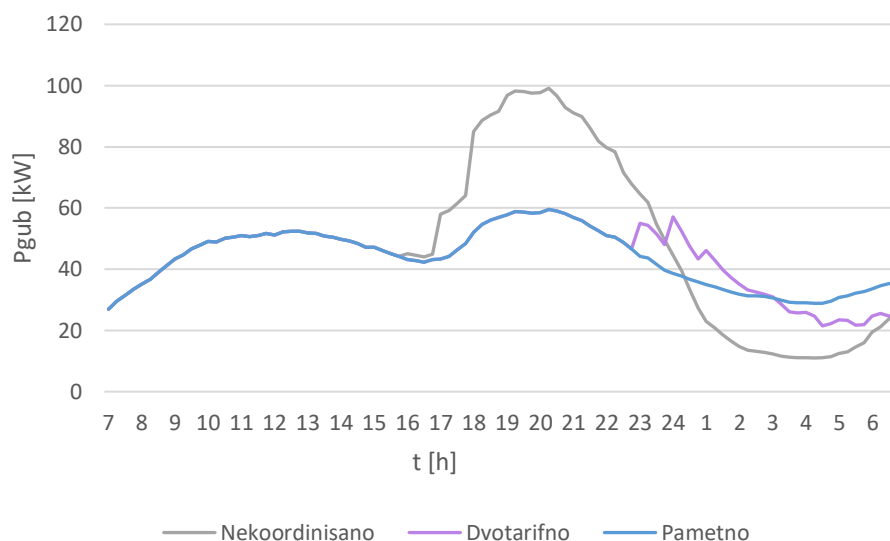
Slika 4.5.12 Promjena snage punjenja u čvoru 81 – minimizacija odstupanja napona

Kako distributivni potrošači u Crnoj Gori nisu izloženi satnim promjenama cijene na tržištu električne energije, već se cijene za električnu energiju utvrđuju bilateralnim ugovorom između snabdjevača i proizvođača, u ovom dijelu neće biti sprovedena simulacija kojom se minimizuju i odstupanja napona i troška za preuzetu električnu energiju.

Na kraju, primijenjen je algoritam pametnog punjenja kojim se minimizuju gubici u ovom dijelu sistema za penetraciju električnih vozila od oko 50 % i 100 % za sve tri varijante punjenja (slike 4.5.13 i 4.5.14).



Slika 4.5.13 Promjena snage gubitaka u mreži za nekoordinisano, punjenje tokom niže tarife i pametno punjenje u slučaju penetracije električnih vozila od 50 %



Slika 4.5.14 Promjena snage gubitaka u mreži za nekoordinisano, punjenje tokom niže tarife i pametno punjenje u slučaju penetracije električnih vozila od 100 %

Sa slika je vidljivo da se najveća vrijednost snage gubitaka javlja prilikom nekoordinisanog punjenja i to tokom vršnih sati, kada povećani gubici mogu stvoriti najviše problema u sistemu. Sa druge strane, punjenjem vozila tokom niže tarife i pametnim punjenjem kojim se minimizuju gubici se postižu mnogo bolji rezultati. Za razliku od punjenja tokom niže tarife, pametnim punjenjem se izbjegava pojava značajnih lokalnih maksimuma snage gubitaka tokom noći. Odnosno, dobija se mnogo ujednačenija kriva gubitaka, što je indikator ujednačenijeg opterećenja sistema u tom periodu, tj. optimalnijeg korišćenja sistema.

5. Koordinacija punjenja električnih vozila u savremenom distributivnom sistemu

Kao što je već istaknuto u Poglavlju 2, u novonastalim okolnostima savremeni distributivni sistem postaje tačka spajanja različitih distribuiranih tehnologija, koje imaju mogućnost da pružaju usluge sistemu, prenosnog sistema i potrošača. Integracijom distribuiranih resursa električne energije, dolazi do promjene uslova i tokova električne energije u distributivnom sistemu. Samim tim, posmatranje distributivnog sistema kao mreže koja ima ulogu da isporuči energiju dobijenu iz prenosnog sistema do distributivnih potrošača, gubi na značaju.

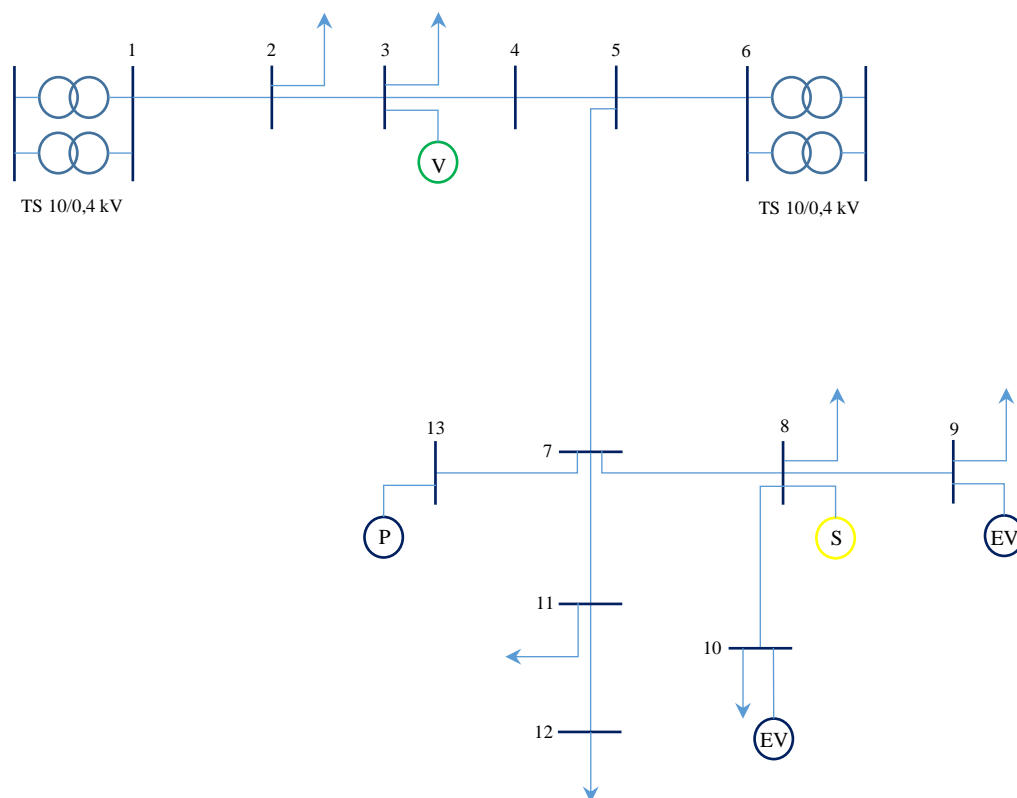
Za razliku od prethodne analize, u ovom poglavlju će biti obrađen slučaj punjenja električnih vozila u savremenom distributivnom sistemu, tj. distributivnom sistemu koji sadrži distribuirane izvore električne energije i u kojem je omogućeno korišćenje električnog vozila kao sistema za skladištenje električne energije, koji može da injektira energiju u mrežu kroz V2G koncept.

Imajući u vidu da distribuirani proizvođači iz obnovljivih izvora predstavljaju „neupravljive“, intermitentne elektrane, njihova kombinacija sa odgovarajućim skladišnim kapacitetima (u ovom slučaju električnim vozilima) može da obezbijedi mnogo bolji odziv i fleksibilnost usluga koje ove elektrane mogu da pruže sistemu. Međutim, bez odgovarajuće koordinacije rada ova dva tipa distribuiranih resursa, stvarna valorizacija značaja koji distribuirani izvor ima za dati sistem može biti narušena sa jedne strane, a nekontrolisano punjenje vozila može dovesti do narušavanja tehničkih ograničenja u sistemu, sa druge strane.

S tim u vezi, cilj analize u ovom slučaju je prikaz benefita koje koordinacija punjenja električnih vozila u sistemu sa distribuiranim izvorima može da obezbijedi, kao i poređenje rezultata sa slučajem kada se električna vozila pune nekontrolisano tokom perioda vršnog opterećenja sistema.

5.1. Početne pretpostavke i ulazni podaci

Za potrebe analize će biti posmatran dio 0,4 kV mreže sa 13 čvorova prikazan na slici 5.1.1. Važno je naglasiti da je u ovom slučaju posmatrana mreža u gradskom području, gdje je na pojedine čvorove – 2, 3, 8, 9, 10, 11, 12 – priključena grupa potrošača u okviru zgrade (jedno mjesto priključenja po zgradi). Čvorovi 1 i 6 predstavljaju tačke povezivanja sa prenosnim sistemom električne energije, dok je na čvor 3 priključeno nekoliko mini vjetroagregata (odvojeno mjerno mjesto u odnosu na zgradu priključenu na isti čvor), a na čvor 8 mini solarna elektrana (odvojeno mjerno mjesto u odnosu na zgradu priključenu na isti čvor). Na čvor 9 je priključeno 12 električnih vozila u periodu od 7 h do 18 h (period tokom radnog vremena), dok je na čvor 10 priključeno ukupno 20 električnih vozila od 17 h do 7 h, koja je potrebno napuniti do punog kapaciteta baterije tokom tog perioda. Dodatno, definisano je da je na čvor 13 priključen parking na kome se nalaze tri brze (jednosmjerne) javne punionice, snage po 90 kW.



Slika 5.1.1 Topologija dijela 0,4 kV distributivnog sistema korišćenog u simulaciji

Punjenje vozila na javnim punionicama je modelovano korišćenjem pojednostavljenog M/M/S modela čekanja. Naime, postoje tri punionice koje predstavljaju pružaoce usluga električnim vozilima ($S=3$). Definisano je da punjenje jednog vozila traje tačno 30 minuta. Kako je riječ o brzim punionicama, važno je naglasiti da se za 30 minuta napuni samo 80 % ukupnog kapaciteta baterije električnog vozila. Dolazak vozila na parking je modelovan primjenom *Poisson*-ove raspodjele [79] sa stopom očekivanih dolazaka $\lambda = 0,5$ za period od 7 h do 11 h, 2 za period od 11 h do 15 h i 1 za period od 15 h do 23 h, dok je nakon toga $\lambda = 0$. U principu, ukoliko u trenutku dolaska određenog vozila na parking postoji makar jedna slobodna punionica, vozilo će biti priključeno na tu punionicu. Ukoliko je u trenutku dolaska slobodno više punionica, vozilo se priključuje na najbližu (redni broj punionice definiše njenu udaljenost od mjesta ulaska na parking). Punjenje se vrši po principu *first-come-first-served*, odnosno ukoliko se nakupi nekoliko vozila u redu, kada se oslobodi jedno mjesto, prvo vozilo iz reda započinje punjenje.

U cilju prikaza intermitentne proizvodnje vjetroagregata, brzina vjetra je modelovana primjenom *Weibull*-ove raspodjele. Naime, na osnovu podataka o brzini vjetra na lokaciji Aerodroma Podgorica za jul 2020. godine³¹, određeni su parametri (faktor skale i faktor oblika) *Weibull*-ove raspodjele. Nakon toga, za svaki od petnaestominutnih intervala je generisana pripadajuća brzina vjetra iz skupa brzina koje prate *Weibull*-ovu raspodjelu definisanu dobijenim parametrima [80]. Na kraju, snaga na izlazu iz vjetroagregata je dobijena primjenom formule 5.1[81].

³¹ Podaci dostupni na: <https://www.wunderground.com/history/daily/LYPG/date/2020-8-11>

$$P_V = \begin{cases} 0, & \text{za } v < v_{cut-in} \\ \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot C_p \cdot N_b \cdot N_g \cdot v^3, & v_{cut-in} \leq v \leq v_n \\ P_{max}, & v_n < v \leq v_{cut-out} \\ 0, & \text{za } v > v_{cut-out} \end{cases} \quad (5.1)$$

gdje je v brzina vjetra [m/s]; v_{cut-in} minimalna brzina vjetra pri kojoj lopatice vjetroturbine počinju da se okreću [m/s]; v_n nominalna brzina pri kojoj je izlazna snaga iz turbine maksimalna [m/s]; $v_{cut-out}$ maksimalna brzina vjetra pri kojoj lopatice vjetroturbine mogu da se okreću, a da ne dođe do njihovog oštećenja [m/s]; ρ gustina vazduha [kg/m^3]; A površina kruga koji zatvaraju lopatice turbine [m^2]; C_p koeficijent snage; N_b efikasnost generatora; N_g efikasnost mehaničkog prenosa snage; a P_{max} maksimalna snaga koju vjetroatregat može injektirati u mrežu [kW].

Za potrebu modelovanja mini vjetroparka priključenog na čvor 3, izabrano je deset *Aeolos* vjetroturbina sa horizontalnom osovinom, ukupne nominalne snage 100 kW³². Specifikacije navedene vjetroturbine su prikazane u Tabeli 5.1.1.

Tabela 5.1.1 Karakteristike vjetroturbine *Aeolos*

Aeolos vjetroturbina sa horizontalnom osovinom	
Nominalna snaga	10 kW
Tip generatora	Sinhroni generator sa permanentnim magnetom
Prečnik rotora	8 m
Brzina pri kojoj počinje da radi	2,5 m/s
Nominalna brzina	10 m/s
Brzina vjetra pri kojoj može doći do oštećenja turbine	59,5 m/s
Kontroler	Programabilni logički kontroler
Težina turbine	420 kg
Radni temperaturni opseg	Od -20°C do 50°C

Sa druge strane, budući da su različite studije pokazale da satna insolacija – količina energije sunčevog zračenja koja pada na horizontalnu zemljinu površinu – prati Beta raspodjelu (uz odgovarajuće skaliranje intervala [0, 1]) [82], insolacija u ovom radu je modelovana korišćenjem podataka o satnoj insolaciji u Podgorici u julu (koje su dobijene na osnovu podataka o insolaciji u periodu od 2005. do 2016. godine)³³ i Beta raspodjele.

