

UNIVERZITET CRNE GORE
ELEKTROTEHNIČKI FAKULTET
PODGORICA



Lazar Dulović

**NESIMETRIJA NAPONA NAPAJANJA KAO PARAMETAR KVALITETA
ELEKTRIČNE ENERGIJE I NJEN UTICAJ NA KARAKTERISTIKE RADA
ASINHRONIH MOTORA**

-MAGISTARSKI RAD-

Podgorica, 2018.

PODACI I INFORMACIJE O MAGISTRANDU

Ime i prezime	Lazar Dulović
Datum rođenja	07.10.1990. godine, Cetinje
Naziv završenog osnovnog studijskog programa i godina diplomiranja	Elektrotehnički fakultet, odsjek za Energetiku i Automatiku, 2015.

INFORMACIJE O MAGISTARSKOM RADU

Naziv postdiplomskog studija	Elektroenergetski sistemi
Naslov rada	Nesimetrija napona napajanja kao parametar kvaliteta električne energije i njen uticaj na karakteristike rada asinhronih motora
Fakultet na kojem je rad odbranjen	Elektrotehnički fakultet, Podgorica

UDK, OCJENA I ODBRANA MAGISTARSKOG RADA

Datum prijave magistarskog rada	10.10.2017.
Datum sjednice Vijeća Univerzitetske jedinice na kojoj je prihvaćena tema	23.01.2018.
Komisija za ocjenu teme i podobnosti magistranda	prof. dr Jadranka Radović prof. dr Gojko Joksimović prof. dr Ilija Vujošević
Mentor	prof. dr Jadranka Radović
Komisija za ocjenu rada	prof. dr Jadranka Radović prof. dr Gojko Joksimović prof. dr Ilija Vujošević
Komisija za odbranu rada	prof. dr Jadranka Radović prof. dr Gojko Joksimović prof. dr Ilija Vujošević
Datum odbrane	08.02.2019.

Predgovor

Nesimetrije napona, kao jedan od osnovnih parametara kvaliteta električne energije, su vrlo važan pokazatelj stanja nekog elektroenergetskog sistema. Zbog same prirode i dinamike elektroenergetskog sistema, karakteristika elemenata sistema i potrošača, kao i negativnih spoljašnjih uticaja, nesimetrije napona su neminovni pratilac rada svakog elektroenergetskog sistema, prvenstveno na distributivnom i potrošačkom nivou. Kako ih je praktično u potpunosti nemoguće izbjeći, teži se ograničenju nesimetrija na definisane-standardizovane nivoe, uz adekvatan monitoring i ispitivanja njihovog uticaja na sistem i priključene potrošače.

Posebno značajan aspekt analize nesimetrija napona napajanja kao parametra kvaliteta električne energije je njihov uticaj na rad potrošača. Nivo tog uticaja prvenstveno zavisi od vrste potrošača, a naravno i od karaktera i veličine nesimetrija. Među veoma raznovrsnim potrošačima, električne mašine su potrošači posebno "osjetljivi" na ovu vrstu poremećaja kvaliteta električne energije. U praksi, najrasprostranjeniji vid električne mašine jeste asinhrona mašina i to dominantno u motornom režimu rada. Stoga su analize karakteristika asinhronih motora pri napajanju nesimetričnim naponima veoma značajne, prvenstveno u cilju sagledavanja i definisanja svih parametara negativnog uticaja, definisanja dozvoljenog nivoa nesimetrija, kao i mogućih mjera za eliminaciju, odnosno smanjenja negativnih uticaja nesimetrija na rad asinhronih motora. Od ostalih parametara kvaliteta električne energije, na rad asinhronih motora značajan uticaj imaju odstupanje vrijednosti i viši harmonici napona napajanja.

Analiza uticaja nesimetrija napona napajanja na rad asinhronih motora, osnovni su naučno-istraživački cilj ovog magistarskog rada. Razvijena metodologija i rezultati analize, sa formiranim simulacionim modelom i realizovanim mjerenjima u laboratorijskim uslovima, osnovni su doprinos ovog magistarskog rada, koji kao takav može poslužiti inženjerima u praksi za konkretna istraživanja i projektovanje naponskih regulacionih uređaja u pogonima sa asinhronim motorima.

Ovom prilikom autor želi da se zahvali svojoj mentorki prof. dr Jadranki Radović na saradnji, ažurnosti, uloženom vremenu, trudu, strpljenju i prije svega razumijevanju, čime se značajno doprinijelo finalizaciji ovog rada.

Veliku zahvalnost autor duguje odsjeku za električne mašine, Elektrotehničkog fakulteta Univerziteta „La Sapienza” u Rimu, u čijim laboratorijama su obezbijeđeni uslovi za sprovođenje eksperimenata. Takođe autor se posebno zahvaljuje prof. dr Masimu Pompiliju i prof. dr Federiku Karikiju na korisnim i krajnje nesebičnim savjetima vezanim za sama mjerenja.

Izvod rada

Nesimetričnosti među fizičkim veličinama, a pogotovo faznim naponima, unutar trofaznog sistema mogu biti produkt spoljašnjih i unutrašnjih uticaja na elektroenergetski sistem. Jednostavno ih je nemoguće izbjeći uslijed velikog broja faktora zbog kojih se javljaju. Ključno je, da je uticaj naponskih nesimetrija negativan kako na režim rada i opremu elektroenergetskog sistema, tako i na priključene potrošače. Uzroci nesimetrija napona, koji se u realnim-“živim” elektroenergetskim sistemima praktično ne mogu eliminisati, kao i njihove posljedice, čine nesimetriju napona jednim od osnovnih parametara kvaliteta električne energije, aktuelnim i praktično veoma značajnim za naučno-stručna istraživanja. Pojava nesimetrija napona u trofaznim elektroenergetskim sistemima, karakteristična je prvenstveno za distributivne mreže, odnosno za trofazni sistem napona napajanja, gdje njene posljedice direktno trpe priključeni potrošači.

U ovom magistarskom radu, analiziran je negativan uticaj nesimetrija napona napajanja na karakteristike i rad asinhronih motora. Cilj rada je da se identifikuju svi negativni uticaji nesimetrija napona napajanja, njihov nivo i posljedice, te da se kroz adekvatnu analizu definiše dozvoljeni nivo nesimetrija, kao i smjernica za održavanje i unapređenje kvaliteta električne energije radi ostvarenja energetske efikasnosti u radu asinhronih motora.

U radu su opisani parametri koji definišu kvalitet električne energije, odnosno kvalitet napona. Predstavljeni su uzroci i vrste deformacija talasnog oblika napona, kao i osnovni parametri, u sklopu dvije osnovne grupe faktora koje određuju kvalitet napona napajanja. Posebno je istaknuta nesimetrija napona napajanja, njene karakteristike, indikatori, uzroci i posljedice. Takođe je predstavljen princip rada i elementi konstrukcije asinhronne mašine.

Za realizaciju postavljenih naučno-istraživačkih ciljeva, razvijen je simulacioni model za analizu uticaja nesimetrija na karakteristike i rad asinhronih motora. Takođe su u laboratorijskim uslovima, izvršena mjerenja karakteristika asinhronog motora pri različitim nivoima nesimetrija napona napajanja. Rezultati kompjuterskih simulacija i realizovanog eksperimenta, prikazani su kroz tabelarne (brojčane) i grafičke prikaze, uz detaljno poređenje i analizu dobijenih rezultata. Na osnovu te analize izvedeni su odgovarajući zaključci o narušenosti karakteristika rada asinhronih motora u uslovima prisustva nesimetrija u naponu napajanja, ukazano na štetne posljedice takvih uslova rada i date smjernice za njihovo otklanjanje.

Ključne riječi: kvalitet električne energije, nesimetrije napona, karakteristike asinhronih motora.

Abstract

The unbalance between physical quantities, and especially phase voltages, within a three-phase system can occur due to external and internal influences on the electric power system. It is virtually impossible to avoid them due to a large number of factors that can cause them. It is crucial that the effect of voltage unbalance is negative both on the operation mode and equipment of the electric power system and connected consumers.

The causes of voltage unbalance, which practically cannot be eliminated in live electrical systems, as well as its consequences, make voltage unbalance, as one of the basic parameters of electric power quality, a prominent and very important practical issue in scientific and professional research. The occurrence of voltage unbalance in three-phase power systems is characteristic primarily of distribution networks, i.e. of three-phase voltage supply systems, where connected consumers are directly affected by its consequences.

In this master thesis, the negative influence of voltage unbalance on the characteristics and operation of asynchronous motors is analyzed. The aim of the paper is to identify all the negative effects of supply voltage unbalance and their level and consequences and to define, through adequate analysis, the allowed level of unbalance, as well as the guidelines for the maintenance and improvement of electric power quality in order to achieve energy efficiency in the operation of asynchronous motors.

The paper describes the parameters that define electric power quality, that is, voltage quality. The causes and types of voltage waveform distortion are presented, as well as the basic parameters within the two basic groups of factors that determine the quality of supply voltage. A special focus is placed on supply voltage unbalance and its characteristics, indicators, causes and consequences. In addition, the operation mode and the elements of the asynchronous machine structure are also presented.

In order to achieve our research goals, a simulation model was developed to analyze the impact of unbalance on the characteristics and operation of asynchronous motors. In addition, measurements of the characteristics of the asynchronous motor at different levels of voltage unbalance were performed in laboratory conditions. The results of computer simulations and the performed experiment are presented through tabular (numerical) and graphic representations, alongside a detailed comparison and analysis of the obtained results. Based on this analysis, appropriate conclusions were drawn as regards the impairment of the performance of asynchronous motors in the presence of supply voltage unbalance, the harmful effects of such operating conditions were indicated, and guidelines for their removal suggested.

Key words: electric power quality, voltage unbalance, asynchronous motors characteristics

Sadržaj

UVOD.....	8
1. NESIMETRIJA NAPONA KAO PARAMETAR KVALITETA ELEKTRIČNE ENERGIJE.....	10
1.1. KVALITET ELEKTRIČNE ENERGIJE.....	10
1.1.1. Opšte o kvalitetu električne energije.....	10
1.1.2. Osnovni parametri kvaliteta napona.....	12
1.1.2.1. Varijacija napona.....	13
1.1.2.2. Varijacija frekvencije.....	13
1.1.2.3. Nesimetrija napona.....	14
1.1.3. Deformacije talasnih oblika napona.....	15
1.1.3.1. Tranzijenti.....	16
1.1.3.2. Deformacije u prelaznim režimima sistema.....	18
1.1.3.2. Deformacije u ustaljenom stanju.....	21
1.1.4. Indikatori kvaliteta električne energije.....	25
1.1.5. Normiranje pokazatelja kvaliteta električne energije.....	26
1.2. NESIMETRIJA NAPONA.....	28
1.2.1. Analiza nesimetričnih sistema napona.....	28
1.2.2. Indikatori nesimetrije napona.....	33
1.2.3. Uzroci i posljedice nesimetrija napona.....	36
1.2.3.1. Uzroci nesimetrija napona.....	36
1.2.3.2. Posljedice nesimetrija napona.....	38
2. OSNOVNE INFORMACIJE O ASINHRONJOJ MAŠINI.....	42
2.1. ISTORIJSKI OSVRT.....	42
2.2. KONSTRUKCIJA I PRINCIP RADA.....	44
2.3. EKVIVALENTNA ŠEMA.....	51
2.4. ENERGETSKI BILANS I ELEKTROMAGNETNI MOMENT.....	55
2.5. NESIMETRIČNO NAPAJANJE ASINHRONIH MOTORA.....	57
3. ANALIZA UTICAJA NESIMETRIČNOG NAPAJANJA NA KARAKTERISTIKE ASINHRONIH MOTORA.....	61
3.1. REZULTATI SIMULACIONOG MODELA.....	61
3.1.1. Karakteristike Simulacionog modela.....	61

3.1.2. Rezultati simulacija	63
3.2. REZULTATI EKSPERIMENTA.....	70
3.2.1. Šema veze	70
3.2.2. Oprema.....	72
3.2.3. Rezultati eksperimentalnih mjerenja	74
3.3. ANALIZA I POREĐENJE KARAKTERISTIKA ASINHRONIH MOTORA, DOBIJENIH SIMULACIJOM I EKSPERIMENTOM	80
3.3.1. Struje faza statora i električna snaga.....	81
3.3.2. Klizanje.....	85
3.3.3. Gubici i stepen iskorišćenja	86
3.3.4. Preventivne mjere za zaštitu od uticaja nesimetričnog napajanja	88
4. ZAKLJUČAK.....	90
POPIS OSNOVNE LITERATURE.....	95

UVOD

Na savremenom tržištu kvalitet čini osnovni parametar za definisanje vrijednosti nekog proizvoda. Pojavom tržišta, odnosno mogućnošću izbora proizvođača i distributera električne energije od strane potrošača, jedan od glavnih faktora pri izboru je upravo njen kvalitet. Razvojem tržišta električne energije, dolazi i do pojave sve više parametara koji opisuju električnu energiju, kao glavni proizvod elektroenergetskog sistema, sa više aspekata. Stoga javlja se više vrsta kvaliteta električne energije. Njegova pojava igra značajnu ulogu pri projektovanju i načinu održavanja sistema, kao i pri pravilnijem odabiru opreme i njene zaštite u određenim strukturama potrošnje. Međutim, neki od glavnih parametara kvaliteta električne energije jesu parametri kvaliteta napona među kojima je najznačajnija nesimetrija.

Nesimetrija napona, pojava u elektroenergetskom sistemu koja je prosto nezaobilazna, kako zbog same prirode i dinamike sistema tako i zbog negativnih spoljašnjih uticaja, predstavlja jedan od veoma interesantnih parametara kvaliteta za izučavanje. Uslijed izražene frekventnosti njene pojave, značajan je njen negativan uticaj na širok spektar potrošačkih jedinica. U cilju zaštite određene električne opreme i uređaja, veličina ovog parametra se konstantno prati i teži se njegovoj redukciji, otkud i proizilazi njegova aktuelnost.

U praksi, najzastupljeniji vid električne mašine jeste asinhrona mašina i to pretežno u motornom režimu rada. Njena zastupljenost ogleda se u prednosti asinhronih motora u odnosu na ostale vrste električnih motora kao što su prvenstveno manja cijena koštanja, jednostavnost konstrukcije, manji momenat inercije, robusnost, lako održavanje, pouzdanost i sigurnost u radu. Međutim, nedostaci primjene asinhronih motora su vezani uglavnom za uslove pokretanja i mogućnost regulisanja brzine obrtanja u širokim opsezima. Pojavom novih materijala i konstantnim napretkom tehnologije u oblasti energetske elektronike kao i primjenom mikroprocesora, omogućava se redukcija već pomenutih ograničavajućih faktora, što dovodi do poboljšanja konkurentnosti ove vrste mašine.

Zadatak ovog magistarskog rada jeste da izvrši sintezu ove dvije materije, tj. da sagleda uticaj nesimetričnih napona napajanja na karakteristike asinhronog motora pod opterećenjem. Detaljnim ispitivanjem teži se doći do što slikovitijeg prikaza pretežno negativnog uticaja pojave nesimetrije u cilju boljeg rukovanja, projektovanja ili zaštite ove vrste mašine. Uzimajući u obzir sve veću primjenu energetske efikasne asinhronih motora, kao velikim potencijalom uštede električne energije, raste značaj ovakve vrste naučno-istraživačkog ispitivanja.

Rad se sastoji od četiri poglavlja uključujući zaključak i popis korišćene literature.