Naime, vrijednosti petastominutne insolacije su dobijene generisanjem uzorka iz skupa brojeva koji prate Beta raspodjelu određenu parametrima $\alpha = 4$ i $\beta = 2$. Nakon toga, dobijene vrijednosti r_t' su skalirane primjenom sljedeće formule:

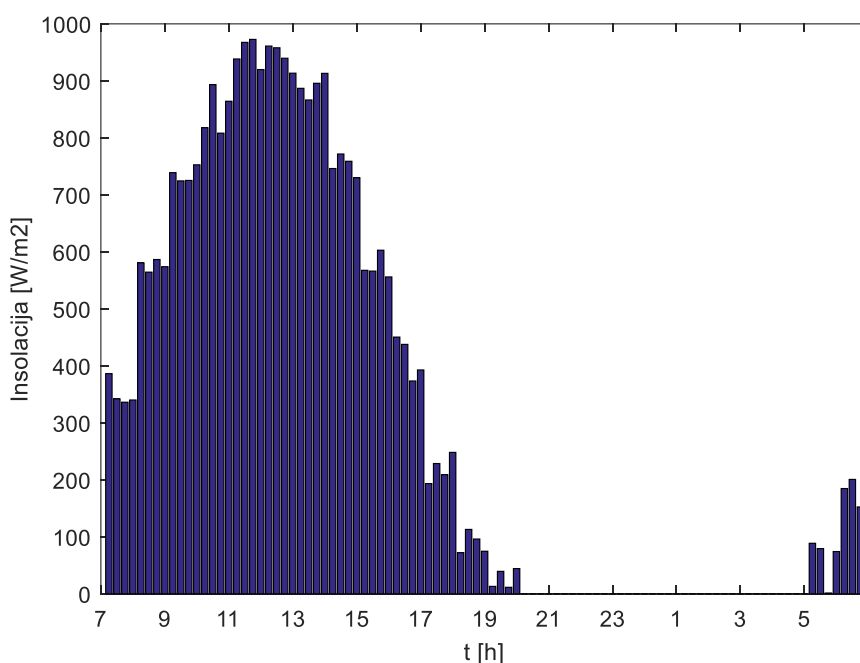
³² <https://www.windturbinestar.com/10kwh-aeolos-wind-turbine.html>

³³ https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/en/#DR

$$r_t = r_t'(r_{max,s} - r_{min,s}) + r_{min,s}, \quad (5.2)$$

gdje je r_t insolacija u petnaestominutnom intervalu t u $[\text{W}/\text{m}^2]$; r_t' vrijednost generisana iz Beta raspodjele u intervalu $[0, 1]$ u intervalu t , $r_{max,s}$ maksimalna vrijednost insolacije u posmatranom satu; koja je jednaka zbiru insolacije u datom satu u Podgorici i insolacije od 75 $[\text{W}/\text{m}^2]$; a $r_{min,s}$ minimalna vrijednost insolacije u posmatranom satu, koja je jednaka razlici insolacije u datom satu u Podgorici i insolacije od 75 $[\text{W}/\text{m}^2]$.

Važno je naglasiti da je u satima u kojima je insolacija u Podgorici jednaka nuli, bez obzira na vrijednosti generisane iz Beta raspodjele, vrijednost petnaestominutnih insolacija takođe podešena na nulu. Na slici 5.1.2 je prikazan histogram vrijednosti insolacije tokom dana od 7:00 h do 6:59 h sljedećeg dana.



Slika 5.1.2 Histogram vrijednosti insolacije u Podgorici

Nakon određivanja vrijednosti insolacije za svaki petnaestominutni interval, snaga na izlazu iz solarnog panela je izračunata primjenom sljedeće formule:

$$P_t = P_n \frac{r_t}{1000} (1 + \alpha_T(T_t - 25)) E_s, \quad (5.3)$$

gdje je P_n nominalna snaga solarnog panela $[\text{W}]$, r_t insolacija u petnaestominutnom intervalu t $[\text{W}/\text{m}^2]$, α_T temperaturni koeficijent solarne ćelije, T_t radna temperatura $[\text{°C}]$, a E_s efikasnost solarnog panela.

U cilju modelovanja proizvodnje solarne elektrane priključene na čvor 8, izabrano je 2.220 solarnih panela *Lubi Solar*³⁴, nominalne snage pojedinačnog panela 225 W, odnosno ukupne snage 499,5 kW. Specifikacije navedenog solarnog panela su prikazane u Tabeli 5.1.2.

³⁴ <https://www.indiamart.com/proddetail/225-w-polycrystalline-solar-module-18995259655.html>

Tabela 5.1.2 Karakteristike solarnog panela Lubi Solar

Solarni panel Lubi Solar	
Tip solarne ćelije	polikristalna
Nominalna snaga	225 W
Nominalni napon	24 V
Broj solarnih ćelija	72
Težina	16,5 kg
Dužina	1480 mm
Širina	995 mm

Slično kao u prethodnom poglavlju, i u ovom slučaju su modelovana četiri modela električnih vozila (Tabela 5.1.3), a tip vozila u određenom čvoru dobijen primjenom uniformne raspodjele.

Tabela 5.1.3 Modeli vozila korišćenih u simulaciji

Model	Kapacitet baterije [kWh]
Nissan Leaf (2018)	40
KIA Soul (2018)	31,8
Hyundai Kona (2020)	39,2
BMW i3s (2020)	42,2

Vozila priključena na brzu javnu punionicu snage 90 kW u čvoru 3 se pune samo do 80 % ukupnog kapaciteta baterije, dok se vozila priključena na čvorove 9 i 10 (u sklopu garaže u zgradi) pune do 100 % definisanog kapaciteta baterije pri maksimalnoj snazi od 20 kW (umjereno-brza punionica). Važno je napomenuti da je definisano da je početni stepen napunjenosti vozila priključenih na čvorove 9 i 10 – 10 kWh, tj. vozila nisu u potpunosti ispražnjena prije početka punjenja.

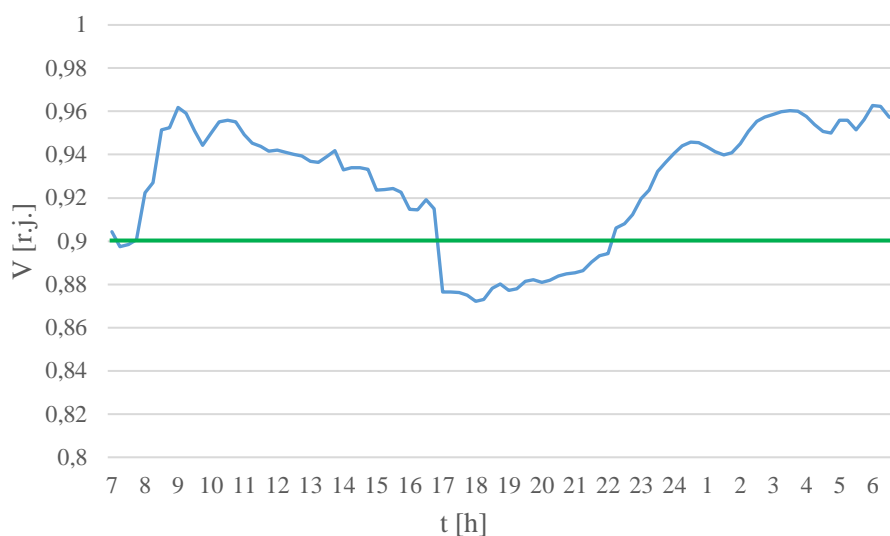
5.2. Varijanta 1 – Nekoordinisano punjenje

U prvoj varijanti je posmatrana situacija u kojoj se vozila koja dolaze na javnu punionicu pune pri istoj vrijednosti snage u oba petnaestominutna intervala i to za pojedine modele: *Nissan Leaf* pri snazi od 64 kW, *KIA Soul* pri 50,88 kW, *Hyundai Kona* pri 62,72 kW i *BMW i3s* pri 67,52 kW. Dakle, u ovom slučaju se snaga punjenja neće prilagođavati situaciji u sistemu, već će ona biti konstantna.

Sa druge strane, punjenje vozila u čvoru 9 je modelovano da počinje u 7 h, od trenutka dolaska na posao, dok je za vozila u čvoru 10 u 16 h, 17 h, 18 h ili 19 h, u zavisnosti od generisanog uzorka iz skupa koji prati normalnu raspodjelu. Snaga punjenja ovih vozila je podešena na konstantnu vrijednost od 20 kW, tako da punjenje modela *Nissan Leaf* traje oko 1 h i 30 minuta, *KIA Soul* 1 h i 15 minuta, *Hyundai Kona* 1 h i 30 minuta i *BMW i3s* 1 h i 45 minuta. U odnosu na vrijeme potrebno za punjenje vozila sa baterijom manjeg kapaciteta u

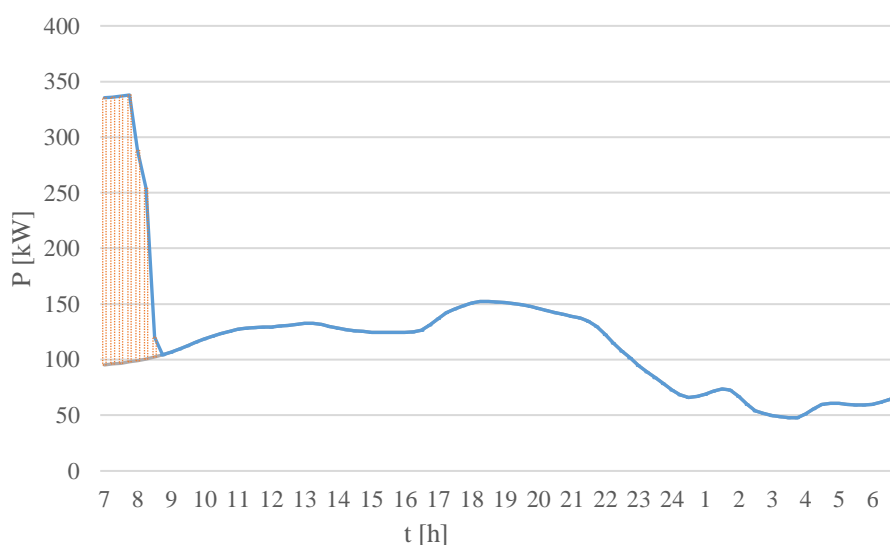
prethodnom poglavlju, zbog mnogo veće snage punjenja u ovom slučaju (oko 5,71 put veće), vozila se mogu napuniti do kraja za mnogo kraće vrijeme.

Primjenom navedenih ulaznih podataka, sprovedena je simulacija u sistemu prikazanom na slici 5.1.1. Rezultati simulacije u pogledu promjene napona su prezentovani za čvorove 9 i 10, u kojima se puni 12, odnosno 20 električnih vozila (slike 5.2.1 i 5.2.3).

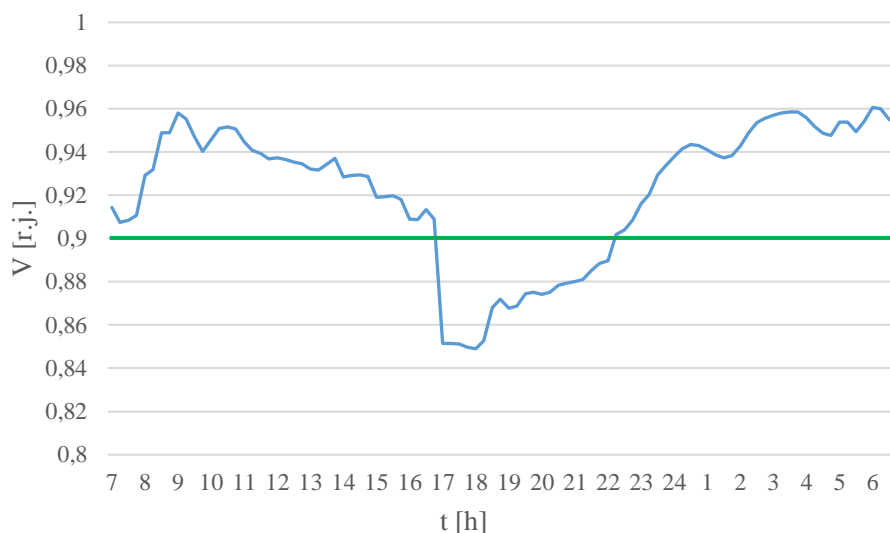


Slika 5.2.1 Promjena napona čvora 9 – nekoordinisano punjenje

Kako 12 vozila počinju punjenje u 7 h pri snazi od po 20 kW, dolazi do naglog povećanja opterećenja čvora 9 u tom trenutku (slika 5.2.2), zbog čega napon čvora 9 pada na kratko na vrijednost ispod 0,9 r.j, odnosno ispod ograničenja definisanog standardom EN 50160. Nakon toga, u periodu od 17 h do 22 h, napon ponovo pada na vrijednost ispod 0,9 r.j, ali ovog puta usljed naglog povećanja opterećenja čvora 10.

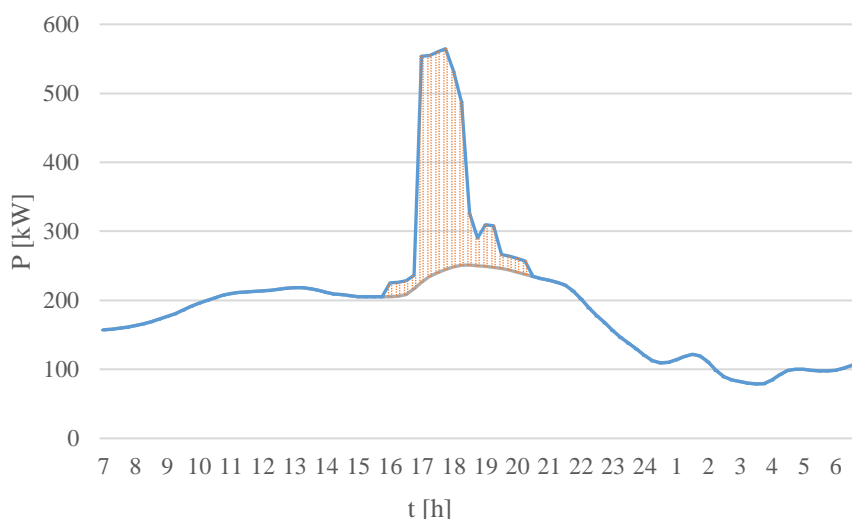


Slika 5.2.2 Dijagram opterećenja čvora 9 – nekoordinisano punjenje



Slika 5.2.3 Promjena napona čvora 10 – nekoordinisano punjenje

Sa druge strane, napon čvora 10 je u periodu punjenja vozila (od 17 h) pao na vrijednost od 0,85 r.j, što je za 0,05 manje u odnosu na donju granicu definisanu standardom EN 50160. Iako je solarna elektrana koja injektira energiju u sistem priključena u blizini čvora 10, nekontrolisano punjenje velikog broja vozila priključenih na čvor 10 dovodi do pada napona u posmatranom čvoru. Pored navedenog, vršna snaga čvora 10 u ovom periodu dostiže vrijednost od oko 564 kW (slika 5.2.4), što je za 2,3 puta veće u odnosu na osnovno opterećenje posmatranog čvora. Ovoliki prorast vršnog opterećenja bi mogao da dovede do preopterećenja dijela mreže, što bi iziskivalo ulaganja u povećanje kapaciteta trafostanica i vodova kako bi mogli da izdrže ovaj nagli porast opterećenja.



Slika 5.2.4 Dijagram opterećenja čvora 10 – nekoordinisano punjenje

5.3. Varijanta 2 – Koordinisano punjenje

Kako bi se iskoristile mogućnosti baterija u električnim vozilima u sistemu sa intermitentnim proizvodnim objektima, a ujedno i zadovoljile potrebe vozila po pitanju stepena napunjenosti, predložen je algoritam koordinisanog punjenja električnih vozila.

Kako je u Potpoglavlju 3.3.7 istaknuto da ovaj koncept ima najizvjesniju budućnost kod umjereno-brzog punjenja, mogućnost injektiranja snage u mrežu je modelovana samo kod vozila koja se pune u čvorovima 9 i 10, gdje vozila u principu mogu da ostanu priključena na mrežu u dužem vremenskom periodu. Sa druge strane, kako je definisano da će punjenje vozila na javnim punionicama trajati tačno 30 minuta, u ovom slučaju je vršena optimizacija snage punjenja vozila u odnosu na situaciju u sistemu, odnosno u odnosu na odabranu funkciju cilja, ali nije uzeta u obzir mogućnost injektiranja energije u mrežu.

Kako optimizacija punjenja i injektiranja električne energije iz vozila u mrežu može biti izvršena uzimajući u obzir više različitih aspekata, u ovoj simulaciji je korišćeno više funkcija cilja, i to:

1. Minimizacija odstupanja napona od nazivne vrijednosti (1 r.j.):

$$F_1 = \min \left(\sum_{t=1}^{96} \sum_{i=1}^n (1 - V_i)^2 \right), \quad (5.4)$$

gdje je V_i napon u čvoru i , $i = 1, 2, 3, \dots, n$, redni broj čvora u mreži, a n je ukupan broj čvorova u mreži.

2. Minimizacija troškova električne energije preuzete iz prenosnog sistema:

$$F_2 = \min \left(\sum_{t=1}^{96} \sum_{g=1}^m b_t P_{g,t} \right), \quad (5.5)$$

gdje je P_g injektirana snaga iz prenosnog sistema za $g = 1, 2, \dots, m$, a b_t cijena sa dan unaprijed tržišta na hrvatskoj berzi CROPEX za 25.05.2021. godine.

3. Minimizacija snage koja se preuzima iz prenosne mreže:

$$F_3 = \min \left(\sum_{t=1}^{96} \sum_{g=1}^m P_{g,t} \right), \quad (5.6)$$

4. Minimizacija varijacije opterećenja posmatranog dijela sistema za svako $t = 1, 2, 3, \dots, 96$:

$$F_4 = \min \left(\sum_{t=1}^{96} \sum_{i=1}^n (P_{d,i} + \sum_{v=1}^k (P_{v,i}^p - P_{v,t}^d) - P_{gvj,i} - P_{gs,i}) \right), \quad (5.7)$$

gdje je $P_{d,i}$ snaga opterećenja čvora i ; $P_{v,i}^p$ snaga punjenja vozila v priključenog na čvor i , gdje $v = 1, 2, \dots, k$; $P_{v,i}^d$ snaga injektiranja vozila v priključenog na čvor i ; $P_{gvj,i}$ snaga proizvodnje vjetroelektrane priključene na čvor i (ukoliko na posmatrani čvor nije priključena vjetroelektrana, snaga proizvodnje je jednaka 0); a $P_{gs,i}$ snaga proizvodnje solarne elektrane priključene na čvor i (ukoliko na posmatrani čvor nije priključena solarna elektrana, snaga proizvodnje je jednaka 0).

5. Minimizacija aktivne snage gubitaka u svakoj grani ij za svako $t = 1, 2, 3, \dots, 96$:

$$F_5 = \min \left(\frac{1}{2} \sum_{t=1}^{96} \sum_{i=1}^n \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n r_{ij} \frac{P_{ij}^2 + Q_{ij}^2}{V_i^2} \right), \quad (5.8)$$

gdje je P_{ij} aktivna snaga u grani ij , Q_{ij} reaktivna snaga u grani ij , a r_{ij} aktivna otpornost grane između čvorova i i j .

Dodatno, uzeta su u obzir i sljedeća tehnička ograničenja:

1. Ograničenje efektivne vrijednosti napona koje je definisano standardnom EN 50160 za svako $t = 1, 2, 3, \dots, 96$:

$$V_{min} \leq V_{i,t} \leq V_{max}, \quad (5.9)$$

gdje je $V_{min} = 0,9 r.j$, a $V_{max} = 1,1 r.j$.

2. Ograničenje snage punjenja i injektiranja u mrežu za svako vozilo priključeno na čvorove 9 i 10 i svako $t = 1, 2, 3, \dots, 96$, koje je posljedica ograničenja snage punionice koja se koristi u ovom slučaju:

$$P_{min} \leq P_{v,t} \leq P_{max}, \quad (5.10)$$

gdje je $P_{min} = 0 \text{ kW}$, dok je $P_{max} = 20 \text{ kW}$.

3. Ograničenje stepena napunjenosti za svako vozilo priključeno na čvorove 9 i 10 i svako $t = 1, 2, 3, \dots, 96$, koje je posljedica ograničenja kapaciteta baterije:

$$SOC_{v,min} \leq SOC_{v,t} \leq SOC_{v,max}, \quad (5.11)$$

gdje je $SOC_{v,min} = 0,1 \cdot SOC_{v,max}$, gdje $SOC_{v,max}$ zavisi od modela vozila v .

4. Stepennapunjenosti baterija vozila priključenih na čvor 9 na kraju punjenja, za $t = 49$, mora biti jednako 100 % kapaciteta baterije:

$$SOC_{v,49} = 100\% \cdot SOC_{v,max}, \quad (5.12)$$

5. Stepennapunjenosti baterija vozila priključenih na čvor 10 na kraju punjenja, za $t = 96$, mora biti jednako 100 % kapaciteta baterije:

$$SOC_{v,96} = 100\% SOC_{v,max}, \quad (5.13)$$

6. Ograničenje snage punjenja za svako vozilo priključeno na čvor 13 i svako $t = 1, 2, 3, \dots, 96$, koje je posljedica ograničenja snage javne punionice:

$$P_{min} \leq P_{v,t} \leq P_{max}, \quad (5.14)$$

gdje je $P_{min} = 0 \text{ kW}$, dok je $P_{max} = 90 \text{ kW}$.

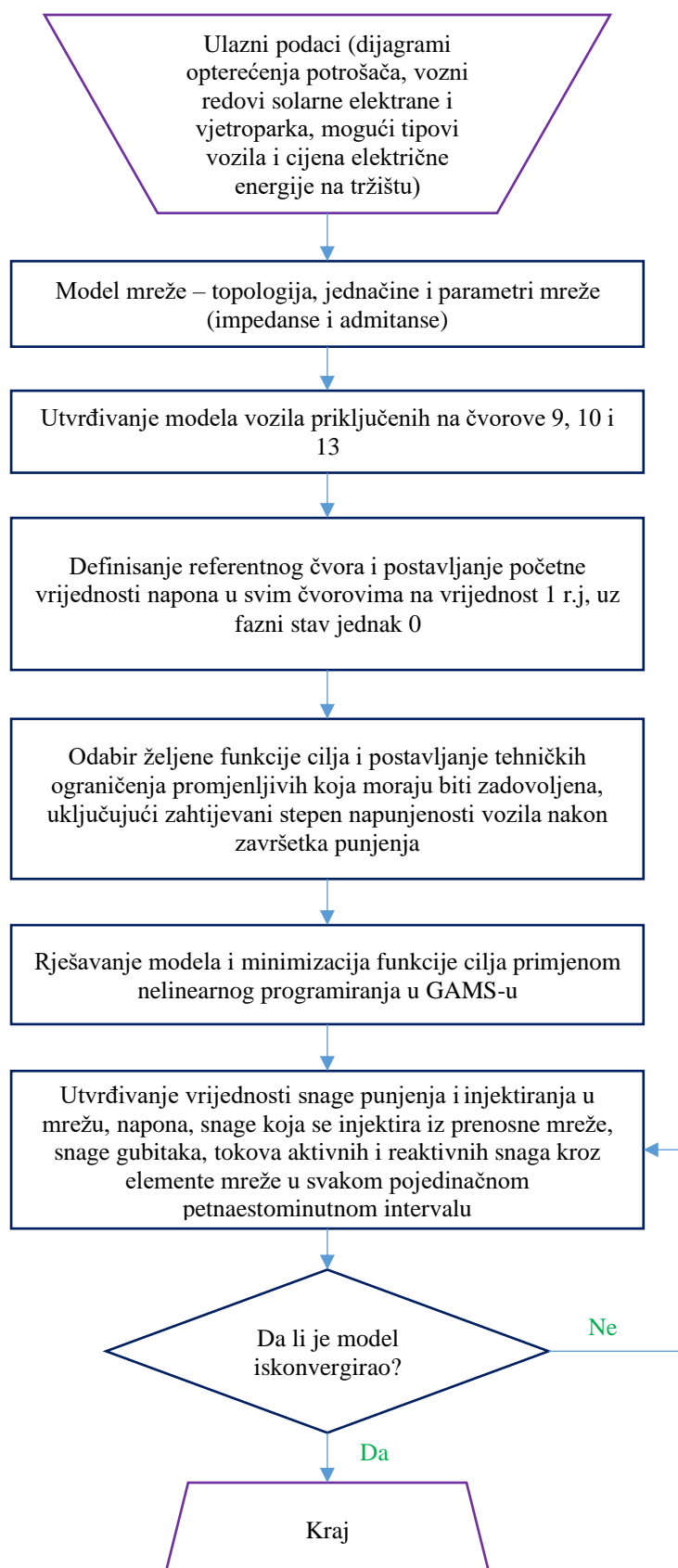
7. Stepen napunjenosti baterija vozila priključenih na čvor 13 na kraju punjenja mora biti jednak 100 % kapaciteta baterije (20 % koje je bilo prije početka punjenja + 80 % koje je napunjeno u datom periodu):

$$SOC_{v,t_{kraj}} = 100\% SOC_{v,max}, \quad (5.15)$$

gdje je t_{kraj} vrijeme završetka punjenja vozila v , koje zavisi od vremena početka punjenja, odnosno $t_{kraj} = t_{poč} + 30min$.