Prvo poglavlje ovog rada govori o kvalitetu električne energije. Navedene su njegove opšte definicije i vrste, kao i njegov značaj u elektroenergetici. Definisani su i detaljno

predstavljani osnovni parametri kvaliteta napona. Zatim slijede grafički prikazi svih vrsta talasnih deformacija sa preciznom kategorizacijom i opisom. Posebno potpoglavlje prvog poglavlja rezervirano je za nesimetriju napona, kao glavnog parametra u izučavanju ovoga rada, u kojem su detaljno navedeni uzroci njene pojave, karakteristike, matematička interpretacija i njen uopšteni uticaj na električne uređaje i opremu.

U drugom poglavlju riječ je o asinhronoj mašini. Prvenstveno se govori o njenim kreatorima, vremenima nastanka, razvoja i patenta. Zatim, jasno su prikazane vrste konstrukcije asinhronne mašine i detaljno objašnjen princip rada u motornom režimu. Nakon toga predstavljeno je potpoglavlje ekvivalentne šeme praćeno matematičkim interpretacijama svih elemenata i njihovih međusobnih povezanosti, što ga čini jednim od značajnih segmenata pri proučavanju raznih režima rada i prelaznih pojava. Slijedi dio poglavlja koga čine matematički zapisi pojave elektromagnetnog momenta, snaga, stepena iskorišćenja kao i slikovit prikaz energetskog bilansa asinhronog motora. Završni dio ovog poglavlja sadrži ekvivalentne šeme i matematičke interpretacije inverznih komponenti parametara asinhronog motora koje se pojavljuju u slučaju nesimetričnog napajanja.

U uvodnom dijelu trećeg poglavlja kratko je naveden plan ispitivanja uticaja nesimetričnog napajanja na karakteristike opterećenog asinhronog motora. Ovo poglavlje sadrži potpoglavlje simulacionog modela i eksperimenta već pomenutog ispitivanja, kao i potpoglavlje sa njihovom uporednom analizom. U sklopu potpoglavlja simulacionog modela, predstavljani su njegova šema i karakteristike, način realizacije u određenom programskom paketu i grafički prikaz dobijenih karakteristika pri određenim uslovima sa kratkim opisom. Potpoglavlje eksperimenta sadrži prikaz opreme i uređaja korišćenih u ovom slučaju, šemu izvedbe kao i opisan način mjerenja. Takođe grafički su predstavljene karakteristike dobijene tokom eksperimenta za određene iznose nesimetrija praćene kratkim opisom. Posljednji segment trećeg poglavlja je ujedno i najvažniji, a čini ga potpoglavlje uporedne analize rezultata kompjuterske simulacije i ogleđa zajedno sa zaključnim razmatranjima. Tu su detaljno opisani određeni negativni uticaji nesimetrija na karakteristike asinhronog motora, sa neizostavnim grafičkim prikazima. Ovdje su posebno obrađeni negativni uticaji nesimetrija na fazne struje, snage faza, klizanje, gubitke unutar same mašine i stepen iskorišćenja, ali i preventivne mjere u cilju zaštite.

Četvrto i posljednje poglavlje ovog rada čini zaključak koji je rezime svih simulacija i ogleđa predstavljenih u prethodnim poglavljima sa ciljem da se da završna riječ o negativnim uticajima nesimetrije napona na karakteristike jedne od najzastupljenijih vrsta potrošača, asinhroni motor.

Na samom kraju dat je popis literature koja je korišćena pri izradi ovog rada.

1. NESIMETRIJA NAPONA KAO PARAMETAR KVALITETA ELEKTRIČNE ENERGIJE

1.1. KVALITET ELEKTRIČNE ENERGIJE

1.1.1. Opšte o kvalitetu električne energije

U savremenim elektroenergetskim sistemima, baziranim na deregulaciji elektroprivrede i uvođenju konkurencije među distributerima električne energije, pitanje kvaliteta električne energije poprima nove aspekte i značaj. Tako se govori o upotrebnom kvalitetu, ekološkom kvalitetu, komercijalnom kvalitetu i tehničkom kvalitetu električne energije. Stručna javnost pojam kvaliteta električne energije prvenstveno vezuje za tehnički kvalitet, u okviru kojeg se posmatraju dva osnovna aspekta: kvalitet isporuke i kvalitet isporučene električne energije. Kvalitet isporuke obuhvata problematiku sigurnosti i pouzdanosti napajanja električnom energijom, koje su praktično uključene u osnove funkcionisanja svakog elektroenergetskog sistema, kroz sve faze, od planiranja i izgradnje do eksploatacije i održavanja. Za razliku od ovog, može se reći tradicionalnog aspekta kvaliteta električne energije, kvalitet isporučene električne energije je "novi aspekt", izuzetno aktuelan i složen, vezan prvenstveno za eksploataciju elektroenergetskog sistema i uzajamno djelovanje sistema napajanja i potrošača. Kako se veza između sistema napajanja električnom energijom i potrošača u osnovi ostvaruje na distributivnom nivou, to se i pojam kvaliteta isporučene električne energije najčešće vezuje upravo za taj nivo, odnosno za napon napajanja kao osnovnu karakteristiku režima rada elektrodistributivnih sistema.

Kvalitet isporučene električne energije, sa aspekta elektrodistribucije, podrazumijeva kvalitet napona na sabirnicama na koje se priključuju razni potrošači, grupno ili pojedinačno. To je tačka zajedničkog priključka potrošača (*point of common coupling*–PCC). Napon u tački PCC je napon napajanja priključenih potrošača, čiji kvalitet u osnovi definiše kvalitet isporučene električne energije. Pri tome se pojam kvaliteta napona iskazuje preko odstupanja efektivne vrijednosti i talasnog oblika (sinusoidalnosti) napona od nazivnih, odnosno naznačenih vrijednosti i oblika. U trofaznim sistemima, kvalitet napona napajanja obuhvata i komponentu simetričnosti, definisanu kroz parametar nesimetrije napona napajanja. Nesimetrija napona je režim u kojem se naponi u trofaznom sistemu razlikuju po vrijednosti (amplitudi) i/ili je ugao između faza različit od 120° .

Na kvalitet napona pored karakteristika sistema napajanja, značajan uticaj imaju sami potrošači, prvenstveno grupa nelinearnih potrošača (najraznovrsniji elektronski uređaji sa poluprovodničkim prekidačkim komponentama, indukcione i elektrolučne peći, zasićene električne mašine, fluorescentno osvjetljenje i dr.), kao i karakteristike režima rada sistema i spoljašnji faktori (tranzijenti uslijed komutacija, atmosferski prenaponi, kratki spojevi,

zemljospojevi, preopterećenje, nagle varijacije i nesimetričan raspored opterećenja, naponske redukcije i dr.).

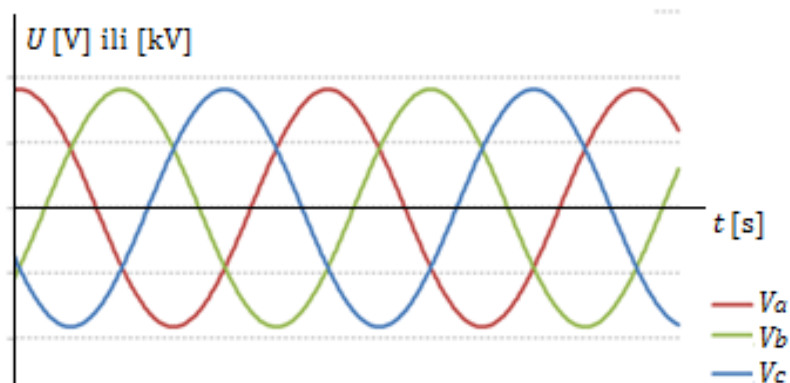
Mada su mnogi od pomenutih uzroka narušavanja kvaliteta napona neizbježni pratilac rada elektroenergetskih sistema u svim fazama njihovog razvoja, intezivnija istraživanja kvaliteta napona počinju upravo sa pojavom i masovnom primjenom potrošača iz kategorije nelinearnih elektronskih uređaja, kako zbog njihovog negativnog uticaja na kvalitet tako i zbog njihove “posebne osjetljivosti” na sniženje kvaliteta napona napajanja. U tu kategoriju tzv. “osjetljivih potrošača” spadaju računari i računarska oprema, TV i video uređaji, procesna oprema u industriji, uređaji i oprema upravljana mikroprocesorima i dr. Pored njih, štete zbog sniženog kvaliteta električne energije trpi i sam sistem (povećani gubici, intezivnije zagrijavanje i sniženi vijek trajanja opreme, pogrešno djelovanje zaštite i dr.) kao i drugi “manje osjetljivi” potrošači.

Posljedice nekvalitetnog napajanja mogu biti teške, često povezane sa značajnim finansijskim i materijalnim štetama. S obzirom na veoma različite efekte, kao što su resetovanje računara, gubljenje i pojava pogrešnih podataka, kvarovi komponenti i uređaja, prekidi proizvodnih procesa, škart u proizvodnji, pojava naponske rezonance, kvarovi kondenzatorskih baterija, otkazivanje upravljačkih sklopova, skraćenje životnog vijeka opreme, električnih mašina i kablova, povećanje gubitaka, smetnje u telekomunikacijama i dr., valorizacija ukupnih šteta je veoma otežana, često i nemoguća. U takvim uslovima analize uticaja sniženog kvaliteta napajanja na pojedinačne potrošače, odnosno određenu vrstu potrošača imaju poseban značaj. Na osnovu njih mogu se dobiti podaci kako za procjenu, odnosno normiranje parametara kvaliteta napona i projektovanje sistema zaštite i upravljanja, tako i za procjene šteta na pojedinačnom ili grupnom nivou. Zbog njihove masovne primjene, odnosno visokog učešća u potrošnji električne energije, posebno su značajna ispitivanja uticaja kvaliteta napona na karakteristike i rad asinhronih motora.

Kao što je rečeno, uzroci narušavanja kvaliteta napona, odnosno pojava deformacija napona mogu biti različiti i vezani za razne aspekte rada elektroenergetskog sistema, uticaje okoline na sistem, kao i za karakteristike i rad priključenih potrošača. Na bazi ovih uzroka, mogu se identifikovati pokazatelji kvaliteta električne energije, odnosno pokazatelji kvaliteta napona i izvršiti njihova klasifikacija. U literaturi koja se bavi problematikom kvaliteta električne energije, prisutne su različite klasifikacije pokazatelja kvaliteta. S obzirom na istraživačke ciljeve rada, ovdje je u okviru teorijskih razmatranja (Poglavlje 1.) data klasifikacija i kratak opis parametara zasnovan na razmatranjima iz [1], a koja se u osnovi baziraju na relevantnom standardu za kvalitet električne energije *IEEE Standard 1159-1995* [48].

Polazna osnova pri svim klasifikacijama i definisanjima parametara kvaliteta električne energije je činjenica da su u trofaznim naizmjeničnim sistemima, kakvi su praktično svi savremeni elektroenergetski sistemi (EES), generisani naponi sinusoidalni, odgovarajuće učestanosti (50 ili 60 Hz), jednakih vrijednosti (nazivne, odnosno naznačene vrijednosti) i međusobno fazno pomjereni za 120° (slika 1.). Idealno bi bilo da se te karakteristike napona

moгу zadržati na svim nivoima sistema, od prenosnog i distributivnog do potrošačkog, te da su naponi napajanja u svim tačkama priključka potrošača sinusoidalni, odgovarajuće nazivne, odnosno naznačene vrijednosti (400/230 V za većinu potrošača) i fazno simetrični.



Slika 1. Simetrični sistem napona u trofaznom naizmjeničnom sistemu

Međutim, uslijed niza uticajnih faktora, u različitim tačkama sistema, prvenstveno u krajnjim tačkama elektrodistributivnog sistema, dolazi do deformacija napona, izraženih kroz deformacije talasnog oblika i odstupanja vrijednosti napona, kao i kroz nesimetrije napona. Vrsta i nivo tih deformacija u posmatranoj tački sistema, odnosno u tački priključka potrošača, definišu kvalitet električne energije, odnosno kvalitet napona napajanja. Pri tome se kvalitet napona može izraziti preko dvije osnovne grupe pokazatelja [1]:

- osnovni parametri kvaliteta napona i
- deformacije talasnih oblika napona.

1.1.2. Osnovni parametri kvaliteta napona

U osnovne parametre kvaliteta napona, odnosno u prvu grupu pokazatelja kvaliteta električne energije spadaju:

- varijacija napona,
- varijacija frekvencije i
- pojava nesimetrije u mreži.

Ovi pokazatelji su osnovni parametri koji definišu pravilan rad sistema i njihova odstupanja od nazivnih vrijednosti za koje su sistem i potrošači projektovani definisana su odgovarajućim standardima, kao dozvoljeni limiti, odnosno tolerancije. Kvalitet električne energije je ugrožen ako su vrijednosti ovih pokazatelja izvan definisanih limita.

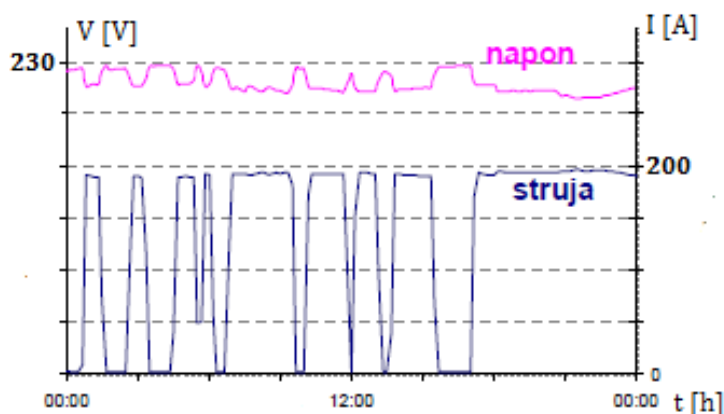
1.1.2.1. Varijacija napona

Veličina napona u posmatranoj tački sistema (mreže), definiše se kao efektivna vrijednost napona u toj tački, mjerena u određenom vremenskom periodu. Referentna vrijednost određena je nazivnim naponom mreže. U okviru elektrodistributivnog sistema, na potrošačkom nivou to je vrijednost 400/230 V, koja predstavlja nazivnu vrijednost napona napajanja dominantnog broja potrošača elektroenergetskog sistema.

Varijacija napona je promjena efektivne vrednosti napona sa amplitudom manjom ili većom od 10% nazivne vrijednosti, trajanja dužeg od 1 min.

Ove varijacije napona nastaju uslijed spore promjene opterećenja potrošača priključenih na mrežu, kao i uslijed pogrešno podešenih regulacionih transformatora.

Primjer varijacije napona u niskonaponskoj mreži, uzrokovan promjenom opterećenja, prokazan je na slici 2. [45].



Slika 2. Primjer promjene napona uzrokovane promjenom opterećenja

Negativne efekte varijacija napona iznad dozvoljenih limita, praktično trpe svi pogođeni potrošači, posebno ako su one prisutne u dužem vremenskom periodu.

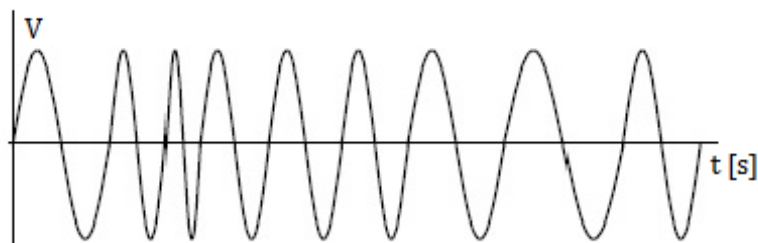
1.1.2.2. Varijacija frekvencije

Varijacija frekvencije je povećanje ili smanjenje frekvencije sistema u odnosu na njegovu specificiranu nazivnu vrijednost (50 ili 60 Hz). Trajanje varijacija frekvencije može biti od nekoliko perioda do nekoliko časova.