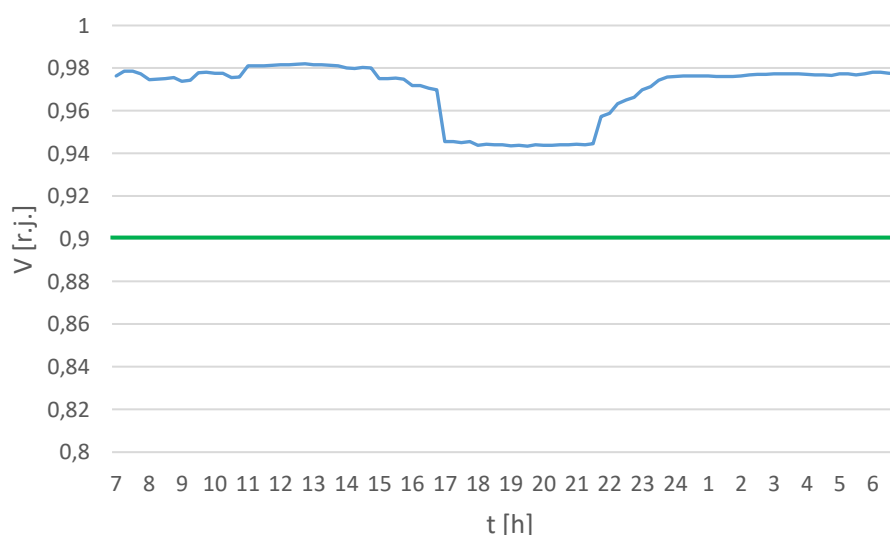
Takođe, važno je naglasiti da se vozila priključuju na čvor 10 tek u 17 h, tako da je snaga punjenja i pražnjenja prije 17 h je jednaka 0 kW. Sa druge strane, priključenje vozila na čvor 13 je definisano modelom Teorije čekanja.

Primijenjeni algoritam koordinacije punjenja u ovom slučaju je prikazan na slici 5.3.1.



Slika 5.3.1 Dijagram koordinacije punjenja i injeckiranja u mrežu električnih vozila

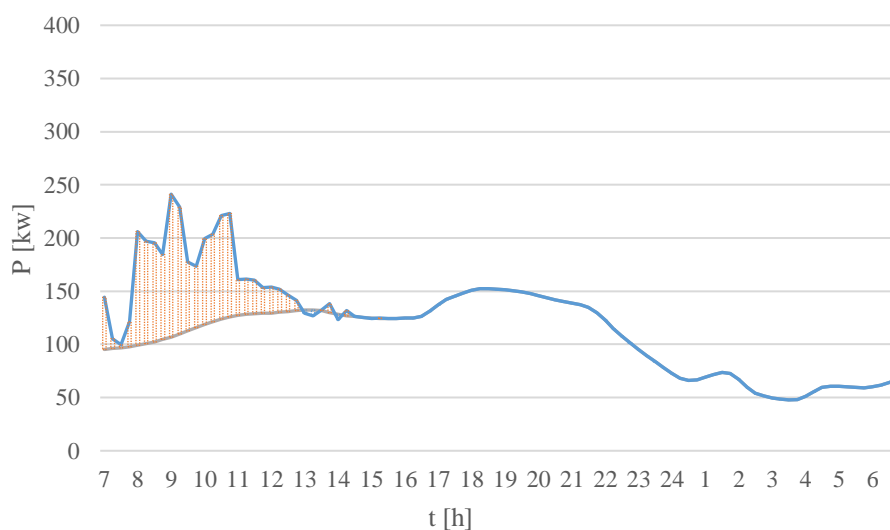
Implementacijom dijagrama pametnog punjenja kojim se minimizuje odstupanje napona u svim čvorovima mreže u GAMS-u, dobijene vrijednosti napona u čvoru 9 su prikazane na slici 5.3.2.



Slika 5.3.2 Promjena napona čvora 9 – minimizacija odstupanja napona

Za razliku od krive napona dobijene prilikom nekoordinisanog punjenja, u ovom slučaju napon u čvoru 9 ne pada ispod 0,944 r.j. tokom perioda vršnog opterećenja sistema, dok se u periodu punjenja vozila održava na vrijednosti od oko 0,98 r.j.

Sa druge strane, snaga opterećenja čvora 9 dostiže najviše 241 kW, dok je u prethodnom slučaju dostizala vrijednost i do 337 kW (slika 5.3.3), pri čemu je posmatrajući sliku 5.3.4, jasno da je do povećanja snage punjenja došlo u periodu kada je proizvodnja distribuiranih izvora (od koje je oduzeta snaga usljed punjenja vozila na brzim punionicama) povećana, dok je u trenucima kada je snaga proizvodnje distribuiranih izvora mala i snaga punjenja vozila bila mala.



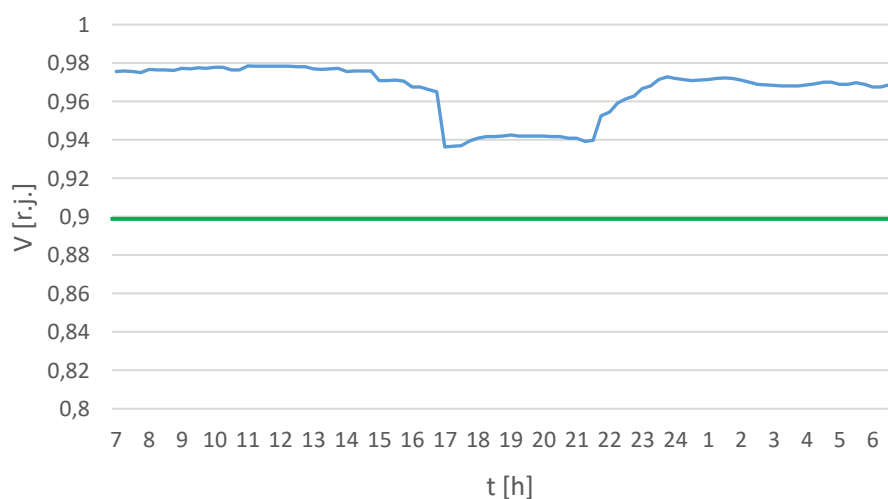
Slika 5.3.3 Dijagram opterećenja čvora 9 – minimizacija odstupanja napona



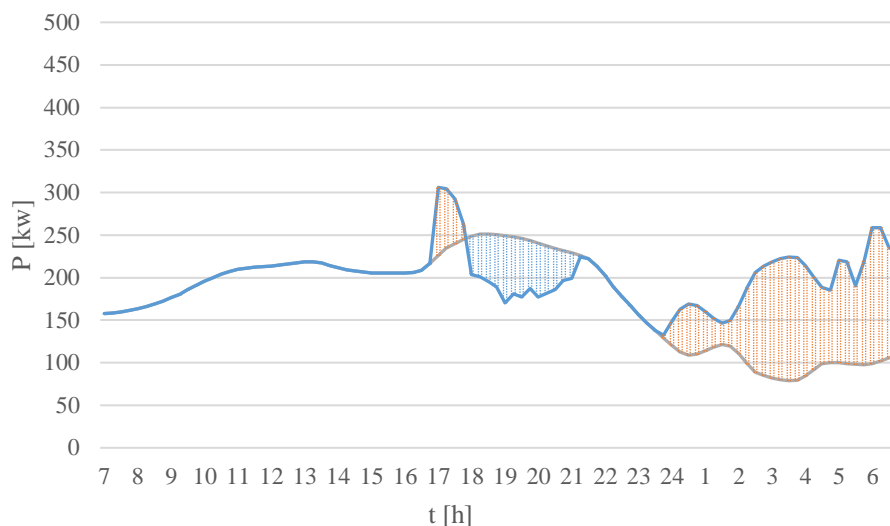
Slika 5.3.4 *Proizvodnja distribuiranih jedinica umanjena za snagu punjenja vozila u čvoru 13*

Na slici 5.3.5 je prikazana promjena vrijednosti napona u čvoru 10 primjenom algoritma pametnog punjenja za istu funkciju cilja. Za razliku od odstupanja napona u slučaju nekoordinisanog punjenja, kada je napon pao na vrijednost od oko 0,85 r.j., primjenom navedenog algoritma je napon tokom vršnog opterećenja održavan na vrijednosti od oko 0,94 r.j.

Imajući u vidu da se vozila priključuju na čvor 10 tek u 17 h, a da stepen napunjenosti vozila ne smije da padne ispod 10 % kapaciteta baterije predmetnog vozila, sa slike 5.3.6 je jasno da je oko 17 h došlo do punjenja vozila u čvoru 10, da bi već u 18 h (trenutak vršnog opterećenja sistema) došlo do naglog smanjenja opterećenja čvora 10 usljed injektiranja u mrežu. Kasnije, tokom noći, u periodima kada je snaga potrošnje u čvoru 10 jako mala, došlo je do porasta opterećenja prilikom punjenja vozila. Za razliku od rasporeda snage punjenja vozila u ovom čvoru prikazanom na Grafiku 5.2.4, gdje je snaga opterećenja oko 18 h povećana na vrijednost od 564 kW, u ovom slučaju je došlo do mnogo manjeg povećanja vršnog opterećenja čvora 10 (na vrijednost 306 kW).

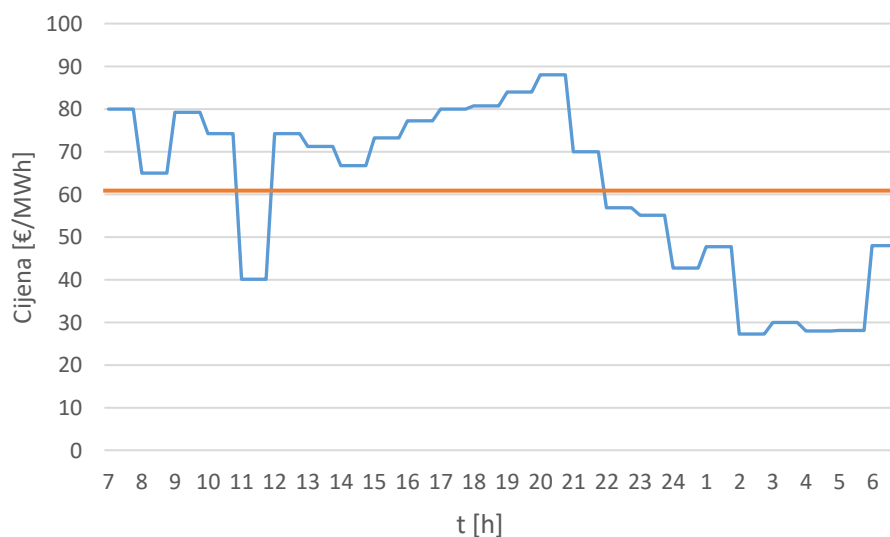


Slika 5.3.5 *Promjena napona u čvoru 10 – minimizacija odstupanja napona*

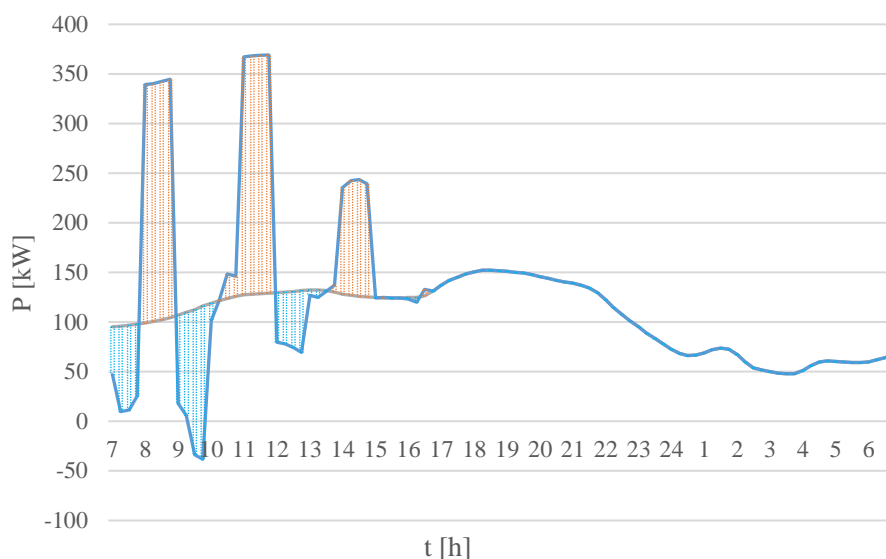


Slika 5.3.6 Dijagram opterećenja u čvoru 10 – minimizacija odstupanja napona

Sa druge strane, u slučaju primjene funkcije cilja kojom se minimizuju troškovi preuzete električne energije (slika 5.3.7), snaga punjenja vozila u čvoru 9 (slika 5.3.8) dostiže velike vrijednosti upravo u periodima kada je cijena električne energije mala (8 h, 11 h i 14 h), dok se injektranje u mrežu odvija u periodima kada je cijena visoka (7 h, 9 h, 12 h i 13 h). Međutim, navedena nagla povećanja snage potrošnje nisu povoljna sa aspekta mreže, odnosno njenog ograničenog kapaciteta, kao ni sa aspekta gubitaka u sistemu.

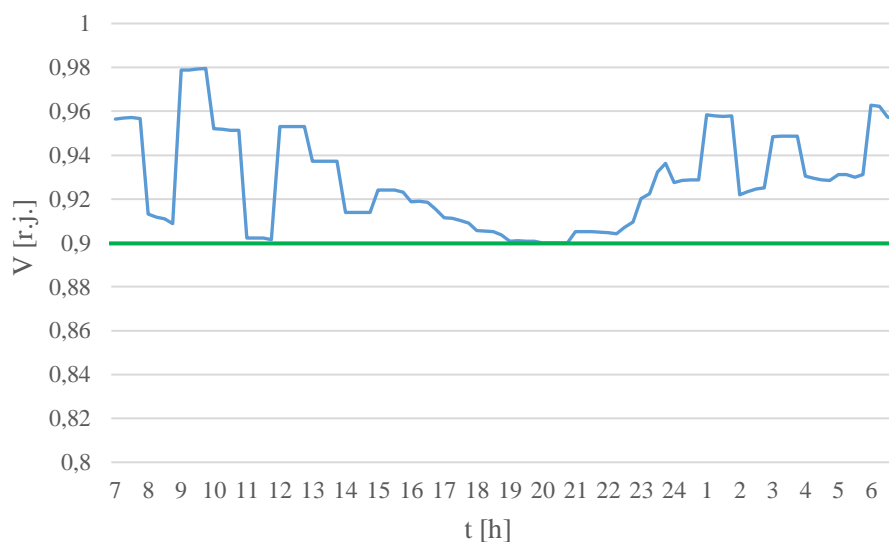


Slika 5.3.7 Promjena cijene električne energije na berzi u Hrvatskoj



Slika 5.3.8 Dijagram opterećenja čvora 9 – minimizacija troška električne energije preuzete iz prenosnog sistema

I pored velikog povećanja snage potrošnje, napon čvora 9 je održavan na nešto većoj vrijednosti od donje granice (slika 5.3.9), što se može opravdati i velikom proizvodnjom distribuiranih izvora u tom periodu.

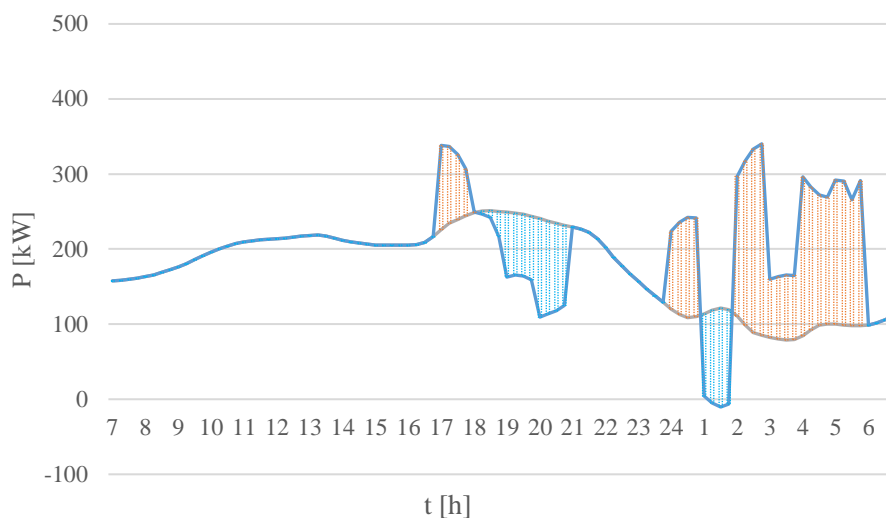


Slika 5.3.9 Promjena napona u čvoru 9 - minimizacija troškova električne energije preuzete iz prenosnog sistema

Kada je u pitanju čvor 10, punjenje i pražnjenje baterija vozila prati istu logiku kao u slučaju čvora 9. Naime, posmatrajući sliku 5.3.10 jasno je da dolazi do porasta vršnog opterećenja u 17 h zbog manje cijene električne energije u tom trenutku, da bi tokom perioda od 19 h do 21 h, kada cijena električne energije dostiže najveću vrijednost, došlo do velikog injektiranja energije iz vozila u mrežu, tj. do značajnog smanjenja snage koja se preuzima iz mreže.

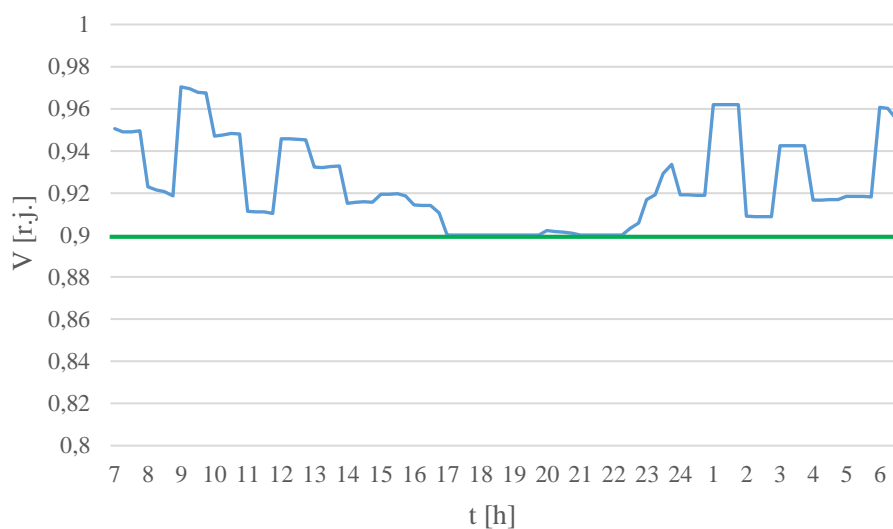
Iz izložene analize je jasno da u ovom slučaju funkcija cilja razmatra samo ekonomski aspekt optimizacije, zbog čega se javljaju dodatni lokalni maksimumi opterećenja tokom noći,

u satima kada je cijena jako niska. Sa druge strane, dostižu se velike vrijednosti injektirane snage iz električnih vozila u trenucima kada je cijena visoka, a čak dolazi do i negativne snage potrošnje. Pretpostavljajući da će u ovim trenucima potrošači prodavati električnu energiju sistemu po istoj tržišnoj cijeni, može se reći da je dobijen optimalni šablon punjenja i injektiranja u mrežu sa aspekta potrošača.



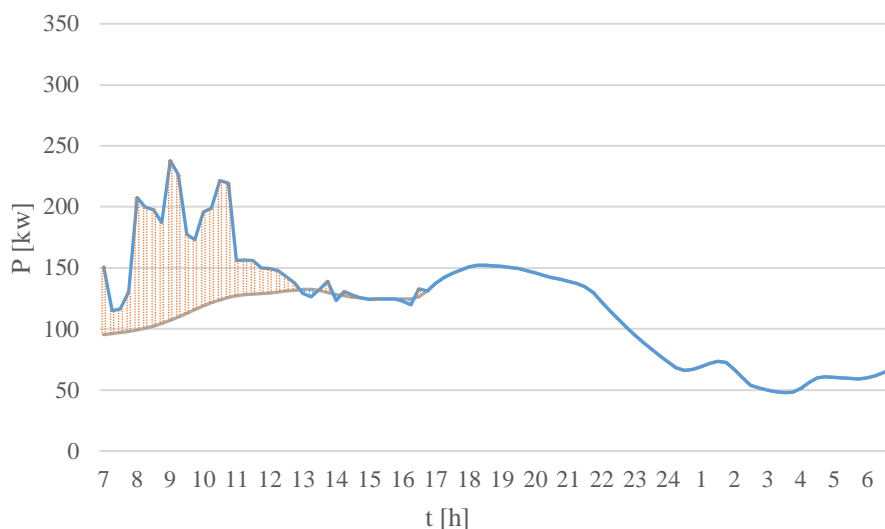
Slika 5.3.10 Dijagram opterećenja čvora 10 - minimizacija troškova električne energije preuzete iz prenosnog sistema

Sa druge strane, primjenom ove funkcije cilja, napon u čvoru 10 je u periodu od 17 h do 22 h i 30 minuta pao na vrijednost 0,9 r.j. (slika 5.3.11), tj. na donju granicu definisanu tehničkim ograničenjem u optimizacionom modelu, što je u skladu sa standardom EN 50160. Ovaj aspekt nije problematičan iz ugla mreže. Međutim, porast vršnog opterećenja može biti problematičan zbog dodatnog termičkog naprezanja elemenata mreže, kao i potrebe za dodatnim ulaganjima u povećanje kapaciteta mreže.

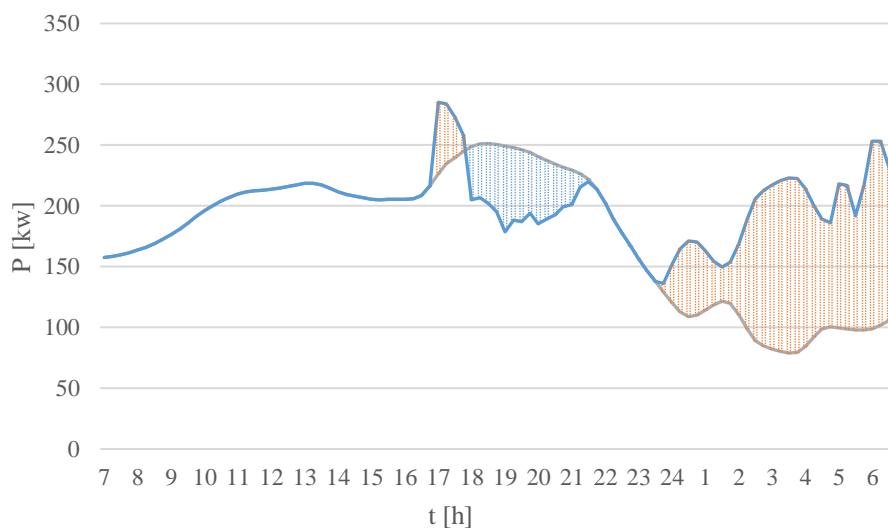


Slika 5.3.11 Promjena napona čvora 10 - minimizacija troškova električne energije preuzete iz prenosnog sistema

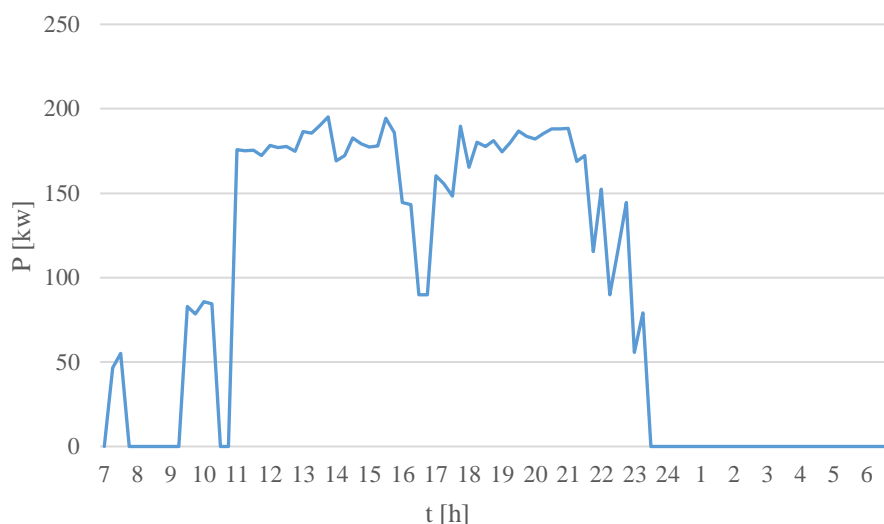
Pored navedenog, primijenjena je i funkcija kojom se minimizuje snaga koja se preuzima iz prenosne mreže, čiji rezultati su prikazani na slikama 5.3.12, 5.3.13 i 5.3.14. Naime, imajući u vidu da je cilj minimizacija ulazne snage, povećanje vršnog opterećenja nije očekivano ni kod jednog ni kod drugog čvora. Međutim, posmatrajući periode kada dolazi do vršnog opterećenja u čvoru 9 i 10, i snagu punjenja vozila na brzim punionicama u čvoru 13, jasno je da do povećanja opterećenja dolazi u trenucima kada je snaga punjenja vozila na javnim punionicama mala (7 h, 8 h, 10 h i 17 h), tako da su navedena opterećenja komplementarna, odnosno opterećenje sistema je raspoređeno tako da kriva ulazne snage bude što ujednačenija.