Varijacije frekvencije mijenjaju talasni oblik napona, u odnosu na oblik pri konstantnoj nazivnoj učestanosti, npr. kao na slici 3. [1].

Frekvencija elektroenergetskog sistema je u direktnoj vezi sa brzinom obrtanja generatora izvora električne energije i u svakom momentu zavisi od balansa između kapaciteta raspoloživih generatora, odnosno između proizvodnje i potrošnje električne energije (uključujući i gubitke). Kada se ovaj balans naruši, dolazi do izvjesne varijacije

frekvencije u sistemu. Varijaciju frekvencije mogu izazvati i slaba regulacija brzine lokalnih generatora, ispadi velikih potrošačkih blokova (pogona), ispadi generatorskih jedinica velike snage, kvarovi (kratki spojevi) u sistemu i dr.



Slika 3. Primjer talasnog oblika napona pri varijaciji frekvencije

Veličina promjene frekvencije i njeno trajanje zavisi od karakteristika potrošnje i odziva generatora na promjene potrošnje. Značajnije varijacije frekvencije koje prevazilaze standardima definisane limite, prvenstveno nastaju zbog većih kvarova u okviru prenosnog sistema, isključenja velikih grupa potrošača, ili isključenja velikih generatorskih jedinica.

Varijacije frekvencije iznad dozvoljenih limita mogu ugroziti stabilnost cjelokupnog sistema ili pojedinih njegovih djelova i uzrokovati značajne negativne efekte kako po sistem tako i za pogođene potrošače.

1.1.2.3. Nesimetrija napona

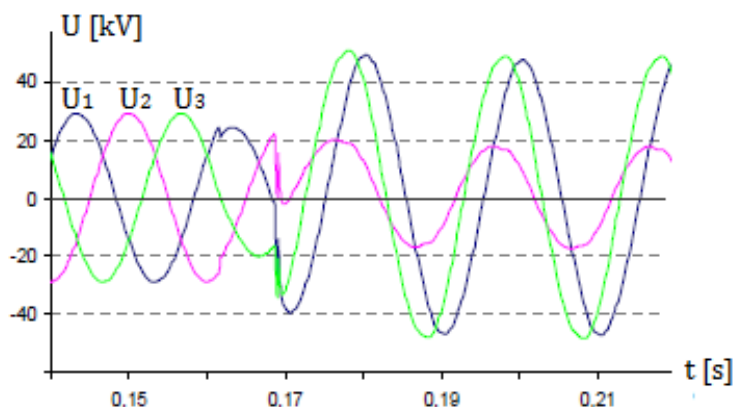
Nesimetrija napona je stanje pri kojem se naponi u trofaznom sistemu međusobno razlikuju po vrijednosti (amplitudi) ili/i ukoliko ugao između pojedine dvije faze nije 120° . Analize nesimetričnih režima sprovode se metodom simetričnih komponenti, tj. razdvajanjem nesimetričnog sistema na direktnu (pozitivnu), inverznu (negativnu) i nultu komponentu. Vrijednost pokazatelja nesimetrije napona, odnosno veličina asimetričnosti napona najčešće se definiše preko odnosa inverzne i direktne komponente napona. Dozvoljene nesimetrije napona definišu se odgovarajućim standardima.

Nesimetrije napona mogu uzrokovati kvarovi u mreži, priključenje velikih jednofaznih potrošača, karakteristike elemenata mreže, npr. "neprepleteni" elektroenergetski vodovi i dr. Primjer nesimetrije napona uzrokovan kvarom u srednjenaponskoj mreži, prikazan je na slici 4. [45].

Pojava nesimetrija napona najčešća je u distributivnim mrežama, odnosno u trofaznom sistemu napona napajanja potrošača. Uzroci ovih nesimetrija su kvarovi u mreži i neravnomjerni raspored opterećenja.

Negativne posljedice nesimetrija napona trpe i sistem i potrošači. Značajne negativne efekte nesimetrija u naponu napajanja ima i na karakteristike i rad asinhronih motora, odnosno savremenih pogona sa asinhronim motorima. Analiza tog uticaja osnovni je

naučno-istraživački cilj ovog magistarskog rada. Zato se u ovom radu, nesimetrija napona kao parametar kvaliteta električne energije detaljno prezentuje u okviru **Poglavlja 1.2.**



Slika 4. Primjer nesimetrije uzrokovane kvarom

1.1.3. Deformacije talasnih oblika napona

U deformacije talasnog oblika napona spada grupa pokazatelja kvaliteta napona koji opisuju odstupanja oblika napona od čiste sinusoide nazivne učestanosti (50 ili 60 Hz) kao i varijacije njegove efektivne vrijednosti.

U zavisnosti od uzroka i načina nastajanja, deformacije talasnog oblika napona se svrstavaju u sljedeće grupe [1]:

- deformacije tranzijentne prirode,
- deformacije u prelaznim režimima sistema i
- deformacije u ustaljenom stanju.

One se međusobno razlikuju po trajanju, spektru i uticaju na amplitudu napona. Ova grupa pokazatelja direktno definiše kvalitet isporučene električne energije, odnosno kvalitet napajanja. Pokazateljima iz ove grupe se posljednjih godina poklanja sve veća pažnja, prvenstveno zbog niza negativnih efekata koje ovi pokazatelji imaju, prije svega kod tzv. osjetljivih potrošača kao što su savremeni računarski sistemi, sofisticirani mikroelektronski uređaji i dr., kao i zbog njihovog sve intenzivnijeg pojavljivanja.

S obzirom na definisani istraživački cilj ovog rada, ova grupa pokazatelja se opisuje sasvim kratko, sa osnovnim ciljem sagledavanja kompleksnosti problematike kvaliteta električne energije u savremenim elektrodistributivnim sistemima. Date definicije, opisi i prikazi se oslanjaju na [1] i drugu relevantnu literaturu iz ove oblasti.

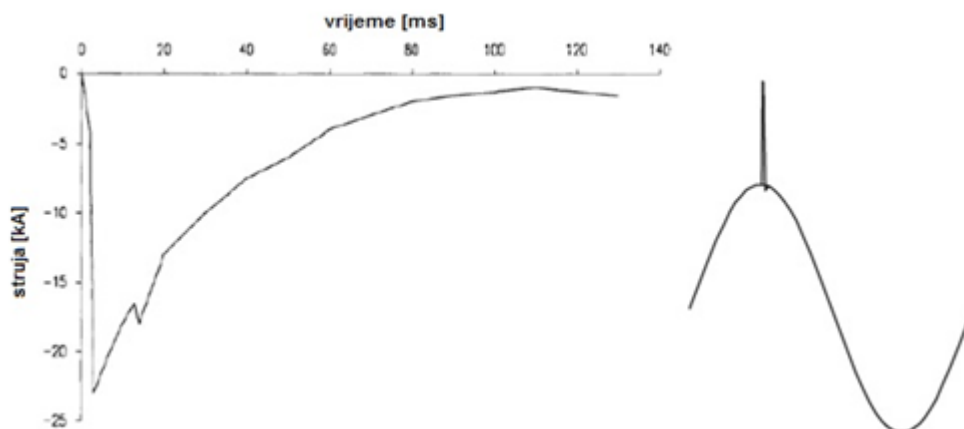
1.1.3.1. Tranzijenti

Tranzijenti predstavljaju pojavu ili veličinu koja se mijenja između dva uzastopna ustaljena stanja tokom vremenskog intervala, koji je kratak u poređenju sa razmatranim vremenskim opsegom. Tranzijenti mogu biti impulsni i oscilatorni.

Impulsni tranzijenti se javljaju iznenada, bez promjene frekvencije ustaljenog stanja napona ili/i struje, a po polaritetu su jednosmjerni (pozitivni ili negativni). To su kratkotrajni poremećaji velike amplitudne vrijednosti, velike brzine uspona i veoma brze promjene stacionarnog stanja talasnih oblika napona ili/i struje.

Uglavnom se opisuju vremenom uspona i vremenom kašnjenja. Frekventno područje tranzijenta je veće od 5 kHz, a dužina trajanja je od 30 do 200 μ s.

Najčešći uzrok impulsnih tranzijenata su atmosferska pražnjenja. *Slika 5.* [1] prikazuje tipičan tranzijent struje atmosferskog pražnjenja i uzrokovani impulsni tranzijent napona.



Slika 5. Struja atmosferskog pražnjenja (lijevo) i impulsni tranzijent napona (desno)

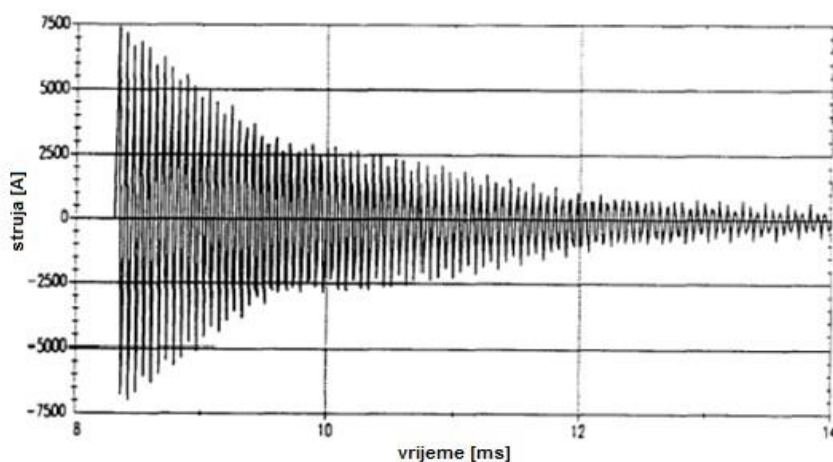
Kako su u pitanju visoke frekvencije, impulsni tranzijenti se brzo prigušuju aktivnim otpornostima kola i ne prostiru se daleko od svog izvora. Najčešće posljedice ove vrste tranzijenata su kvarovi na transformatorima, odvodnicima prenapona i oštećenja električne opreme, prvenstveno elektronskih uređaja.

Oscilatorni tranzijent je iznenadna pojava koja ne uzrokuje promjene frekvencije ustaljenog stanja napona i/ili struje, a koja obuhvata vrijednost i pozitivnog i negativnog polariteta i čija trenutna vrijednost veoma brzo mijenja znak. Opisuje se spektralnim sastavom (pretežno frekvencijom), trajanjem i amplitudom.

Oscilatorni tranzijenti osnovne frekvencije veće od 500 kHz i trajanja reda μ s, su oscilatorni **tranzijenti visoke frekvencije**. Nastaju prvenstveno uslijed prekidačkih (komutacionih) manipulacija u sistemima, a često su i rezultat odziva lokalnog sistema na impulsni tranzijent.

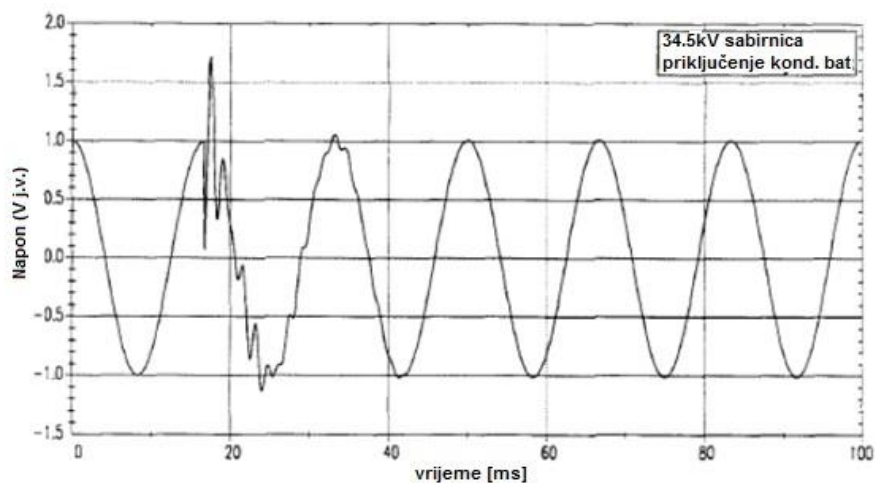
Oscilatorni tranzijenti sa komponentom osnovne frekvencije između 5 i 500 kHz, sa trajanjem reda desetina μ s, ili nekoliko perioda osnovne frekvencije su oscilatorni

tranzijenti srednje frekvencije. Nastaju prvenstveno pri priključenju kondenzatorske baterije u blizini već postojećeg kondenzatorskog postrojenja u pogonu (*Back-to-back* uključenje). Frekvencija ovih oscilatornih tranzijenata struje je nekoliko desetina kHz (*slika 6. [1]*), pri čemu uključenje kabla uzrokuje oscilatorne tranzijente signala napona u istom opsegu frekvencija. Oscilatorni tranzijenti srednje frekvencije takođe mogu biti rezultat odziva sistema na impulsni tranzijent.



Slika 6. Oscilatorni tranzijent pri back-to-back priključenju kondenzatora

Oscilatorni tranzijenti osnovne frekvencije manje od 5 kHz i trajanja od 0.3-50 ms su **tranzijenti niske frekvencije.** Pojavljuju se najčešće u distributivnim mrežama, kao uzrok uključenja kondenzatorskih baterija (*slika 7. [1]*). Ovakvi tranzijenti imaju frekvenciju u opsegu 300 do 900 Hz, a maksimalna amplituda može dostići 2.0 r.j., mada je najčešće u opsegu 1.3 do 1.5 r.j. Traju od 0.5 do 3 ciklusa, zavisno od prigušenja sistema.



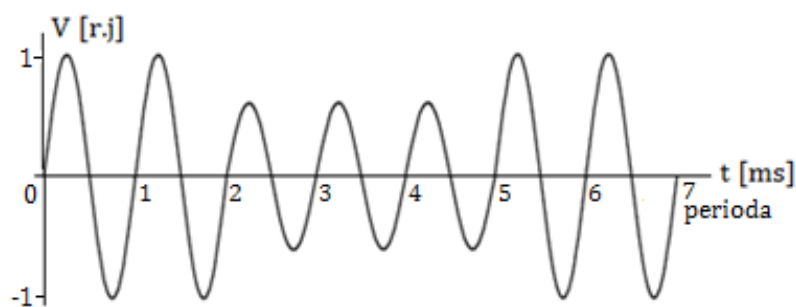
Slika 7. Oscilatorni tranzijent niske frekvencije, uzrokovan priključenjem kondenzatorske baterije

1.1.3.2. Deformacije u prelaznim režimima sistema

Prelazni režimi sistema, u zavisnosti od njihove vrste i uzroka, kao i od karakteristika sistema, uzrokuju različite deformacije talasnog oblika i varijacije efektivne vrijednosti napona. Tu spadaju: propadi, premašenja, kratkotrajne beznaponske pauze, podnaponi, prenaponi i duže beznaponske pauze.

Propad napona

Propad napona je naglo, kratkotrajno (od 10 ms do 1 min) smanjenje napona na vrijednost iz intervala 0.1–0.9 r.j., pri frekvenciji sistema, nakon čega se ponovo uspostavlja prvobitna vrijednost napona (nazivni napon). Talasni oblik propada napona prikazan je na slici 8. [1].