Slika 5.3.12 Dijagram opterećenja čvora 9 – minimizacija snage koja se preuzima iz prenosne mreže

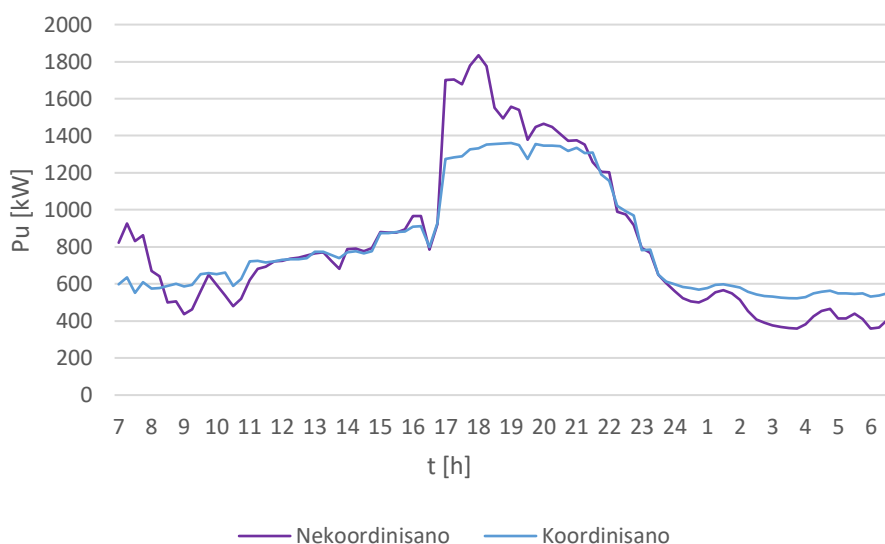


Slika 5.3.13 Promjena napona čvora 9 - minimizacija snage koja se preuzima iz prenosne mreže



Slika 5.3.14 Promjena napona u čvoru 13 - minimizacija snage koja se preuzima iz prenosne mreže

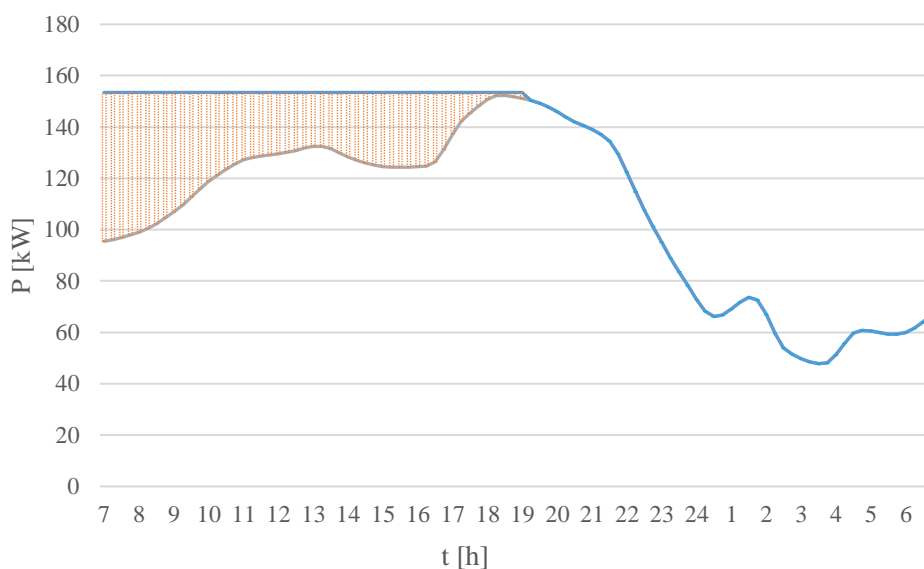
Na slici 5.3.15 je prikazana promjena ulazne snage prilikom nekoordinisanog punjenja i koordinisanog punjenja kojim se postiže minimizacija ulazne snage. Jasno je da je u slučaju primjene algoritma koordinisanog punjenja došlo do ujednačavanja krive ukupne ulazne snage, čime su izbjegnuti značajni lokalni maksimumi snage koja se preuzima iz prenosnog sistema.



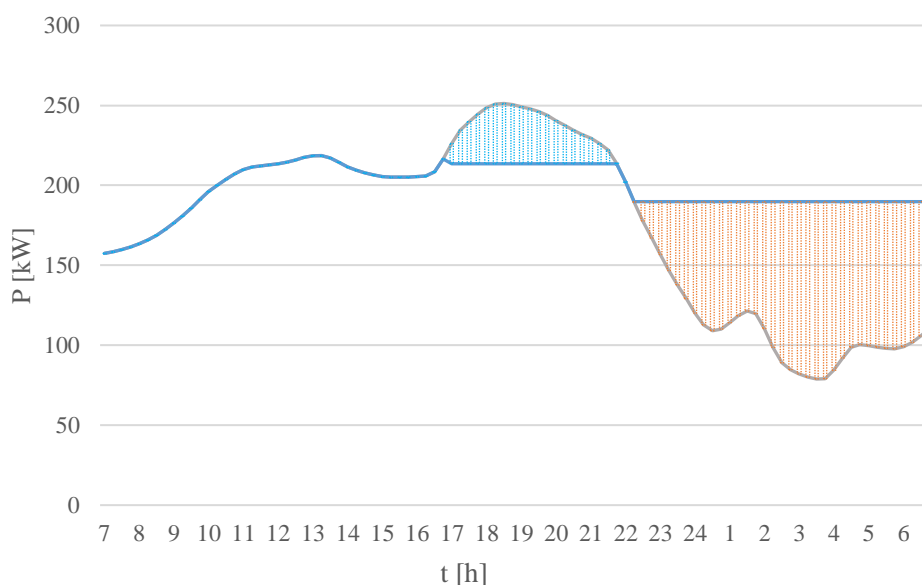
Slika 5.3.15 Dijagram opterećenja sistema (ulazna snaga u sistem) za slučaj koordinisanog punjenja sa minimizacijom ulazne snage i nekoordinisanog punjenja

Sa druge strane, primjenom funkcije cilja kojom se minimizuju varijacije opterećenja u posmatranom dijelu mreže, došlo je do ujednačavanja opterećenja pojedinačnih čvorova na koje su priključena električna vozila (slike 5.3.16, 5.3.17 i 5.3.18). U odnosu na prethodne slučajeve kada je došlo do porasta vršnog opterećenja čvorova, na ovaj način se postiže mnogo bolje iskorišćenje mreže po pojedinačnom potrošaču, imajući u vidu da se opterećenje usljed punjenja električnog vozila ne povećava iznad vrijednosti vršnog opterećenja posmatranog objekta prije integracije električnih vozila. Dodatno, u slučaju kada su vozila priključena na mrežu za vrijeme vršnog opterećenja posmatranog čvora (čvor 10), dolazi do smanjenja

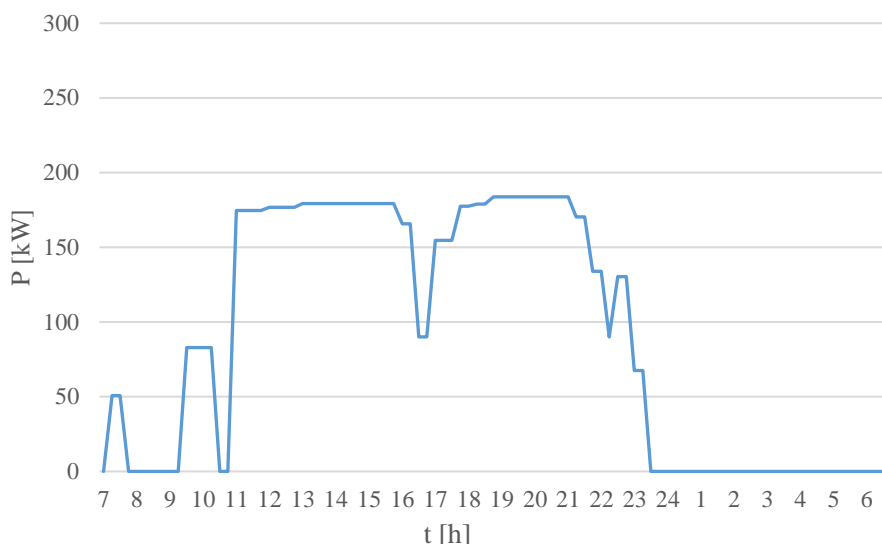
njegovog vršnog opterećenja. Samim tim, izbjegava se potreba za povećavanjem kapaciteta vodova i omogućava se dodatno povećavanje opterećenja čvorova, a pored navedenog, napon se zbog definisanog ograničenja drži u okviru dozvoljenih granica odstupanja. Sa aspekta mreže, ova funkcija cilja predstavlja najbolju opciju jer omogućava efikasno korišćenje mreže od strane potrošača za mnogo veći nivo opterećenja pojedinačnog čvora. Važno je naglasiti da vozila priključena na isti čvor (9 i 10) međusobno koordinišu punjenje i injecktriranje u mrežu kako bi se postiglo ujednačeno opterećenje objekta u odnosu na distributivni sistem.



Slika 5.3.16 Dijagram opterećenja čvora 9 – minimizacija varijacije snage opterećenja

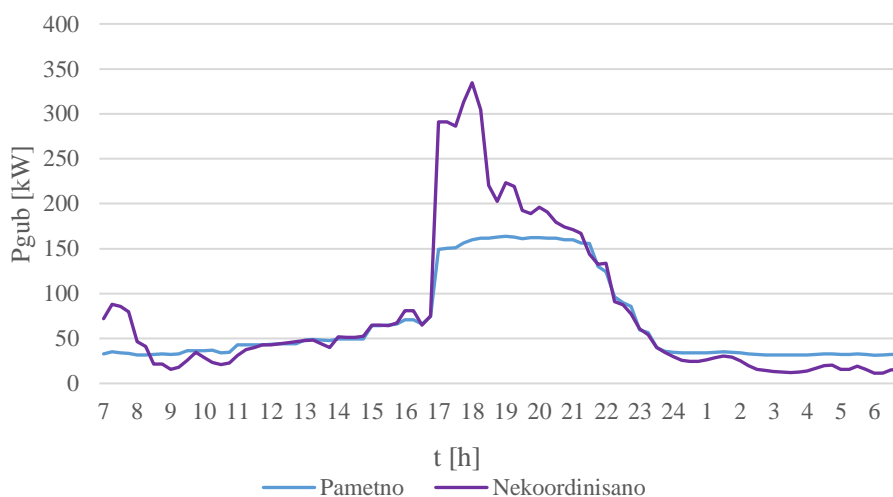


Slika 5.3.17 Dijagram opterećenja čvora 10 – minimizacija varijacije snage opterećenja



Slika 5.3.18 Dijagram opterećenja čvora 13 – minimizacija varijacije snage opterećenja

Na kraju, imajući u vidu značaj smanjenja gubitaka, sprovedena je optimizacija koja je imala za cilj minimizaciju gubitaka u sistemu. Promjena ukupne aktivne snage gubitaka u sistemu u slučaju primjene nekoordinisanog i koordinisanog punjenja je prikazana na slici 5.3.19.



Slika 5.3.19 Promjena snage gubitaka za slučaj koordinisanog punjenja kojim se minimizuje snaga gubitaka i nekoordinisanog punjenja

Sa slike je jasno da se primjenom algoritma koordinisanog punjenja električnih vozila postiže mnogo optimalniji profil gubitaka u odnosu na nekoordinisano punjenje. U pojedinim trenucima je snaga gubitaka kod koordinisanog punjenja malo veća (periodi punjenja vozila). Međutim, primjetna je mnogo ujednačenija kriva gubitaka u ovim periodima u odnosu na nekoordinisano punjenje. Snaga gubitaka kod nekoordinisanog punjenja tokom vršnih sati dostiže vrijednost od čak 334 kW, što je za 174 kW više u odnosu na najveću snagu prilikom koordinisanog punjenja.

Takođe, rješavanje predloženog optimizacionog algoritma primjenom CONOPT solvera je ispraćeno velikom brzinom konvergencije. Ovo ima poseban značaj sa aspekta omogućavanja

sprovedenja proračuna optimalnog profila punjenja i injektiranja električne energije iz vozila u mrežu u kratkom vremenskom roku.

Dakle, u slučaju nekoordinisanog punjenja električnih vozila dolazi do naglog povećanja opterećenja čvorova na koje su priključena vozila, što, i pored toga što su distribuirani izvori koji injektiraju električnu energiju priključeni u blizini, rezultira značajnim smanjenjem napona u čvorovima ispod dozvoljene vrijednosti. Zbog lošeg uticaja smanjenja napona na rad uređaja, ovako veliki pad napona bi iziskivao dodatna ulaganja u mrežu, ili izgradnjom nove trafostanice 10/0,4 kV ili ugradnjom uređaja za kompenzaciju reaktivne snage. Pored navedenog, u ovom slučaju dolazi do značajnog povećanja vršne snage i snage gubitaka u sistemu (grafici 5.3.14 i 5.3.18), čime se javlja potreba za povećavanjem kapaciteta vodova i trafostanica u mreži. Dodatno, imajući u vidu ogromnu razliku opterećenja sistema tokom vršnih sati i tokom ostatka dana (mnogo veću u odnosu na osnovni dijagram opterećenja), na ovaj način bi došlo do suboptimalnog korišćenja mreže. Odnosno, mreža bi bila dimenzionisana da podnese najveće opterećenje koje traje jako kratko.

Sa druge strane, koordinacijom punjenja električnih vozila dobijaju se optimalni rezultati sa aspekta sistema ili korisnika u zavisnosti od primijenjene funkcije cilja. Naime, optimizacijom vrijednosti napona se dobijaju mnogo bolje naponske prilike u sistemu u odnosu na slučaj nekoordinisanog punjenja, iz čega slijedi da bi sistem u ovom slučaju bio sposoban da podnese dodatno povećanje opterećenja, a da napon ne padne ispod dozvoljene donje granice. Snaga punjenja električnih vozila u čvorovima 9 i 10 je optimizovana na način da, iako dolazi do povećanja snage opterećenja, ovo povećanje bude koordinisano sa proizvodnjom distribuiranih izvora sa jedne strane, odnosno smanjenjem vršnog opterećenja ostatka sistema, sa druge strane. Pored navedene funkcije cilja, primijenjena je i minimizacija troškova električne energije preuzete iz prenosnog sistema, kojom se željela postići ekonomska optimizacija sa aspekta korisnika – minimizacija porasta računa za preuzetu električnu energiju. U ovom slučaju je napon održavan u okviru dozvoljenih granica odstupanja, dok je u trenucima kada je cijena električne energije niska došlo do naglog povećanja snage opterećenja u čvorovima na koje su priključena električna vozila. Ovo povećanje nije optimalno sa aspekta sistema, jer bi moglo da dovede do preopterećenja distributivnog sistema, tj. do prevelikog termičkog naprezanja elemenata distributivnog sistema, a što bi rezultiralo potrebom za ulaganjem u mrežu u cilju povećanja kapaciteta. Međutim, u situaciji kada bi cijena električne energije (uzimajući u obzir i ostale stavke na računu) bila prilagođena situaciji u sistemu (najveće vrijednosti tokom vršnog opterećenja), navedena optimizaciona funkcija bi bolje ispratila stanje u sistemu nego u ovom slučaju.