Slika 8. Talasni oblik propada napona

Propad napona predstavlja jedan od najnezgodnijih poremećaja kvaliteta električne energije vezan za promjenu (smanjenje) vrijednosti napona, čiji su najčešći uzroci kvarovi u mreži ili naglo povećanje opterećenja, a takođe se veliki broj propada dešava uslijed jednofaznih kratkih spojeva, nastalih zbog vremenskih nepogoda, zaprljanosti i vlage na izolatorima, dodira ptica do provodnika itd. Na pojavu propada napona utiču i startovanja velikih elektromotora i isključenje kondenzatorskih baterija.

Najčešće posljedice propada napona su ispadi osjetljive električne opreme, resetovanje računara i druge računarske i digitalne opreme, treperenje sijalica sa užarenim nitima i dr. Motorni pogoni sa promijenljivom brzinom mogu pretrpjeti znatna oštećenja uslijed propada napona i najčešće su opremljeni podnaponskom zaštitom koja ih isključuje ako napon padne ispod 0.7–0.85 r.j. Propadi napona mogu izazvati prekide proizvodnih procesa, kao i sniženje kvaliteta proizvoda, a time i značajne negativne ekonomske efekte, pogotovo u slučaju kontinualnih procesa.

Propadi napona nemaju značajniji uticaj na elemente sistema napajanja i parametre radnih režima. Može se dogoditi pogrešno reagovanje prekidača ili prebacivanje na rezervno napajanje.

Skokovi (premašenja) napona

Naponski skokovi ili premašenja napona, predstavljaju privremeno povećanje efektivne vrijednosti napona za više od 10% od nazivne vrijednosti, u trajanju od 0.01 s do 1 min, pri frekvenciji (nazivnoj) sistema. Tipične vrijednosti su iz opsega 1.1–1.8 r.j.

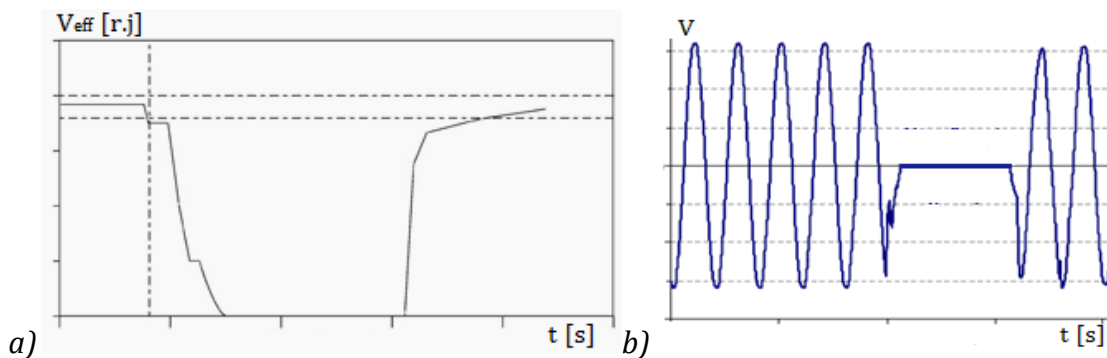
Kao i propadi, i premašenja se vezuju za određene kvarove u sistemu, ali su mnogo ređi od propada napona, i čine samo 2–3% svih poremećaja. Nastaju pri jednopolnim kratkim spojevima sa zemljom, prilikom isključenja velikih potrošača, kao i pri uključanju kondenzatorskih baterija velike snage.

Pri pojavi premašenja napona imamo povišenu vrijednost napona napajanja, što može nanijeti štetu prije svega elektronskim uređajima, zatim motorima, osvjtljenju i dr. Veći skokovi napona, iako kratko traju, vremenom ugrožavaju izolaciju provodnika, namotaja transformatora i motora, koji su zato izloženi bržem starenju.

Kratkotrajne beznaponske pauze

Kratkotrajne beznaponske pauze predstavljaju kratkotrajne (<1 min) prekide napajanja, odnosno kratkotrajni gubitak napona (naponi manje od 1% nazivne vrijednosti) jedne ili više faza u posmatranoj tački mreže. Mogu biti prolazne (od 10 ms do 3 s) i privremene (od 3 s do 1 min).

Kratkotrajne beznaponske pauze nastaju prvenstveno pri djelovanju automatskog ponovnog uključanja (APU), koje se primjenjuje radi eliminisanja prolaznih kvarova u distributivnim mrežama. Stoga njihovo trajanje zavisi od vremena reagovanja uređaja relejne zaštite, tj. od podešene beznaponske pauze uređaja APU. Praksa podešavanja beznaponske pauze uređaja APU je različita, od 12 perioda, pa i do 1 min, kad nastaju privremene, a ne prolazne beznaponske pauze. Na slici 9. su ilustrovane promjene efektivne vrijednosti napona (5.a.) i talasnog oblika napona (5.b.) pri kratkotrajnoj beznaponskoj pauzi.



Slika 9. Kratkotrajna beznaponska pauza: a) efektivna vrijednost, b) talasni oblik napona

Kratkotrajni prekidi napajanja, kao i propadi napona mogu dovesti do značajnih problema u radu računara, pogotovo radnih stanica, mrežnih servera, ili računara u sklopu kontrole procesa proizvodnje, gdje mogu uzrokovati gubljenja važnih podataka, zastoje u komunikaciji, kao i obustavu radnog procesa.

Dugotrajna beznaponska pauza

Dugotrajne beznaponske pauze su prekidi napajanja u trajanju od 1–3 min, sa amplitudama napona < 0.1 r.j.

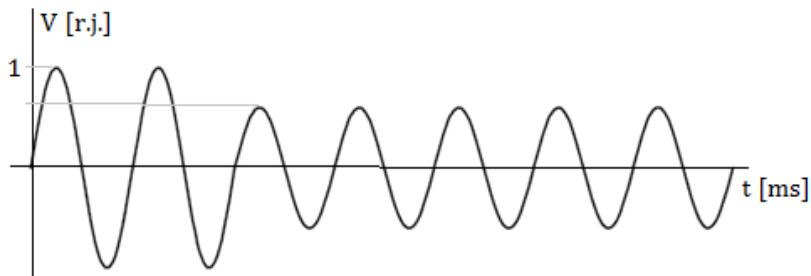
Uzroci ovih pojava su privremeni kratki spojevi u sistemu, izazvani raznim faktorima.

Dugotrajne beznaponske pauze mogu uzrokovati prekide rada industrijskih pogona, isključenje ili resetovanja računara, pogrešan rad računarske i elektronske opreme, kao i uređaja automatike i zaštite. Ovo dalje, za posljedicu može imati značajne gubitke u proizvodnji i poslovanju, odnosno smanjenje dohotka zbog neostvarene proizvodnje.

Podnapon

Podnapon je pojava pri kojoj napon opadne ispod dozvoljene vrijednosti (-10% nazivnog napona) u vremenskom intervalu dužem od 1 min, pri nazivnoj učestanosti sistema. Tipične vrijednosti podnapona su u opsegu $0.8-0.9$ r.j.

Javljaju se pri uključenju velikih potrošača, isključenju kondenzatorskih baterija (dok regulacioni sistem ne vrati napon unutar dozvoljenih granica), strujnom preopterećenju, kao i pri neadekvatno postavljenom prenosnom odnosu transformatora. Negativne posljedice podnapona su najizraženije kod opreme i uređaja koji zahtijevaju konstantan napon napajanja. Tipičan talasni oblik podnapona, prikazan je na *slici 10*. [1].



Slika 10. Talasni oblik napona tokom pojave podnapona

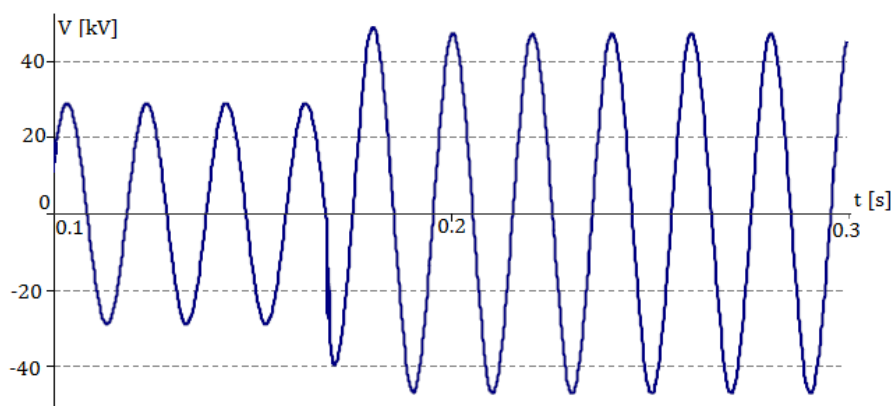
Prenapon

Prenapon je pojava pri kojoj napon poraste iznad dozvoljene vrijednosti (10% nazivnog napona) u vremenskom intervalu dužem od 1 min, pri nazivnoj učestanosti sistema. Tipične vrijednosti prenapona su od 1.1 do 1.2 r.j.

Javljaju se kao rezultat događaja suprotnih onima koji dovode do podnapona, npr. isključivanje velikih potrošača ili uključivanje kondezatorskih baterija. Pojavu prenapona može da izazove i neadekvatna naponska regulacija, odnosno pogrešno biranje otcjepa regulacionih transformatora.

Pojava prenapona može da izazove probleme u radu uređaja i procesa, prvenstveno onih koji zahtijevaju konstantan napon napajanja. Takođe, prenaponi uzrokuju dodatna naprezanja i brže starenje izolacije, a time i opreme i uređaja.

Na *slici 11.* [46], prikazan je talasni oblik napona, pri pojavi prenapona u srednjenaponskoj distributivnoj mreži.



Slika 11. Primjer talasnog oblika prenapona

1.1.3.2. Deformacije u ustaljenom stanju

Ustaljen režim rada sistema karakterišu različite pojave deformacija napona: viši harmonici, interharmonici, urezi (rupe), fluktuacije napona, šumovi i dr.

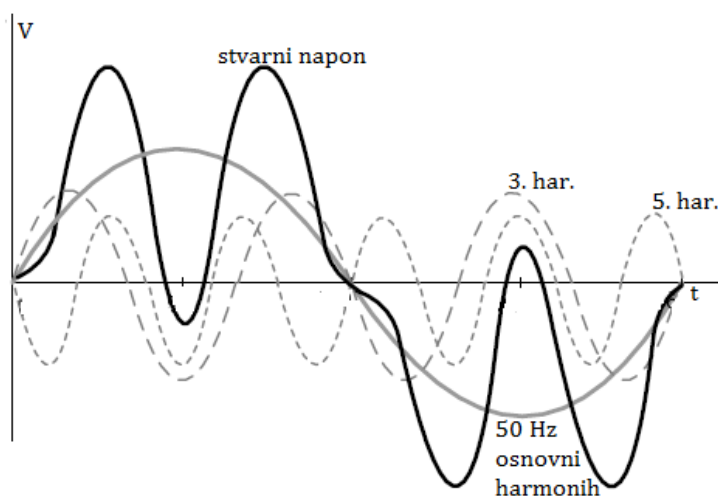
Viši harmonici

Viši harmonici su komponente napona (struje) čije su frekvencije cjelobrojni umnošci osnovne frekvencije, odnosno nazivne frekvencije sistema (50 ili 60 Hz) za koju se projektuje oprema elektroenergetskog sistema na svim nivoima, uključujući i potrošački nivo. Njihovo prisustvo u naponu napajanja ispoljava se kroz deformaciju sinusnog talasnog oblika napona, odnosno u pojavi **harmonijske distorzije napona**, i dalje kroz niz negativnih efekata kako na mrežu tako i na priključene potrošače. Primjer harmonijski deformisanog talasnog oblika napona sa komponentama viših harmonika dat je na *slici 12.*

Više harmonike napona napajanja uglavnom izazivaju viši harmonici struje nelinearnih potrošača (mašine za zavarivanje, elektrolučne peći, indukcijske peći, regulisani elektromotorni pogoni sa asinhronim i jednosmernim motorima, računari, fotokopir

mašine, faks mašine, uređaji neprekidnog napajanja-UPS, televizijski uređaji-TV, mikrotalasne peći, fluorescentno osvjetljenje i dr.), koji su priključeni na različitim naponskim nivoima distributivne mreže. Ti viši harmonici struje, kroz pad napona na impedansama mreže, stvaraju u mreži odgovarajuće više harmonike napona.

Uglavnom se javljaju viši harmonici reda do nekoliko kHz, a od praktičnog značaja su interesantni harmonici reda do 100-tog (5 ili 6 kHz).



Slika 12. Izobličeni talasni oblik napona i njegove harmonijske komponente

Negativni efekti viših harmonika su veoma brojni, a najznačajniji su: pojava rezonancije u mreži, uticaj na kondenzatorske baterije, uticaj na elemente za zaštitu, uticaj na tačnost pokazivanja mjernih instrumenata, brže starenje izolacije kablova, dodatni gubici u električnim mašinama, interferencija sa telekomunikacionim signalima i dr.

Brojni negativni efekti viših harmonika, kao i sve veće učešće nelinearnih potrošača u strukturi potrošnje, istakli su ovu komponentu kvaliteta električne energije kao jednu od najznačajnijih u veoma aktuelnim i intezivnim istraživanjima kvaliteta električne energije u savremenim elektrodistributivnim sistemima.

Interharmonici

Interharmonici su komponente napona (struje) čija frekvencija nije cjelobrojni umnožak nazivne frekvencije za koju je sistem napajanja projektovan.

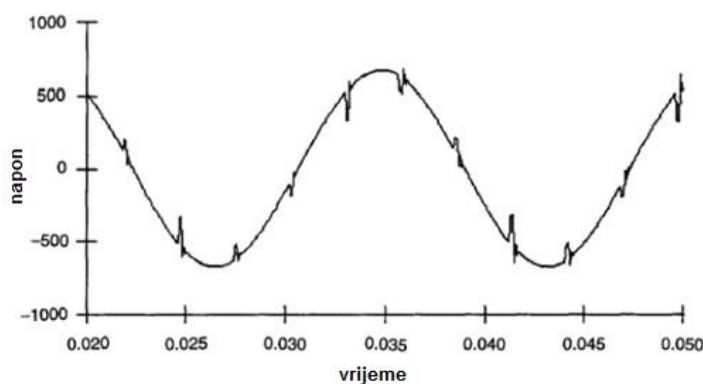
Kao i viši harmonici, interharmonici predstavljaju dodatnu vrijednost prostoperiodičnog napona ili struje, koji učestvuju u izobličenju talasnog oblika napona osnovne učestanosti.

Uzrokovani su statičkim frekvencijskim konvertorima, ciklokonvertorima, asinhronim motorima, uređajima sa lukom. Signali koji se prenose elektroenergetskim vodovima se takođe mogu smatrati interharmonicima. Frekvencija interharmonika može biti jedna diskretna frekvencija (asinhroni motori) ili se može pojaviti kao široki spektar mnogih uređaja (uređaji sa lukom). Interharmonici se mogu sresti u mrežama svih naponskih nivoa.

Urezi (rupe)

Urezi (rupe) predstavljaju prekidanje ili drugu smetnju u talasnom obliku napona, koja je trajanja do 0.5 periode, a koja je inicijalno suprotnog polariteta u odnosu na talas. Zbog toga se oduzima od normalnog talasnog oblika u iznosu maksimalne vrijednosti smetnje. To podrazumijeva potpuni prekid napajanja u trajanju do 0.5 periode. Međutim, urez nije prelazni proces kratkog trajanja a ni tranzijent, jer se obično odnosi na ustaljeno stanje. Pojavljuje se u svakoj periodi talasnog oblika na sličan način i to u vremenskom intervalu koji je mnogo duži od 1 min, a ako se urez pojavi u toku samo jedne periode, onda je to impulsni tranzijent.

Trofazni konvertori koji generišu jednosmjernu struju su najznačajniji uzrok ureza napona čiji je primjer prikazan *slikom 13*. [1]. U suštini to je periodična smetnja napona koju uzrokuje normalan rad uređaja energetske elektronike. Intezitet ureza u nekoj tački sistema je određen induktivnošću izvora i induktivnošću između konvertora i tačke u kojoj se vrši mjerenje.



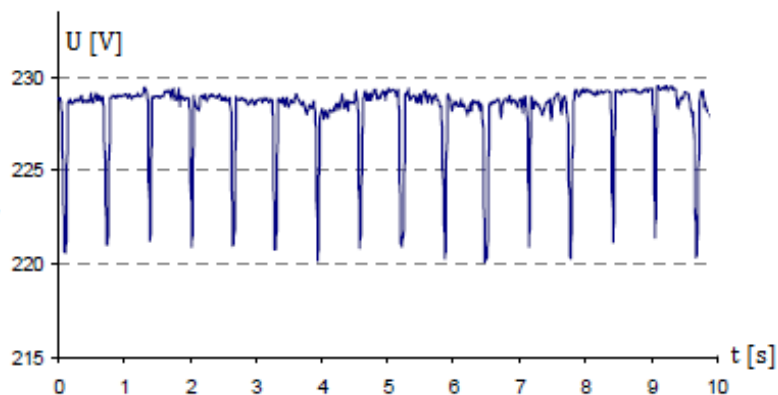
Slika 13. Primjer ureza napona usled rada konvertora

Fluktuacije napona

Fluktuacije napona su niz slučajnih promjena napona ili periodična promjena amplitude napona čija amplituda ne prelazi opseg od 0.95 do 1.1 r.j., sa niskom učestanošću.

Naponske fluktuacije pri kojima ljudsko oko postaje osjetljivo na promjene inteziteta osvijetljenja nazivaju se flikeri napona. Karakteristične frekvencije flikera su iz opsega 4–10 Hz. Primjer flikera dat je na *slici 14*. [46].

Fluktuacije napona uglavnom nastaju pri naglim promjenama struje opterećenja, naročito njene reaktivne komponente. Pojave flikera izazivaju elektrolučne peći, aparati za zavarivanje, upravljivi poluprovodnički pretvarači, drobilice kamena u građevinarstvu, uključivanje i isključivanje na mrežu velikih asihronih mašina, rad vjetrogeneratora i fotonaponskih generatora, i sl.



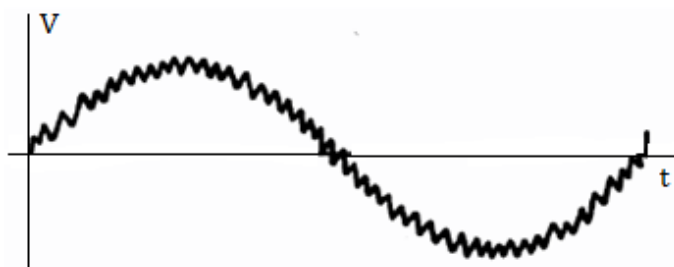
Slika 14. Primjer pojave flikera u niskonaponskoj mreži

Najznačajnija posljedica flikera su iritiranje organa vida kod ljudi sa neprijatnim psihološkim efektima i glavoboljom. Flikeri mogu izazvati i nepravilnosti u radu tzv. osjetljivih potrošača, kao što su televizori, računari, sredstva veze, statički pretvarači i dr.

Šumovi

Šumovi su neželjeni električni signali koji proizvode nepoželjna dejstva u kolima upravljačkih sistema u kojima se pojavljuju. Imaju širok spektralni sastav niži od 200 kHz, a tipična vrijednosti amplitude šuma je manja od 1% amplitude napona. Ovi neželjeni signali se dodaju naponu ili struji faznih provodnika elektroenergetskog sistema ili se mogu naći u neutralnim provodnicima ili signalnim vodovima. Mogu ga sačinjavati električni signali koji se prostiru kroz provodnike električnog kola ili oni koji se zrače elektromagnetnim putem kroz okolinu.

Primjer talasnog oblika napona sa prisustvom šuma dat je slikom 15. [1].



Slika 15. Talasni oblik napona sa prisustvom šuma

Frekvencijski opseg i nivo amplitude šuma zavise od izvora šuma i karakteristika sistema. Šum u elektroenergetskom sistemu može biti uzrokovan uređajima energetske elektronike, upravljačkim kolima, opremom koja proizvodi luk, ispravljajima i prekidačkim izvorima. Problemi sa šumom se često povećavaju uslijed neodgovarajućeg uzemljenja. U

suštini šum predstavlja svako izobličenje signala koje se ne može klasifikovati kao harmonijsko izobličenje ili tranzijent.

1.1.4. Indikatori kvaliteta električne energije

Prethodno dat pregled pokazatelja ukazuje na kompleksnost problematike kvaliteta električne energije. Međutim, svi navedeni pokazatelji nisu istog prioriteta sa praktičnog aspekta. Prema prioritetu rješavanja, a samim tim i izučavanja, baziranom na učestalosti pojavljivanja, teškoćama u otklanjanju i posljedicama, u literaturi se najčešće izdvajaju četiri pokazatelja: varijacije napona, flikeri, harmonici i nesimetrije.

U analizama ovih, kao i ostalih, pokazatelja kvaliteta električne energije, odnosno kvaliteta napona veoma je važno poznavati indikatore koji kvantifikuju i po potrebi dodatno opisuju svaki od navedenih pokazatelja. Cilj definisanja tih indikatora je da se pokazatelji, koji predstavljaju kompleksne pojave u vremenskom i frekventnom domenu, jasno matematički izraze, tako da se mogu lako izračunati i izmjeriti, pri čemu postupci računanja i mjerenja treba da budu standardizovani. To prije svega omogućava donošenje odgovarajućih standarda za limitiranje nivoa, dužine trajanja i učestanosti pojavljivanja pokazatelja kvaliteta električne energije. Takođe, preko indikatora je moguće precizno iskazati nivo kvaliteta električne energije u posmatranim tačkama sistema, izvršiti međusobno poređenje nivoa kvaliteta sa velikom tačnošću, kao i definisati odstupanja nivoa kvaliteta električne energije od standardizovanih vrijednosti po svim pokazateljima.

Za izdvojenu prioritetnu grupu pokazatelja kvaliteta napona, najčešće se koriste sljedeći indikatori:

Za varijaciju napona - **faktor varijacije napona**, određen odnosom efektivne vrijednosti napona (U_{eff}) i nazivnog napona (U_n), u procentima,

$$\delta U_{\%} = \frac{U_{eff}}{U_n} 100, \quad (1.)$$

i trajanjem Δt .

Za harmonijsku distorziju najčešće se koristi **faktor ukupne harmonijske distorzije**, određen izrazom:

$$THD_U = \sqrt{\frac{\sum_{h=2}^{\infty} U_h^2}{U_1^2}}, \quad (2.)$$

gdje su: U_h - viši harmonik reda $h=2,3,\dots$
 U_1 - osnovni harmonik napona.

Za nesimetrije napona najčešće se koristi **faktor nesimetrije napona**, određen odnosom inverzne (negativne) komponente napona (U_i ili U_-) i direktne (pozitivne) komponente napona (U_d ili U_+):

$$K_n = \frac{U_-}{U_+}. \quad (3.)$$

Nesimetrija je pokazatelj kvaliteta napona koji je predmet istraživanja ovog rada, te se ona detaljnije obrađuje kroz naredna poglavlja rada.

1.1.5. Normiranje pokazatelja kvaliteta električne energije

Kao što je istaknuto, kvalitet električne energije određen je velikim brojem parametara, različitih karakteristika i različitih kako po uzroku nastanka i intenzitetu pojavljivanja tako i po posljedicama za sistem i potrošače. Pri tome, posljedice prvenstveno zavise od vrste i inteziteta parametra. U principu, pojave narušavanja kvaliteta napona u savremenim elektroenergetskim sistemima se ne mogu apsolutno izbjeći, ali se njihov nivo mora svesti na vrijednosti koje obezbjeđuju siguran rad i sistema i potrošača. Osnovna faza u rješavanju tog zadatka je donošenje odgovarajućih standarda, odnosno preporuka za oblast kvaliteta električne energije.

Više međunarodnih i nacionalnih organizacija se bavi problematikom kvaliteta električne energije i njenom standardizacijom:

- IEC, *International Electrotechnical Commission*,
- CENELEC, *European Committee for Electrotechnical Standardisation*,
- IEEE, *Institute of Electrical and Electronics Engineers*,
- ANSI, *American National Standards Institute*,
- UNIPED, *International Union of Producers and Distributors of Electrical Energy*,
- CIGRE, *International Council On Large Electric Systems* i dr.

U standardima, koje ove organizacije daju, definišu se nazivne referentne vrijednosti i dozvoljena odstupanja osnovnih tehničkih parametara električne energije i drugih pokazatelja kvaliteta električne energije. Ukoliko ti parametri i pokazatelji variraju unutar definisanih granica, to ne uzrokuje probleme u radu sistema, jer se i oprema i potrošači projektuju za optimalni rad pri nazivnim parametrima uz određeni dozvoljeni nivo tolerancije pri njihovom odstupanju.

Bitno je napomenuti da se standardi vezani za kvalitet električne energije stalno usavršavaju i nadopunjuju, te da se u cilju toga permanentno sprovode analize i mjerenja kvaliteta električne energije u elektroenergetskim mrežama širom svijeta.

Zemlje Evropske unije prihvatile su normu EN 50160-*Voltage characteristics of electricity supplied by public distribution systems* (Obilježja napona u javnim distributivnim mrežama), koju je donio CENELEC (Evropski odbor za standardizaciju u elektrotehnici).

CENELEC čine Nacionalni elektrotehnički komiteti iz 34 evropske zemlje, kao i pridruženi nacionalni komiteti više zemalja, među kojima je i Crna Gora (Montenegro 06/2009). Stoga se standard EN 50160 može smatrati važećom, odnosno obavezujućom normom i za Crnu Goru, kao buduću punopravnu članicu Evropske unije i CENELEC-a.

Standard EN 50160 [48] definiše i propisuje mjerenje parametara i pokazatelja kvaliteta mrežnog napona na mjestu isporuke električne energije krajnjim potrošačima u niskonaponskim (do 1 kV AC) i sredjenaponskim (1-35 kV AC) elektroenergetskim mrežama, pri normalnim radnim uslovima.

Za obezbjeđenje kvaliteta električne energije u posmatranoj tački mreže, od velikog značaja je karakter opterećenja potrošača priključenih u toj tački. Veliki broj poremećaja koji izazivaju degradaciju kvaliteta električne energije, uzrokuju upravo potrošači, prvenstveno grupa tzv. "nelinearnih potrošača". Preporuke koje razmatraju karakter opterećenja date su u okviru Standarda elektromagnetske kompatibilnosti (*Electromagnetic compatibility EMC*) IEC 61000 [49]. Ovaj standard je donijela Međunarodna elektrotehnička komisija IEC. On objedinjuje niz preporuka vezanih za elektromagnetsku kompatibilnost i u zavisnosti od sadržaja podijeljen je na više djelova (standarda).

Standardizacijom na polju mjerenja i normiranja pokazatelja kvaliteta električne energije, intenzivno se bavi i prestižna međunarodna organizacija inženjera iz oblasti elektrotehnike i elektronike IEEE. IEEE 519 (*Recommended practices and requirements for harmonic control in electrical power systems*) [50], je američki standard koji definiše dozvoljene granične vrijednosti za više harmonike.

Uporedni pregled karakteristika standarda kvaliteta električne energije EN 50160, IEC 61000 i IEEE 519, obzirom na dozvoljene vrijednosti pokazatelja kvaliteta napona dat je u tabeli 1. Pregled je dat sa ciljem ilustracije, samo za prioritetne pokazatelje.

Tabela 1. Uporedni pregled normiranja osnovnih pokazatelja kvaliteta napona

Karakteristika	Kvalitet mrežnog napona	EMC	
		IEC	IEEE
Organizacija	CENELEC	IEC	IEEE
Standard	EN 50160	IEC 61000	IEEE 519
Područje primjene	NN i SN	NN	SN i VN
Odstupanja napona	±10%	±10%	--
Nesimetrija napona	2%(3%)	2%	--
Viši harmonici	0,5 do 6% (date tabele)	0,2 do 6% (date tabele)	3%(<69kV)
			1,5%(<161kV)
			1%(>161kV)
THD	8%	8%	5%(<69kV)
			2,5%(<161kV)
			1,5%(>161kV)

Bitno je napomenuti da se standardi vezani za kvalitet električne energije stalno usavršavaju i nadopunjuju, te da se u tom cilju permanentno sprovode analize i mjerenja kvaliteta električne energije u elektroenergetskim mrežama širom svijeta.

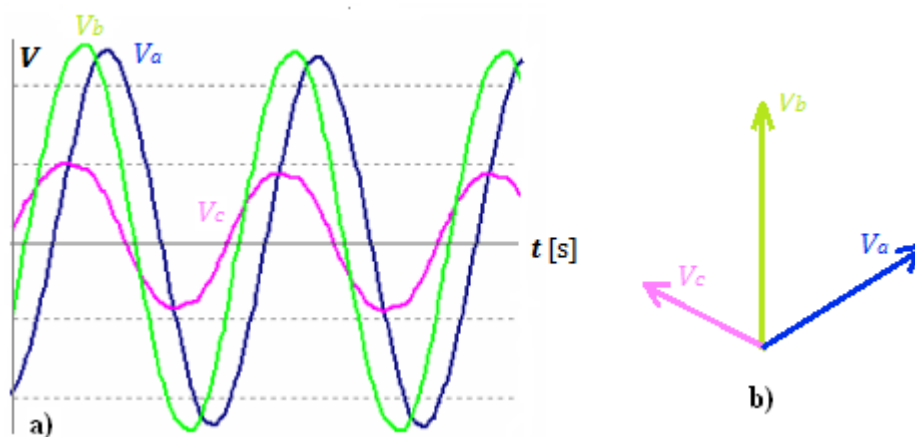
1.2. NESIMETRIJA NAPONA

1.2.1. Analiza nesimetričnih sistema napona

Zbog dinamične prirode elektroenergetskog sistema, konstrukcionih karakteristika elektroenergetske opreme i karakteristika potrošnje, nesimetrija napona je neizbježna pojava u trofaznim sistemima napajanja, koja se ne može u potpunosti suzbiti.

Kao što je već definisano, nesimetrija napona je stanje pri kojem se naponi u trofaznom sistemu međusobno razlikuju po iznosu (amplitudi) i/ili ukoliko ugao između pojedine dvije faze nije 120° .

Primjer nesimetrije napona ilustrovan je na slici 16., gdje su slikom 16.a. prikazani talasni oblici napona, a slikom 16.b. fazorski dijagram napona.