Na kraju, primijenjena su još tri kriterijuma optimizacije koji imaju za cilj minimizaciju snage koja se preuzima iz prenosnog sistema, minimizaciju varijacije snage opterećenja čvorova u posmatranom dijelu mreže i minimizaciju snage gubitaka u sistemu. Potvrđeno je da se primjenom algoritma pametnog punjenja postiže ujednačavanje dijagrama opterećenja sistema, poravnanje pojedinačnih dijagrama opterećenja čvorova i ujednačavanje vrijednosti snage gubitaka tokom perioda kada dolazi do punjenja vozila, respektivno, dok se u slučaju nekoordinisanog punjenja u ovim trenucima dolazi do porasta vršnog opterećenja. Već je naglašeno koje negativne posljedice može imati povećanje vršnog opterećenja sistema, kao i snage gubitaka, zbog čega se ističu benefiti navedene optimizacije, kojom se za potrebe punjenja vozila istog kapaciteta kao u prethodnom slučaju, postiže mnogo efikasnije korišćenje sistema.

6. Zaključak

Nove okolnosti, okviri i ciljevi u pogledu smanjenja emisije gasova sa efektom staklene bašte su doveli do toga da se distributivni sistem našao na važnoj prekretnici razvoja, kada je uvođenje većeg stepena komunikacije, nadzora i upravljanja nad sistemom postalo značajnije nego ikada ranije. Očekivana velika penetracija električnih vozila i povećanje opterećenja sistema usljed elektrifikacije grijanja, prepoznati su kao značajna „prijetnja“ za normalno funkcionisanje distributivnog sistema, naročito u pogledu održavanja tehničkih parametara sistema u okviru dozvoljenih granica (usljed povećanja vršne snage) i ograničenog kapaciteta postojeće mreže. Kako bi se minimizovao uticaj na povećanje opterećenja mreže, u velikom broju naučnih radova su obrađivane mogućnosti uvođenja optimalne koordinacije punjenja električnih vozila u distributivnom sistemu.

Zbog aktuelnosti problema optimizacije punjenja električnih vozila za dva različita koncepta distributivnog sistema (tradicionalni i savremeni) u ovom radu je izvršena analiza uticaja različitih varijanti punjenja za oba koncepta, kao i poređenje rezultata analiza za posmatrane varijante. Prvi slučaj se odnosio na analizu uticaja punjenja električnih vozila na „*top-down*“ distributivni sistem i uključivao je analizu tri varijante: nekoordinisano, punjenje tokom niže tarife i pametno punjenje, gdje su šabloni punjenja za prvu i drugu varijantu bili unaprijed definisani, dok je za treću varijantu optimalni šablon punjenja vozila dobijen primjenom algoritma pametnog punjenja za različite funkcije cilja (minimizacija odstupanja napona, minimizacija troškova preuzete električne energije i minimizacija snage gubitaka). Poređenjem rezultata simulacija je zaključeno da se primjenom algoritma pametnog punjenja postižu najbolji rezultati sa aspekta distributivnog sistema. Naime, demonstrirano je da nekoordinisanim punjenjem električnih vozila dolazi do pada efektivne vrijednosti napona ispod dozvoljenih granica odstupanja i značajnog povećanja opterećenja sistema i snage gubitaka tokom vršnog perioda. Sa druge strane, po pitanju punjenja vozila tokom niže tarife, pokazano je da bi mreža u tom periodu mogla da izdrži povećanje opterećenja bez potrebe za dodatnim ulaganjem. Međutim, kako dvojna tarifa može rezultirati pomjeranjem određenog dijela potrošnje iz dnevnih u noćne sate, a ova varijanta ne uključuje optimizaciju prilikom promjene vrijednosti snage opterećenja, istaknuto je da bi ova situacija mogla rezultirati pojavom dodatnog vršnog opterećenja, čime bi ograničenja u sistemu bila ugrožena. Prema tome, posljednja varijanta u kojoj je uzeto u obzir stanje distributivnog sistema prilikom utvrđivanja snage punjenja vozila je pokazala najbolje rezultate.

Dodatno, kako bi ove tri varijante bile posmatrane u realnim okolnostima, odnosno realnom sistemu, sprovedena je i simulacija sva tri slučaja na dijelu distributivne mreže u Podgorici – izvod Radoje Dakić 2 iz TS 110/10 kV Podgorica 4. Rezultati simulacije u ovom slučaju su potvrdili zaključke donesene u prethodnoj analizi, odnosno da algoritam pametnog punjenja dovodi do najboljih prilika u distributivnom sistemu.

Na kraju, sprovedena je i analiza rezultata simulacije dvije varijante - nekoordinisanog i koordinisanog punjenja električnih vozila – u distributivnom sistemu koji sadrži obnovljive izvore (savremenom distributivnom sistemu). Kod algoritma koordinisanog punjenja je uzeta u obzir i mogućnost injektiranja uskladištene energije iz baterije vozila u mrežu. Rezultati simulacije su pokazali da u slučaju nekoordinisanog punjenja električnih vozila u unaprijed definisanim trenucima (očekivanim trenucima punjenja u odnosu na navike stanovništva), dolazi do prevelikog povećanja vršnog opterećenja čvorova, koje dovodi do pretjeranog pada

napona u pojedinim čvorovima mreže, i pored činjenice da se u blizini navedenih čvorova nalaze distribuirani proizvodni objekti. Dodatno, demonstrirano je da dolazi i do povećanja gubitaka u sistemu (što je indikator povećanog opterećenja sistema) u ovoj varijanti tokom vršnih sati. Sa druge strane, prikazani su benefiti optimizacije punjenja i sa aspekta distributivnog sistema i sa aspekta potrošača u zavisnosti od odabrane funkcije cilja. Dakle, demonstrirano je da se primjenom algoritma koordinisanog punjenja postižu mnogo bolje naponske prilike u sistemu (napon se kreće u okviru dozvoljenih granica za sve primijenjene funkcije cilja), dok se dijagram opterećenja čvorova mijenja u zavisnosti od toga da li je cilj ekonomska optimizacija sa aspekta korisnika ili optimizacija vrijednosti odgovarajuće promjenljive u sistemu. Takođe, istaknuto je da se povećanje vršnog opterećenja u čvorovima mreže (mnogo manje povećanje nego u prethodnom slučaju) može objasniti koordinacijom punjenja sa proizvodnjom distribuiranih izvora. Primjenom funkcije cilja kojom se minimizuje varijacija opterećenja u pojedinačnim čvorovima mreže, demonstrirano je da se postiže bolje iskorišćenje mreže po pojedinačnom potrošaču, budući da se opterećenje usljed punjenja električnog vozila ne povećava iznad vrijednosti vršnog opterećenja posmatranog potrošača (pri penetraciji električnih vozila od 0 %), pa se samim tim izbjegava potreba za povećavanjem kapaciteta vodova. Dodatno, izvršeno je poređenje promjene gubitaka u sistemu prilikom koordinisanog punjenja kojim se minimizuju gubici u mreži i u slučaju nekoordinisanog punjenja. Sprovedenom analizom je potvrđeno da se koordinacijom punjenja dobijaju mnogo ujednačenije vrijednosti snage gubitaka tokom punjenja vozila, za razliku od nekoordinisanog punjenja kod kojeg u ovim trenucima dolazi do značajnog porasta snage gubitaka.

Iako se primjenom predloženih algoritama koordinacije punjenja postižu željeni rezultati, njihova primjena nije moguća bez adekvatne integracije informacionih i komunikacionih tehnologija u distributivni sistem, odnosno implementacije pametne mreže. Kao što je naglašeno u Potpoglavlju 2.6.3, nesumnjivo da dalji razvoj sistema ide ka promovisanju pametnih mreža i mogućnosti koje dvostrana komunikacija i optimizacija pružaju. Međutim, imajući u vidu složenost već izgrađene distributivne mreže, broj postojećih potrošača (koji će se povećavati), velikog broja ograničenja i velike cijene implementacije koncepta pametne mreže, izvjesno je da će za ovakav poduhvat biti potrebno mnogo vremena, koje će zavisiti od stepena razvoja pojedinačne države. Dodatno, polazna pretpostavka za primjenu navedenih algoritama je mogućnost raspolaganja sa podacima o parametrima mreže, koji u slučaju distributivnog sistema često nisu poznati, što predstavlja veliko ograničenje za utvrđivanje optimalnog šablona punjenja korišćenjem predloženih algoritama.

Kako su navedeni algoritmi koordinacije razvijeni za dan unaprijed, a imajući u vidu važnost balansiranja EES-a u realnom vremenu i neizvjesnosti koje se javljaju prilikom upravljanja sistemom, dalje istraživanje će biti usmjereno ka razvoju algoritama za koordinaciju punjenja električnih vozila u realnom vremenu. Budući da je primjenom CONOPT solvera postignuta velika brzina konvergencije dan unaprijed algoritama, otvara se mogućnost razvoja algoritma koordinacije u realnom vremenu u GAMS programskom okruženju. Koordinacijom punjenja električnih vozila u realnom vremenu bi se postigla pravovremenost optimizacije punjenja u zavisnosti od trenutnih vrijednosti promjenljivih u sistemu, kao i vrijednosti cijene električne energije na balansnom tržištu, čime bi se omogućilo učestvovanje električnih vozila i u procesu balansiranja sistema (naravno, uz odgovarajuću koordinaciju sa velikim brojem električnih vozila). Takođe, imajući u vidu da baterije u električnim vozilima imaju ograničenja u pogledu broja ciklusa punjenja i pražnjenja, dalje istraživanje će biti bazirano na razvoju algoritma optimizacije punjenja električnih vozila koji

uzima u obzir i ova ograničenja baterije, kako ne bi došlo do smanjenja njenog životnog vijeka, što može biti slučaj zbog prevelikog broja ciklusa punjenja i pražnjenja tokom istog dana usljed injektiranja električne energije u distributivni sistem.

7. Literatura

- [1] ENTSO-E, ENTSG (2020). „*TYNDP 2020 Scenario Report*“. Dostupan na: https://www.entsos-tyndp2020-scenarios.eu/wp-content/uploads/2020/06/TYNDP_2020_Joint_ScenarioReport_final.pdf
- [2] SONI (2020). „*Tomorrow's Energy Scenarios Northern Ireland 2020*“. Dostupan na: <http://www.soni.ltd.uk/media/documents/TESNI-2020.pdf>
- [3] Qiuwei Wu. (2013). „*Grid Integration of Electric Vehicles in Open Electricity Markets*“. United Kingdom: John Wiley & Sons, Ltd.
- [4] Pecas Lopes J.A., Soares F.J. and Rocha Almeida P.M. (2009). „*Identifying Management Procedures to Deal with Connection of Electric Vehicles in the Grid*“. IEEE Bucharest Power Tech Conference, June 28th – July 2nd, pp. 1-8, Bucharest, Romania.
- [5] Clement-Nyns, K., Haesen, E. and Driesen, J. (2010). „*The Impact of Charging Plug-in Hybrid Electric vehicles on a Residential Distribution Grid*“. IEEE Transactions on Power Systems, vol. 25, no. 1, pp. 371-380
- [6] Ruiqin, D. and Zhongjing, M. (2015). „*Resident Electric Vehicles Charging Optimization Strategy in the Smart Grid*“. Proceedings of the 34th Chinese Control Conference, July 28-30, pp. 9054-9059, Hangzhou, China
- [7] Zhou, K. and Cai, L. (2014). „*Randomized PHEV Charging Under Distribution Grid Constraints*“. IEEE Transactions on Power Systems, vol. 5, no. 2, pp. 879-887
- [8] Cao, C., Wang, L. and Chen, B. (2016). „*Mitigation of Impact of High Plug-in Electric Vehicle Penetration on residential Distribution Grid Using Smart Charging Strategies*“. Energies 2016, vol. 9, no. 12, pp. 1-19.
- [9] Pecas Lopes, J.A., Soares, F.J. and Rocha Almeida, P.M. (2011). „*Integration of Electric Vehicles in the Electric Power System*“. Proceedings of the IEEE, vol. 99, no. 1, pp. 198-183
- [10] Rahimi, S., Zhu, K., Massucco, S., Silvestro, F. and Steen, D. (2014). „*Using Advanced DMS Functions to Handle the Impact of Plug-in Electric Vehicles on Distribution Networks*“. IEEE International Electric Vehicle Conference (IEVC), pp. 1-8, Florence, Italy
- [11] Wang, R., Wang, P. and Xiao, G. (2018). „*Intelligent Microgrid Management and EV control Under Uncertainties in Smart Grid*“. Springer Nature Singapore, Singapore.
- [12] Mortaz, E. and Valenzuela, J. (2016). „*Microgrid Energy Scheduling Using Storage from Electric Vehicles*“. Electric Power System Research, Elsevier, vol. 143, pp. 554 – 562
- [13] Jiang, X., Wang, J. and Han Y. (2017). „*Coordination of Electric Vehicles Charging/Discharging and Renewable Energy Resources Power in Microgrid*“. Procedia Computer Science, vol. 107, pp. 157-163
- [14] Bhatti, A.R., Salam, Z. and Ashique, R.H. (2016). „*Electric Vehicle Charging Using Photovoltaic based Microgrid for Remote Islands*“. Applied Energy Symposium and Forum, REM2016: Renewable Energy Integration with Mini/Microgrid, vol. 103, pp. 214-218, Maldives