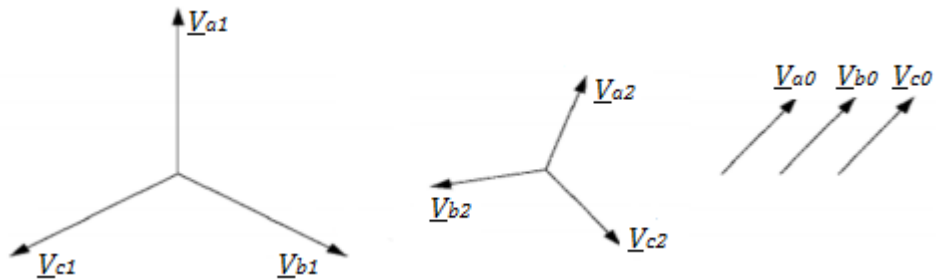


Slika 16. Nesimetrija trofaznog sistema napona a) vremenski prikaz b) fazorski prikaz

Analiza nesimetričnih režima, konkretno nesimetričnih sistema napona trofaznog naizmjeničnog sistema, ne može se vršiti uobičajenim metodama analize simetričnih režima. Za njihovu analizu koristi se metod simetričnih komponenti, zasnovan na zamjeni trofaznog nesimetričnog vektorskog sistema napona (ili struja) zbirom trofaznih direktnih (ili pozitivnih), inverznih (ili negativnih) i nultih simetričnih komponenti. Dakle, nesimetrični trofazni sistem se pomoću metode simetričnih komponenti analizira preko tri simetrična sistema (*Fortescue-ova teorema*) [38]:

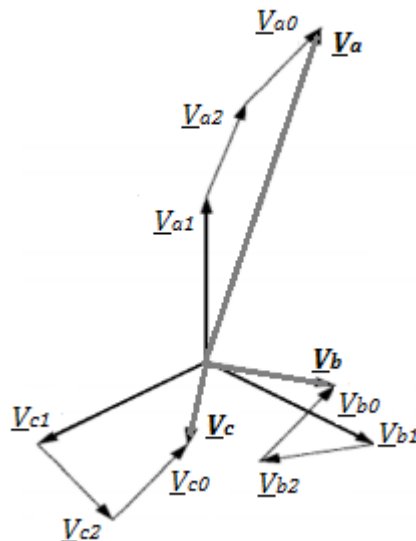
- direktni ili pozitivni sistem (indeks u oznaci "1", "d" ili "+"), sa jednakim redosljedom faza kao i kod simetričnog sistema,
- inverzni ili negativni sistem (indeks u oznaci "2", "i" ili "-"), sa obrnutim (inverznim) redosljedom faza u odnosu na direktni, odnosno simetrični sistem i
- nulti sistem (indeks u oznaci "0"), kojeg čine tri istofazne komponente.

Na slici 17. predstavljeni su fazorski dijagrami direktnog (\underline{V}_{a1} , \underline{V}_{b1} i \underline{V}_{c1}), inverznog (\underline{V}_{a2} , \underline{V}_{b2} i \underline{V}_{c2}) i nultog (\underline{V}_{a0} , \underline{V}_{b0} i \underline{V}_{c0}) sistema simetričnih komponenti faznih napona.



Slika 17. Fazorski dijagrami-direktne, inverzne i nulte komponente nesimetričnog sistema faznih napona

Rezultantni nesimetrični trofazni sistem faznih napona, dobija se zbirom komponenti sva tri simetrična sistema. Na slici 18. predstavljen je fazorski diagram rezultatnih-nesimetričnih faznih napona \underline{V}_a , \underline{V}_b i \underline{V}_c , dobijen sabiranjem direktnih, inverznih i nultih simetričnih komponenti napona sa slike 17.



Slika 18. Fazorski dijagram-nesimetrični sistem faznih napona-zbir direktne, inverzne i nulte simetrične komponente

Dakle,

$$\underline{V}_a = \underline{V}_{a1} + \underline{V}_{a2} + \underline{V}_{a0}, \quad (4.)$$

$$\underline{V}_b = \underline{V}_{b1} + \underline{V}_{b2} + \underline{V}_{b0}, \quad (5.)$$

$$\underline{V}_c = \underline{V}_{c1} + \underline{V}_{c2} + \underline{V}_{c0}, \quad (6.)$$

Preko vektorskog (fazorskog) operatora "a":

$$a = e^{j120^\circ}, a^2 = e^{j240^\circ} = e^{-j120^\circ}, \quad (7.)$$

moгу se uspostaviti veze između faznih napona pojedinih simetričnih komponenti:

- za direktni sistem:

$$\underline{V}_{a1} = \underline{V}_1 \quad \underline{V}_{b1} = a^2 \underline{V}_1 \quad \underline{V}_{c1} = a \underline{V}_1, \quad (8.)$$

- za inverzni sistem:

$$\underline{V}_{a2} = \underline{V}_2 \quad \underline{V}_{b2} = a \underline{V}_2 \quad \underline{V}_{c2} = a^2 \underline{V}_2, \quad (9.)$$

- i za nulti sistem:

$$\underline{V}_{a0} = \underline{V}_0 \quad \underline{V}_{b0} = \underline{V}_0 \quad \underline{V}_{c0} = \underline{V}_0. \quad (10.)$$

Uvažavajući prethodne odnose, relacije (4)-(6), koje definišu sistem nesimetričnih faznih napona, mogu se napisati u matricnoj formi:

$$\begin{bmatrix} \underline{V}_a \\ \underline{V}_b \\ \underline{V}_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{V}_0 \\ \underline{V}_1 \\ \underline{V}_2 \end{bmatrix}, \quad (11.)$$

gdje su: $\begin{bmatrix} \underline{V}_a \\ \underline{V}_b \\ \underline{V}_c \end{bmatrix}$ - kolona matrica faznih napona nesimetričnog sistema,

$\begin{bmatrix} \underline{V}_0 \\ \underline{V}_1 \\ \underline{V}_2 \end{bmatrix}$ - kolona matrica napona simetričnih komponenti i

$$[\underline{T}] = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \text{ - matrica transformacija.}$$

Na osnovu prethodnih relacija, dobija se matricna relacija koja definiše napone simetričnih komponenti preko stvarnih nesimetričnih napona:

$$\begin{bmatrix} \underline{V}_0 \\ \underline{V}_1 \\ \underline{V}_2 \end{bmatrix} = [\underline{T}]^{-1} \begin{bmatrix} \underline{V}_a \\ \underline{V}_b \\ \underline{V}_c \end{bmatrix}. \quad (12.)$$

Kako je:

$$[\underline{T}]^{-1} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix}, \quad (13.)$$

važi:

$$\begin{bmatrix} \underline{V}_0 \\ \underline{V}_1 \\ \underline{V}_2 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{V}_a \\ \underline{V}_b \\ \underline{V}_c \end{bmatrix}, \quad (14.)$$

odnosno:

- nulta komponenta nesimetričnih faznih napona je:

$$\underline{V}_0 = \frac{1}{3}(\underline{V}_a + \underline{V}_b + \underline{V}_c), \quad (15.)$$

- direktna komponenta nesimetričnih faznih napona je:

$$\underline{V}_1 = \frac{1}{3}(\underline{V}_a + a\underline{V}_b + a^2\underline{V}_c), \quad (16.)$$

- inverzna komponenta nesimetričnih faznih napona je:

$$\underline{V}_2 = \frac{1}{3}(\underline{V}_a + a^2\underline{V}_b + a\underline{V}_c). \quad (17.)$$

Kao što je istaknuto u tekstu, a što se može vidjeti i iz oznaka veličina, prethodna razmatranja se odnose na fazne napone, odnosno nesimetrični trofazni sistem faznih napona.

Isti princip razlaganja na simetrične komponente koristi se i kod analiza nesimetričnih sistema linijskih napona [56 i 57]. Za nesimetrični sistem linijskih napona \underline{U}_{ab} , \underline{U}_{bc} i \underline{U}_{ca} , simetrične komponente (direktna \underline{U}_1 , inverzna \underline{U}_2 i nulta \underline{U}_0) napona su određene matricnom jednačinom:

$$\begin{bmatrix} \underline{U}_0 \\ \underline{U}_1 \\ \underline{U}_2 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{U}_{ab} \\ \underline{U}_{bc} \\ \underline{U}_{ca} \end{bmatrix}. \quad (18.)$$

Slijedi:

- Nulta komponenta nesimetričnih linijskih napona je:

$$\underline{U}_0 = \frac{1}{3}(\underline{U}_{ab} + \underline{U}_{bc} + \underline{U}_{ca}) = 0, \quad (19.)$$

odnosno, nulta komponenta u sistemu nesimetričnih linijskih napona ne postoji!

- Direktna komponenta nesimetričnih linijskih napona je:

$$\underline{U}_1 = \frac{1}{3}(\underline{U}_{ab} + a\underline{U}_{bc} + a^2\underline{U}_{ca}). \quad (20.)$$

- Inverzna komponenta nesimetričnih linijskih napona je:

$$\underline{U}_2 = \frac{1}{3}(\underline{U}_{ab} + a^2\underline{U}_{bc} + a\underline{U}_{ca}). \quad (21.)$$

S obzirom da nulta komponenta sistema simetričnih komponenti ne postoji, naponi nesimetričnog trofaznog sistema linijskih napona su:

$$\underline{U}_{ab} = \underline{U}_1 + \underline{U}_2, \quad (22.)$$

$$\underline{U}_{bc} = a^2 \underline{U}_1 + a \underline{U}_2, \quad (23.)$$

i

$$\underline{U}_{ca} = a \underline{U}_1 + a^2 \underline{U}_2. \quad (24.)$$

Veze između simetričnih komponenti nesimetričnih linijskih i faznih napona određene su izrazima [56]:

$$\underline{U}_1 = \sqrt{3} V_2 e^{j\left(\frac{\pi}{6}\right)}, \quad (25.)$$

i

$$\underline{U}_2 = \sqrt{3} V_2 e^{-j\left(\frac{\pi}{6}\right)}, \quad (26.)$$

Data matematička interpretacija osnov je analiza i identifikacija nivoa nesimetrija napona u elektroenergetskim sistemima.

1.2.2. Indikatori nesimetrije napona

Simetrija napona je veoma važan pokazatelj kvaliteta električne energije u trofaznim naizmjeničnim sistemima prenosa i distribucije električne energije. Njeno narušavanje ima značajne negativne efekte kako na sam sistem i njegovu opremu, tako i na priključene potrošače. Stoga je u praksi projektovanja i eksploatacije elektroenergetskih sistema, neophodno na svim nivoima obezbijediti simetričnost sistema, odnosno nivo nesimetrija napona držati u okviru dozvoljenih–limitiranih granica. Radi definisanja tih granica, neophodno je prije svega jasno definisati indikator(e) nesimetrije napona, prvenstveno kroz matematički izraz koji omogućava njihovo jasno i precizno izračunavanje u konkretnim (poznatim) uslovima prisustva nesimetrije napona.

Na osnovu prethodne analize pojave nesimetrije, zasnovane na *Fortescue*-ovoj teoremi, jasno je da nivo nesimetrije napona određuju prisustvo i iznosi inverzne i nulte komponente napona.

S obzirom na pojavu, vrijednost i uticaj, nivo nesimetrije se najčešće izražava samo preko inverzne komponente. U tom smislu, kao indikator nesimetrije definiše se **faktor nesimetrije u kompleksnom obliku**.

Za sistem nesimetričnih faznih napona, faktor nesimetrije u kompleksnom obliku definiše se odnosom kompleksnih vrijednosti inverzne i direktne komponente faznih napona:

$$\underline{K}_{nV} = \frac{\underline{V}_2}{\underline{V}_1} = \frac{\underline{V}_a + a^2\underline{V}_b + a\underline{V}_c}{\underline{V}_a + a\underline{V}_b + a^2\underline{V}_c} = K_{nV} e^{j\alpha V}. \quad (27.)$$

Za sistem nesimetričnih linijskih napona, faktor nesimetrije u kompleksnom obliku je odnos kompleksnih vrijednosti inverzne i direktne komponente linijskih napona:

$$\underline{K}_{nU} = \frac{\underline{U}_2}{\underline{U}_1} = \frac{\underline{U}_a + a^2\underline{U}_b + a\underline{U}_c}{\underline{U}_a + a\underline{U}_b + a^2\underline{U}_c} = K_{nU} e^{j\alpha U}. \quad (28.)$$

Uvažavajući veze date relacijama (25.) i (26.), dobijamo:

$$\underline{K}_{nU} = \underline{K}_{nV} e^{-j\left(\frac{\pi}{3}\right)}. \quad (29.)$$

U praksi se najčešće ne računa sa kompleksnim faktorom nesimetrije, već se kao indikator nesimetrije napona u posmatranoj tački mreže koristi **faktor nesimetrije napona** određen odnosom vrijednosti inverzne i direktne komponente, u procentima:

$$K_{nU\%} = \left| \frac{\underline{U}_2}{\underline{U}_1} \right| 100 = \left| \frac{\underline{U}_{ab} + a^2\underline{U}_{bc} + a\underline{U}_{ca}}{\underline{U}_{ab} + a\underline{U}_{bc} + a^2\underline{U}_{ca}} \right| 100 = \frac{\underline{U}_2}{\underline{U}_1} 100, \quad (30.)$$

i koji u suštini predstavlja faktor nesimetrije inverzne, odnosno negativne komponente.

U slučaju postojanja nulte komponente simetričnog sistema komponenti, faktor nesimetrije nulte komponente definiše se odnosom vrijednosti nulte i direktne komponente, u procentima:

$$K_{n0\%} = \left| \frac{\underline{V}_0}{\underline{V}_1} \right| 100 = \frac{V_0}{V_1} 100. \quad (31.)$$

Pored navedenih indikatora nesimetrije napona, postoje i drugi indikatori definisani relevantnim standardima i od strane relevantnih međunarodnih organizacija i komisija.

1. NEMA definicija

National Electrical Manufactures Association of USA (NEMA Standard MG1. 1993) definiše nivo nesimetrije sistema linijskih napona (*Line Voltage Unbalance Rate-LVUR*) kao odnos maksimalne razlike između linijskih napona i srednje vrijednosti napona i te srednje vrijednosti linijskih napona, u procentima [51][52]:

$$LVUR_{\%} = \frac{\max[|U_{ab} - U_{sr}|, |U_{bc} - U_{sr}|, |U_{ca} - U_{sr}|]}{U_{sr}} 100, \quad (32.)$$

gdje je:

$$U_{sr} = \frac{U_{ab} + U_{bc} + U_{ca}}{3}. \quad (32.a)$$

2. IEEE definicije

Institute of Electrical and Electronics Engineers daje indikatore pokazatelja kvaliteta električne energije u okviru odgovarajućih IEEE standarda. IEEE standard 112-1991 [53], definiše nivo nesimetrije sistema faznih napona (*Phase Voltage Unbalance Rate – PVUR1*) kao odnos maksimalne razlike između faznih napona i srednje vrijednosti napona i te srednje vrijednosti faznih napona, u procentima:

$$PVUR1_{\%} = \frac{\max[|V_a - V_{sr}|, |V_b - V_{sr}|, |V_c - V_{sr}|]}{V_{sr}} 100, \quad (33.)$$

gdje je:

$$V_{sr} = \frac{V_a + V_b + V_c}{3}. \quad (33.a)$$

U okviru standarda IEEE 936-1987 [54], nivo nesimetrije sistema faznih napona (*Phase Voltage Unbalance Rate–PVUR2*) definiše se kao odnos razlike između maksimalne i minimalne vrijednosti faznih napona i srednje vrijednosti faznih napona, u procentima:

$$PVUR2_{\%} = \frac{\max(V_a, V_b, V_c) - \min(V_a, V_b, V_c)}{V_{sr}} 100. \quad (34.)$$

Prva IEEE definicija i NEMA definicija su praktično identične, s tim što IEEE koristi fazne a NEMA linijske napone. Pri tome, sve tri prethodne definicije uvažavaju samo vrijednosti napona, a zanemaruju fazne pomjeraje, i time faktore nesimetrije izražavaju kao određene brojne vrijednosti u procentima.

3. IEC definicije

U okviru IEC standarda [55] nivo nesimetrije napona definiše se preko faktora nesimetrije napona (*Voltage Unbalance Factor–VUF*) određenog odnosom inverzne i direktne komponente napona.

Shodno definiciji, *Voltage Unbalance Factor*–**VUF** je identičan ranije definisanom faktoru nesimetrije napona– **K_n** , relacije (27.)-(30.).

Za razliku od NEMA i IEEE indikatora nesimetrije napona uvažavaju samo vrijednosti napona, *Voltage Unbalance Factor*-u kompleksnom obliku **$VUF \equiv K_n$** , relacije (27.) i (28.), uvažava i vrijednosti i fazne pomjeraje. Međutim, u praksi se najčešće koristi *Voltage Unbalance Factor*–**VUF** definisan odnosom vrijednosti inverzne i direktne komponente nesimetričnog sistema napona, u procentima. Dakle, **$VUF \equiv K_n$** , relacija (30.), odnosno:

$$VUF_{\%} = \left| \frac{\underline{U}_2}{\underline{U}_1} \right| 100 = \left| \frac{\underline{U}_{ab} + a^2 \underline{U}_{bc} + a \underline{U}_{ca}}{\underline{U}_{ab} + a \underline{U}_{bc} + a^2 \underline{U}_{ca}} \right| 100 = \frac{U_2}{U_1} 100. \quad (35.)$$

Radi pojednostavljenja proračuna i direktne upotrebe mjernih podataka, za faktor nesimetrije napona se često koriste približni izrazi, kao npr. “CIGRE formula” [56][58]:

$$VUF_{c\%} = \sqrt{\frac{1 - \sqrt{3 - 6\beta}}{1 + \sqrt{3 - 6\beta}}} 100, \quad (36.)$$

gdje je:

$$\beta = \frac{U_{ab}^4 + U_{bc}^4 + U_{ca}^4}{(U_{ab}^2 + U_{bc}^2 + U_{ca}^2)}. \quad (37.)$$

Pri određivanju nivoa i analizama nesimetrija napona, neophodno je jasno definisati indikator nesimetrije napona koji se koristi.

1.2.3. Uzroci i posljedice nesimetrija napona

1.2.3.1. Uzroci nesimetrija napona

Zbog vrlo dinamične prirode elektroenergetskog sistema, nesimetrija napona je neizbježna pojava koja se ne može u potpunosti suzbiti. Pored svih deformacija talasnih naponskih oblika navedenih u prethodnim potpoglavljima koje u određenoj mjeri doprinose pojavi nesimetrija, glavni uzroci nastajanja naponskih nesimetrija su:

- nepravilnosti u radu kondenzatorskih baterija,
- jednopolni i dvopolni kratki spojevi u trajanju dok ne odreaguje zaštita,
- neravnomjerne raspodjele opterećenja u jednofaznom sistemu,
- veliki jednofazni distributivni transformatori u sistemu,

- nesimetrični namotaji transformatora,
- velika reaktivna opterećenja u jednoj fazi (aparati za varenje i sl.),
- različite vrijednosti međuinuktivnosti između faznih provodnika usled razlike u dužini,
- loši kontakti neutralnog provodnika,
- impedanse u prenosnom sistemu itd.

Uzroci pojava nesimetrija, a samim tim i nesimetrije u sistemu trofaznih napona, prisutni su praktično na svim nivoima elektroenergetskog sistema, od generatorskog, prenosnog i distributivnog do potrošačkog nivoa, odnosno do trofaznog sistema napona napajanja potrošača.

Na prenosnom nivou, nesimetrije trofaznog sistema napona dominantno uzrokuju “nesimetrični elementi” sistema, odnosno mreža, kao i nesimetrični kvarovi, do njihovog otklanjanja.

U principu, svi osnovni elementi mreža: nadzemni elektroenergetski vodovi, transformatori i kablovi se mogu svrstati u kategoriju “nesimetričnih elemenata”, pri čemu se odgovarajućim, prvenstveno konstrukcionim rješenjima karakteristike nesimetričnosti mogu minimizovati.

Od uzročnika nesimetrija napona na prenosnom nivou posebno su značajni nadzemni elektroenergetski vodovi, koji u suštini čine sistem prenosa. Nadzemni elektroenergetski vodovi spadaju u “nesimetrične elemente” zbog njihove konstrukcije, u okviru koje imamo nejednakih razmaka između faznih provodnika kao i nesimetričan položaja zaštitne užadi i zemlje prema faznim provodnicima. Posljedica ovoga su različite vrijednosti jediničnih parametara faznih provodnika, konkretno jedinične induktivnosti i jedinične kapacitivnosti. Različite vrijednosti induktivnosti, odnosno induktivne otpornosti faznih provodnika uzrokuju u opterećenom stanju voda različite padove napona, odnosno nesimetrije u trofaznom sistemu napona na kraju voda. Ove nesimetrije mogu kod prenosnih vodova biti značajne, prvenstveno kod onih najviših naponskih nivoa, velikih dužina i značajnog strujnog opterećenja. Kako bi se to izbjeglo fazni provodnici se “prepliću”, najmanje na trećini dužine voda, tako da svaki fazni provodnik duž trase voda zauzme po jednom, ili više puta, sva tri moguća položaja. Time se postižu jednake (srednje) vrijednosti parametara sve tri faze voda, odnosno iste vrijednosti pada napona po fazama i praktično simetričan sistem trofaznih napona na kraju voda. U praksi izvedbi nadzemnih elektroenergetskih vodova. “preplitanje” se realizuje na stubovima posebne konstrukcije. To u određenom iznosu utiče na povećanje cijene voda, ali s druge strane eliminiše osnovni uzrok nesimetrija napona na nivou prenosa, čije bi posljedice mogle biti znatno veće.

“Nesimetričnost kablova” karakteristična je prvenstveno za jednožilne kablove kod kojih su tri faze položene u jednoj ravni. Takvi kablovi imaju nesimetrične uzdužne reaktanse, a time i različite padove napona duž pojedinačnih faznih kablova, odnosno

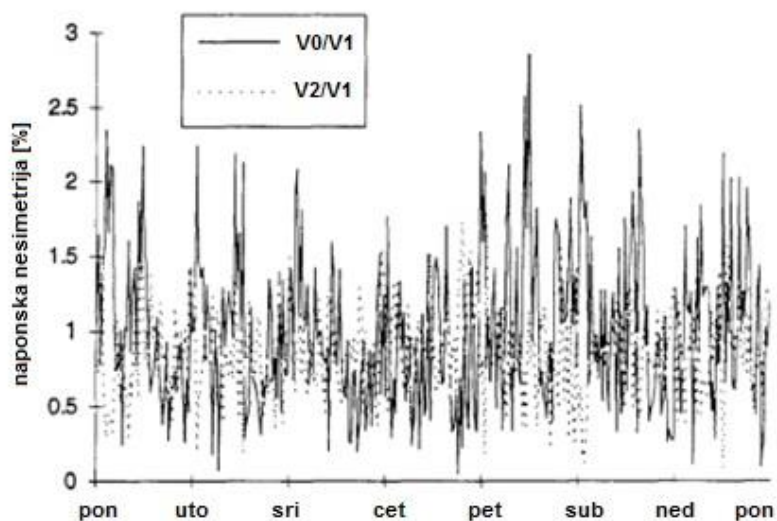
nesimetrični sistem trofaznih napona. Međutim, ukoliko se faze polože u trougao ili se faze “prepletu” onda se uspijeva izbjeći nesimetrija.

Na distributivnom i potrošačkom nivou, odnosno u naponu napajanja potrošača, najčešći uzrok nesimetrija su nesimetrična opterećenje faza trofaznog sistema, a u određenoj mjeri uzrok nesimetrija su i “nesimetrični elementi” mreža kao i nesimetrični kvarovi, do njihovog otklanjanja.

Praktično, izvor nesimetrija su sva jednofazna i dvofazno opterećenja, vuča, elektrolučne peći na mrežama srednjeg i visokog napona, indukzione peći i dominantno, neravnomjerno raspoređena jednofazna opterećenja potrošača na niskonaponskom nivou.

Nesimetrija može biti sistematska i slučajna. Sistematska nesimetrija je posljedica neravnomjerne raspodjele po fazama pojedinih monofaznih potrošača. Slučajna nesimetrija je rezultat različitih grafika opterećenja pojedinih potrošača i režima njihovog uključenja.

Kao realan primjer, na *slici 19.* [1] dat je grafik nesimetrija u trajanju jedne sedmice distributivnog fidera koji napaja stambenu potrošnju.



Slika 19. Nesimetrija napona na sabirnici sa koje se napaja stambena potrošnja

1.2.3.2. Posljedice nesimetrija napona

Pojave naponskih nesimetrija mogu imati ozbiljne negativne efekte na elektroenergetski sistem, elektroenergetsku opremu i uređaje, kao i na priključene potrošače.

Negativne posljedice naponskih nesimetrija su mnogobrojne i raznovrsne. Te posljedice treba posmatrati kroz dva osnovna aspekta: uticaj na elektroenergetsku opremu i uređaje elektroenergetskog sistema i uticaj na potrošače električne energije.

Negativni uticaj naponskih nesimetrija na elektroenergetski sistem i njegovu opremu, prvenstveno se ispoljava kroz povećanje gubitaka i prekomjerno zagrijavanje.

Karakteristično povećanje gubitaka imamo u niskonaponskim mrežama sa nesimetričnim opterećenjem, koje je osnovni uzrok nesimetrija napona. Niskonaponske distributivne mreže grade se, po pravilu, kao trofazne četvorožične, sa tri fazna provodnika i jednim neutralnim. Neutralni provodnik se vezuje za zvezdište transformatora, koje se obavezno uzemljuje (radno uzemljenje). Ovaj provodnik služi za priključak monofaznih potrošača a može imati i zaštitnu funkciju (zaštitno nulovanje). Kod simetričnog opterećenja kroz nulti provodnik ne teče struja. Međutim, pri nesimetričnom opterećenju, kroz neutralni provodnik teče izvjesna struja. Sa druge strane, pored nesimetričnog opterećenja, zbog porasta broja nelinearnih uređaja i aparata, kao što su fluorescentne sijalice, živine sijalice, energetski pretvarači, računari, monitori, i sl. javljaju se harmonijska izobličenja struja i napona. Uslijed toga, kroz neutralni provodnik teku i struje harmonika koji su djeljivi sa tri. Dakle, pojave nesimetrija i viših harmonika mogu kroz neutralni provodnik izazvati struje značajnih vrijednosti, što naravno uzrokuje povećanje gubitaka aktivne snage u distributivnim mrežama, kako u vodovima tako i u transformatorima.

Istovremeno, pojava struja većeg intenziteta kroz neutralni provodnik, može dovesti do nepravilnog rada zaštitnih releja.

Takođe, negativna i nulta komponenta napona ili struja utiče na nepreciznost mjerenja mnogih parametara, što dovodi do nepogodnosti pri podešavanjima ili radu određenih automatizovanih funkcija unutar sistema.

Veliki iznosi naponskih nesimetrija mogu, zbog prekomjernog zagrijavanja, značajno uticati na skraćenje životnog vijeka ili skraćenje vremena između dva servisa određene elektroenergetske opreme i uređaja, što povećava troškove eksploatacije i održavanja.

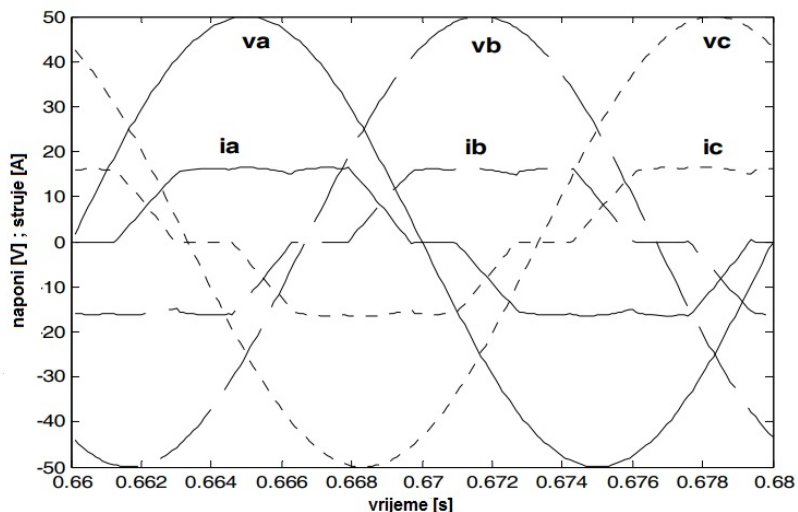
Kada su u pitanju generatori kao elementi elektroenergetskog sistema, nema nultih komponenti struje iz razloga što je nulti sistem generatora odvojen od nultog sistema ostatka mreže. Inverzna komponenta struje kod generatora izaziva dodatno zagrijavanje željeza, pogotovo u rotoru u kojem magnetsko polje zbog inverzne komponente struje rotira dvostrukom sinhronom brzinom. Kao mjerodavnu struju za zagrijavanje namotaja statora uzima se ukupna struja koja je najveća onda kada direktna i inverzna komponenta struje imaju isti smjer. Jako je bitno da ukupna struja ne bude veća od nazivne kako ne bi došlo do nedopuštenog zagrijavanja. U praksi inverzna struja koja smije teći kroz generator ograničena je na iznos od 6% do 12% nazivne struje.

Inverzna komponenta struje na sličan način djeluje i na transformator, tj. izaziva dodatna zagrijavanja i povećava gubitke. Nultu komponentu struje transformatori podnose zahvaljujući tercijarnom namotu. U suštini, visok iznos naponske nesimetrije može uzrokovati asimetričan fluks unutar jezgra transformatora. Ovakav vid asimetričnog fluksa dovodi do povećanih gubitaka unutar jezgra, povećanje temperature namotaja, a u ozbiljnim slučajevima i do kvara na transformatoru.

Nulte komponente nesimetričnih režima elektroenergetskih mreža izazivaju smetnje u susjednim telekomunikacionim i signalnim vodovima.

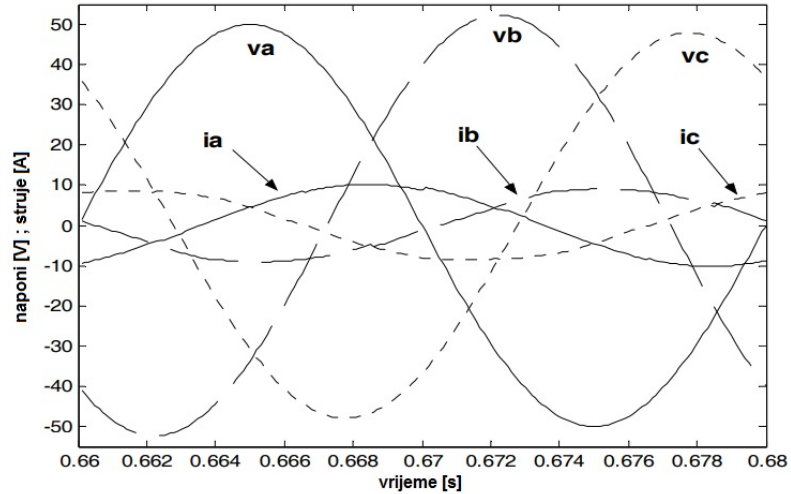
Posebno osjetljiva vrsta električnih uređaja na naponsku nesimetriju su ispravljači. Ispravljači su prisutni kod svih električnih uređaja kod kojih se vrši konverzija AC signala u DC signal. Tu spadaju: računari, programabilni logički kontroleri (*Programmable logic controller*- PLC), neprekidno napajanje (*Uniterruptible power supply* - UPS-ovi), i dr.