- [15] Bayati, M., Gharehpetian, G.B. and Farahmandrad, M. (2019). „*Short-term Interaction between Electric Vehicles and Microgrid in Decentralized Vehicle-to-Grid Control Methods*“. Protection and Control of Modern Power Systems, vol.4, no. 5, pp. 1-11
- [16] Karfopoulos, E.L., Papadopoulos, Skarvelis-Kazakos, S., Grau, I., Cipigan, I.M., Hatziaargyriou, N. and Jenkins, N. (2011) „*Introducing electric Vehicles in Microgrids Concept*“. International Conference on Intelligent Systems Applications to Power Systems (ISAP), pp. 1-6, Hersonissos, Greece
- [17] Vujošević I. (2006) „*Analiza elektroenergetskih sistema I*“, Elektrotehnički fakultet, Podgorica
- [18] Shahnian F., Arefi A., Ledwich G. (2018). „*Electric Distribution Network Planning*“. Springer, Power Systems
- [19] Sallam A., Malik O. P. (2011). „*Electric Distribution Systems*“. IEEE Press Series on Power Engineering, Wiley, New Jersey
- [20] Gönen T. (2014), „*Electric Power Distribution Engineering*“, 3rd edition, CRC Press, Tazlor & Francis Group
- [21] Perez-Arriaga I. J. (2013). „*Regulation of the Power Sector*“. Power Systems. Springer – Verlag, London
- [22] Short T. (2004). „*Electric Power Distribution Handbook*“. The Electric Power Engineering Series, CRC Press
- [23] Al-Jaafreh M. A. A., Mokryani G. (2019). „*Planning and Operation of Low Voltage Distribution Networks: A Comprehensive Review*“. IET and Tianjin University
- [24] Kersting W. H., Mendive D. L. (1976). „*An Application of Ladder Network Theory to the Solution of Three Phase Radial Load Flow Problem*“. Las Cruces: New Mexico State University
- [25] Cheng C. S., Shirmohammadi D. (1995). „*A Three Phase Power Flow Method for Real Time Distribution System Analysis*“. Electrical Power and Energy Systems, vol. 13, no. 3, pp. 671-679
- [26] Haque M. H. (1996). „*Efficient Load Flow Method for Distribution System with Radial or Mesh Configuration*“. IEE Proceedings Generation, Transmission and Distribution, vol. 143, no. 1, pp. 33-38
- [27] Teng J. H. (2000). „*A Modified Gauss-Seidel Algorithm of Three Phase Power Flow Analysis in Distribution Networks*“. Electrical Power & Energy System, vol. 24, no. 3, pp. 97-102
- [28] Zhang F., Cheng C. S. (1997). „*A Modified Newton Method for Radial Distribution Load Flow Analysis*“. IEEE Transactions on Power Systems, vol. 12, no. 1, pp. 389-397
- [29] Zimmerman R. D., Chiang H. D. (1995). „*Fast Decoupled Power Flow for Unbalanced Radial Distribution Systems*“. IEEE Transactions on Power Systems, vol. 10, no. 4, pp. 2045-2052
- [30] Mishra S., Das D. (2008). „*Distribution System Load Flow Methods: A Review*“. The Icfai University Press. Journal of Electrical and Electronics Engineering, vol. 1, pp. 7-25
- [31] Lakervi E., Holmes E. J. (2007). „*Electricity Distribution Network Design*“. 2nd edition. IET Power and Energy Series.

- [32] Council of European Energy Regulators (CEER). 2020. „2nd CEER Report on Power Losses“, Ref: C19-EQS-101-03. Dostupan na: <https://www.ceer.eu/documents/104400/-/-/fd4178b4-ed00-6d06-5f4b-8b87d630b060>
- [33] Fumagalli E., Schiavo L. L. (2009). „Regulating and improving the quality of electricity supply: the case of Italy“. European Review of Energy Markets, vol. 3, issue 3, pp. 1-27
- [34] EN 50160. (2010). „Voltage characteristics of electricity supplied by public electricity networks“
- [35] Hadjsaid N., Sabonnadiere J. C. (2011). „Electrical Distribution Networks“. ISTE and Wiley
- [36] *The Paris Agreement*, Adopted Dec. 12, 2015; entered into force Nov. 4, 2016
- [37] *Treći nacionalni izvještaj Crne Gore o klimatskim promjenama* (2020)
- [38] Meeus, L. (2020) „The Evolution of Electricity Markets in Europe“, Edward Elgar, Cheltenham, UK
- [39] Schittekatte, T., & Meeus, L. (2018). „Introduction to network tariffs and network codes for consumers, prosumers, and energy communities“. FSR Technical report
- [40] Zareipour H., Bhattacharya K., Canizares C.A. (2004). „Distributed Generation: Current Status and Challenges“. IEEE Proceedings of NAPS
- [41] MIT Energy Initiative (2016). „Utility of the Future“. Dostupan na: <http://energy.mit.edu/research/utility-future-study/>
- [42] Bansal R. (2017). „Handbook of distributed generation“. Electric Power Technologies, Economics and Environmental Impacts. Springer
- [43] Seadi T. A., Rutz D., Prassl H., Kottner M., Finsterwalder T., Volk S., Janssen R. (2008). „Biogas Handbook“. University of Southern Denmark Esbjerg
- [44] Stephens, J.C., Wilson, E.J. and Peterson, T.R. (2015). „Smart Grid (R)Evolution: Electric Power Struggles“. Cambridge: Cambridge University Press
- [45] ABB. (2009). „Towards a smarter grid: ABB's Vision for the Power System of the future“. USA: ABB Inc. Report
- [46] Salman K. S. (2017). „Introduction to the Smart Grid – Concepts, Technologies and Evolution“. IET Energy Engineering
- [47] Larminie J., Lowry J. (2003). „Electric Vehicle Technology Explained“. Jonh Wiley & Sons
- [48] National Grid ESO (2020). „Future Energy Scenarios“. Dostupan na: <https://www.nationalgrideso.com/document/173821/download>
- [49] Niestadt M., Bjornavold A. (2019). „Electric road vehicles in the European Union: Trends, impacts and policy“. European Parliamentary Research Service. Dostupan na: [https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/BRIE/2019/637895/EPRS_BRI\(2019\)637895_EN.pdf](https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/BRIE/2019/637895/EPRS_BRI(2019)637895_EN.pdf)
- [50] IRENA (2019). „Innovation landscape brief: Renewable Power-to-Hydrogen“. International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi. Dostupan na: https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2019/Sep/IRENA_Power-to-Hydrogen_Innovation_2019.pdf

- [51] Ehsani M., Gao Y., Longo S., Ebrahimi K. (2018). „*Modern Electric, Hybrid Electric, and Fuel Cell Vehicles*“. CRC Press, Taylor & Francis Group, 3rd edition
- [52] Mihet-Popa L., Camacho O. (2014). „*Fast Charging and Smart Charging Tests for Electric Vehicles Batteries Using Renewable Energy*“. Oil & Gas Science and Technology – Rev. IFP Energies nouvelles, vol. 71, no. 1, pp. 1-12
- [53] Un-Noor F., Padmanaban S., Mihet-Popa L. (2017). „*A Comprehensive Study of Key Electric Vehicle (EV) Components, Technologies, Challenges, Impacts, and Future Direction of Development*“. Energies, vol. 10, no. 8, pp. 1-84
- [54] Deng J., Bae C., Denlinger A., Miller T. (2020). „*Electric Vehicles Batteries: Requirements and Challenges*“, Joule, vol. 4, issue 3, pp. 511-515
- [55] Sanguesa J. A., Torres-Sanz V., Garrido P., Martinez F. J., Marquez-Barja J. M. (2021). „*A Review on Electric Vehicles: Technologies and Challenges*“. Smart Cities, vol. 4, no. 1, pp. 372–404.
- [56] Yu, QQ., Xiong, R., Wang, LY., Lin, C. (2018) „*A Comparative Study on Open Circuit Voltage Models for Lithium-ion Batteries*“. Chinese Journal of Mechanical Engineering vol. 31, no. 65, pp. 1-8
- [57] Zhang R., Xia B., Li B., Cao L., Lai Y., Zheng W., Wang H., Wang W., Wnag M., 2018, „*A Study on the Open Circuit Voltage and State of Charge Characterization of High Capacity Lithium-Ion Battery Under Different Temperature*“, Energies, vol. 11, no. 9, pp. 1-17
- [58] Bhatt, P., N., Mehar, H., Sahajwani, M. (2018) „*Electrical Motors for Electric Vehicle – A Comparative Study*“. Proceedings of Recent Advances in Interdisciplinary Trends in Engineering & Applications (RAITEA) 2019
- [59] Hirst D., Winnett J., Hinson S. (2021). „*Electric vehicles and infrastructure*“. House of Commons Library, Number CBP-7480. Dostupan na: <https://researchbriefings.files.parliament.uk/documents/CBP-7480/CBP-7480.pdf>
- [60] Capgemini invent. (2020). „*Electric vehicles in Belgium: Charging towards the future*“. Dostupan na: <https://www.capgemini.com/be-en/wp-content/uploads/sites/17/2020/06/Electric-Vehicles-in-Belgium-charging-towards-the-future-capgemini-1.pdf>
- [61] CODA STRATEGIES. (2019). „*Analysis: Electric vehicle charging infrastructure - Summary*“. Dostupan na: <https://www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/2019-07-Synth%C3%A8se-IRVE-English.pdf>
- [62] Vermont Energy Investment Corporation (2014). „*Electric Vehicle Charging Station Guidebook*“. Dostupan na: <https://www.driveelectricvt.com/Media/Default/docs/electric-vehicle-charging-station-guidebook.pdf>
- [63] Gong X., Rangaraju J. (2020). „*Taking charge of electric vehicles – both in the vehicle and on the grid*“. Texas Instruments
- [64] Pistoia, G. (2010). „*Electric and Hybrid Vehicles: Power Sources, Models, Sustainability, Infrastructure and the Market*“. Amsterdam, Netherlands
- [65] Lu, M., H., Jen, M., U. (2012) „*Safety Design of Electric Vehicle Charging Equipment*“. World Electric Vehicle Journal, vol. 5, no. 4, pp. 1017-1024, Los Angeles, California

- [66] Islam R., Shah R., Ali M. H. (2021). „*Emerging Power Converters for Renewable Energy and Electric Vehicles: Modeling, Design and Control*“. CRC Press, Taylor & Francis
- [67] Đorđević A. R., Olćan D. I. (2012). „*Ispitivanje elektromagnetske kompatibilnosti*“, Beograd
- [68] Emadi A. (2015). „*Advanced Electric Drive Vehicles*“. CRC Press, Taylor & Francis
- [69] Chon S., Bhardwaj M., Nene H. (2018). „*Maximizing power for Level 3 EV charging stations*“. Texas Instruments
- [70] Texas Instruments. (2020). „*Design guide: T1DM-1000, Vienna Rectifier-Based, Three-Phase Power Factor Correction (PFC) Reference Design Using C2000TM MCU*“
- [71] Yilmaz M., Krein P., T. (2013). „*Overview of Battery Charger Topologies in Plug-in Electric and Hybrid Vehicles*“. IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 28, no. 5, pp. 2151-2169
- [72] Rajakaruna S., Shahnia F., Ghosh A. (2015). „*Plug In Electric Vehicles in Smart Grids*“. Springer, Power Systems,
- [73] Ottorino V. (2017). „*Technologies and Applications for Smart Charging of Electric and Plug-in Hybrid Vehicles*“. Springer, Switzerland
- [74] Noel L., Rubens G. Z., Kester J., Sovacool B. (2019). „*Vehicle-to-Grid: A Sociotechnical Transition Beyond Electric Mobility*“. Energy, Climate and Environment. Palgrave Macmillan
- [75] A. Aref, M. Davoudi, F. Razavi and M. Davoodi. (2012). „*Optimal DG placement in distribution networks using intelligent systems*“. Energy and Power Engineering, vol. 4, no. 2, pp. 92-98
- [76] Soroudi, A. (2017). „*Power System Optimization Modeling GAMS*“. Springer International Publishing AG
- [77] Mahmud K., Soetanto D., Town G. E. (2018). „*Energy Management Softwares and Tools*“. Comprehensive Energy Systems, vol. 5, pp. 207-257
- [78] Čalasan M., Nikitović L., Mujović S. (2019). „*CONOPT solver embedded in GAMS for optimal power flow*“. Journal of Renewable and Sustainable Energy, vol. 11, pp. 1-16
- [79] Said D., Cherkaoui S., Khoukhi L. (2014). „*Multi-priority queuing for electric vehicles charging at public supply stations with price variation*“. Wiley Online Library, vol. 15, no. 6, pp. 1-17
- [80] Talari, S., Shafie-khah, M., Osorio, G.J., Aghaei, J. and Catalao, J.P.S. (2017). „*Stochastic Modelling of Renewable Energy Sources from Operators' Point-of-view: A survey*“. Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 81, pp. 1953-1965.
- [81] Yu Z., Tuzuner A. (2008). „*Wind speed modeling and energy production simulation with Weibull sampling*“. IEEE Power and Energy Society General Meeting - Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century, pp. 1-6
- [82] Lv Y., Guan L., Tang Z., Zhao Q. (2016). „*A Probability Model of PV for the Middle-Term to Long-Term Power System Analysis and Its Application*“. Elsevier Ltd