Ispravljači čine nelinearnu vrstu opterećenja gdje izlazni talasni oblik struje nije identičan ulaznom. Kod tipičnih ispravljača glavnu ulogu vrše diode koje provode kad se ostvari određena vrijednost napona u pozitivnom smjeru tokom određene poluperiode za svaku fazu. Grafici napona i struja jednog simetrično napajanog ispravljača dati su *slikom 20.a.* [44].



Slika 20.a. Naponski i strujni signali simetrično napajanog ispravljača

Ukoliko na ulazu postoji naponska nesimetrija, u tom slučaju dolazi do preklapanja određenih signala dioda što doprinosi deformaciji željenih oblika struja i napona na izlazu. Kao i u prethodnim slučajevima, nesimetrije napona dovode da povećanih vrijednosti struja u komponentama ispravljača što može prouzrokovati njihovo pregrijavanje. Grafici napona i struja nesimetrično napajanog ispravljača prikazani su na *slici 20.b.* [44].



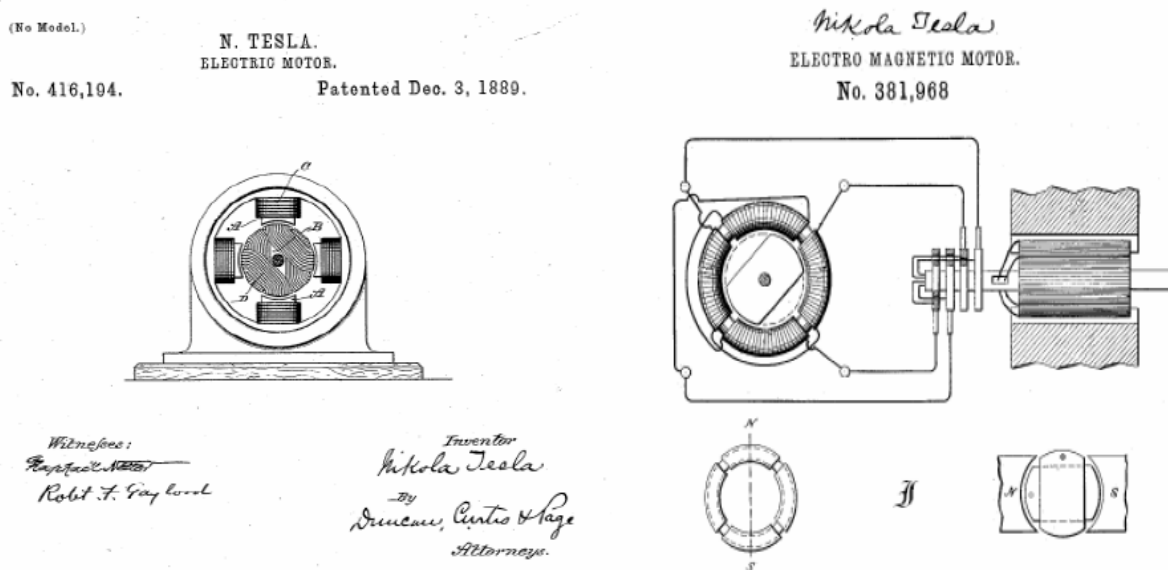
Slika 20.b. Naponski i strujni signali nesimetrično napajanog ispravljača

U kategoriji potrošnje, nesimetrije napona napajanja imaju značajan negativan uticaj na asinhronne motore. Nivo tog uticaja zavisi od više faktora, prvenstveno od veličine nesimetrije napona, kao i vrste i veličine motora. S obzirom na veoma veliko učešće asinhronih motora u potrošnji električne energije, izučavanje uticaja nesimetrije napona, odnosno uopšte izučavanje uticaja kvaliteta električne energije na rad i karakteristike asinhronih motora ima izuzetan značaj.

2. OSNOVNE INFORMACIJE O ASINHRONJOJ MAŠINI

2.1. ISTORIJSKI OSVRT

Priča o indukcionom (asinhronom) motoru počinje krajem 19. vijeka. Za glavne inicijatore razvoja tj. pronalaska vezuju se dva čovjeka, Nikola Tesla, srpski naučnik i inovator svjetskog glasa i Galileo Ferraris, italijanski fizičar i elektro inženjer. Smatra se da je Ferraris 1885. godine napravio prvi funkcionalni model indukcionog motora i tvrdio je da ovakav tip mašine ne može dostići ni 50% efikasnosti, te stoga nije dalje razvijao sličan model. S druge strane, Tesla je u svojoj autobiografiji naveo da je koncept ove mašine kreirao još tokom 1882. godine, dok je, kako izvori navode, na ljeto 1883. godine u Strazburu predstavio svoj prvi model indukcionog motora. Međutim činjenica je da je tokom 1888. i 1889. godine Tesla patentirao ovu vrstu električne mašine (slika 21.) [40].

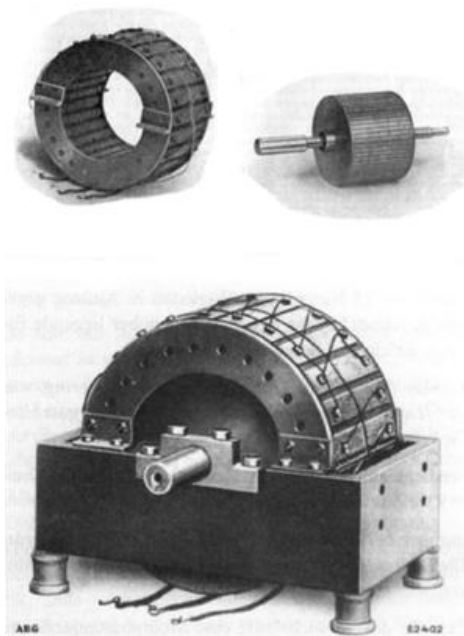


Slika 21. Patent prve asinhrone mašine

Tokom 1888. godine, očaran Teslinim predavanjima o naizmjeničnoj struji, George Westinghouse otkupljuje 40 njegovih patenata i zapošljava ga kao konsultanta u svojoj kompaniji. Tesla je bio fokusiran na razvijanje dvofazne i monofazne asinhrone mašine sa relativno velikim frekvencijama (125 Hz i 133 Hz) te zbog neuspjeha da napravi pouzdan sklop, a i većim interesovanjem za druge teme, krajem 1889. godine otvara svoju prvu laboratoriju što je bio dovoljan razlog da Westinghouse obustavi dalji razvoj unutar svoje kompanije.

U periodu 1889-1891., Michael Dolivo-Dobrowolsky, glavni električar kompanije AEG u Berlinu, razvija trofazni kavezni indukcionni motor kao i trofazni indukcionni motor sa

kliznim prstenovima i startnim otpornicima (slika 22.) [39]. Dokazom da je moguće napraviti pouzdan indukcion motor, Westinghouse 1892. godine ponovo otpočinje razvoj ove vrste mašine i dolazi se do zadovoljavajućih rezultata već tokom 1893. godine.



Slika 22. Prvi trofazni kavezni indukcion motor (kreator, Michael Dolivo-Dobrowolsky)

Nakon više od vijeka od pojave ove električne mašine, poslije značajnog unapređenja prenosne mreže, ostalih djelova elektroenergetskog sistema naizmjenične struje kao i elektronike, asinhroni (indukcion) motor je postao jedan od najzastupljenijih električnih motora koji se mogu sresti u svakodnevnom životu. Ovako široka primjena je ostvarena zahvaljujući njihovoj jednostavnosti i pouzdanosti. Neke od primjena ovog tipa električnog motora, kao pogonskog elementa, mogu se vidjeti na sljedećim slikama (slike 23.-26.) [30].



Slika 23. Električna vozila



Slika 24. Žičara



Slika 25. Centrifugalna pumpa (lijevo) i ventilator (desno)



Slika 26. Kompresori u klima uređajima

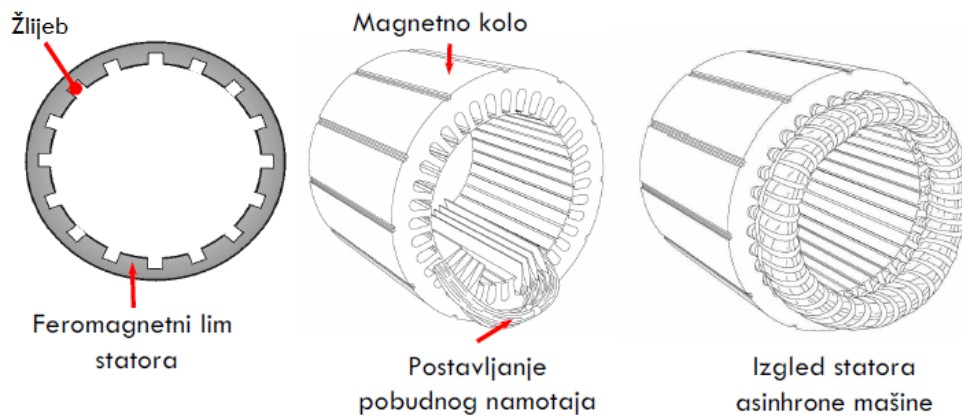
2.2. KONSTRUKCIJA I PRINCIP RADA

Osnovni elementi asinhronne mašine su:

- mirujući dio (stator) i
- obrtni dio (rotor).

Stator se sastoji iz magnetnog kola i namotaja. Magnetno kolo je sačinjeno od tankih i međusobno izolovanih feromagnetnih limova, koji su po unutrašnjoj strani ožlijebljeni. U žlijebovima statora je smješten pobudni namotaj. Namotaj je trofazni (ukoliko je trofazna

asinhrona mašina u pitanju), spregnut u zvijezdu ili trougao. Primjeri ovog statora mogu se vidjeti na slikama 27.-28. [8].

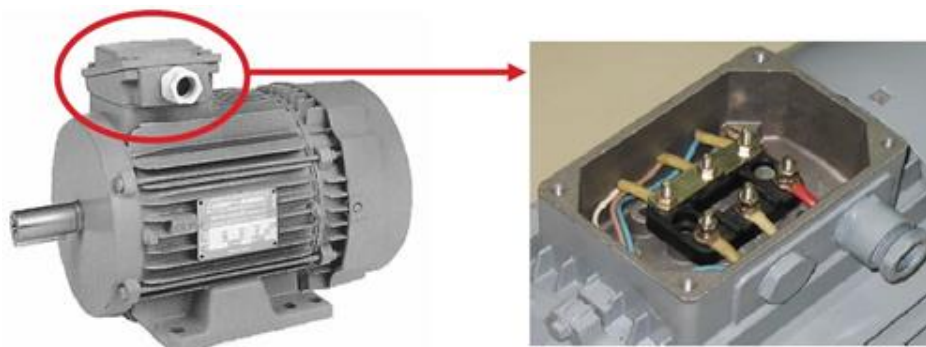


Slika 27. Konstrukcija statora trofazne asinhronne mašine



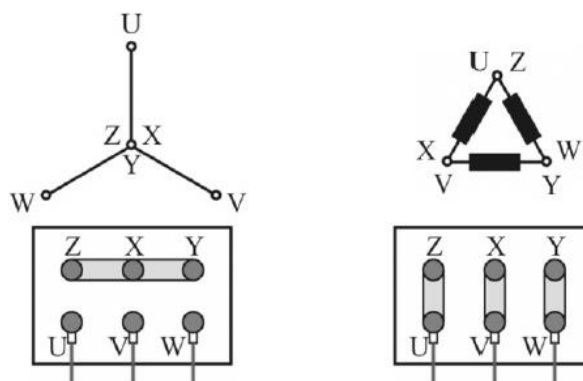
Slika 28. Izgled statora trofazne asinhronne mašine

Počeci i krajevi namotaja pobude (statorski namotaji) su izvedeni u priključnu kutiju mašine (slika 29.) [7].



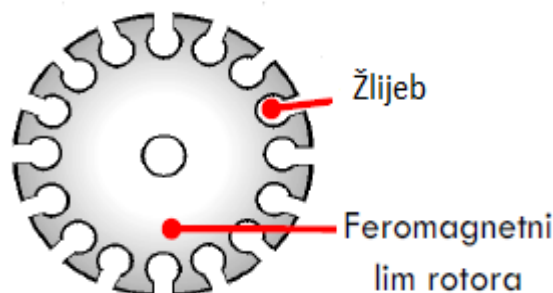
Slika 29. Priključna kutija asinhronne mašine

Određenim rasporedom priključnih pločica unutar priključne kutije dolazi se do željene konfiguracije sprega namotaja statora (zvijezda ili trougao, *slika 30.*) [7].



Slika 30. Sprega zvijezda (lijevo) i sprega trougao (desno)

Rotor asinhronne mašine se sastoji iz magnetnog kola i namotaja takođe. Magnetno kolo je sačinjeno od tankih limova i međusobno izolovanih feromagnetnih limova, koji su po spoljašnjoj strani ožlijebljeni. U žlijebovima rotora smješten je namotaj (*slika 31.*) [8].

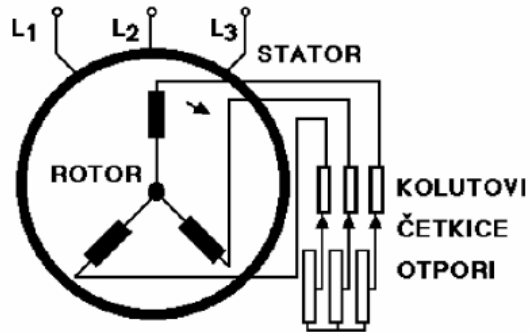


Slika 31. Feromagnetni lim rotora sa žljebovima asinhronog motora

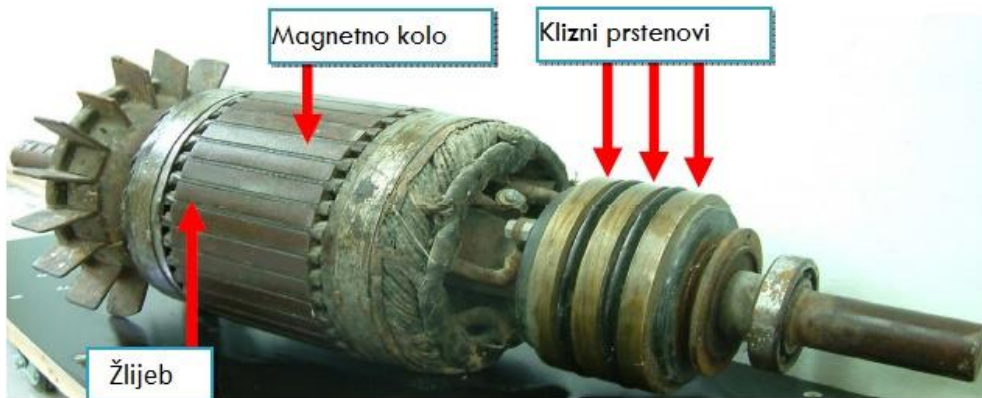
Namotaj rotora se izvodi na dva načina i to kao kavezni (kratkospojeni) i namotani (sa prstenovima). U tom smislu se i asinhronne mašine dijele na dvije grupe i to na:

- asinhronne mašine sa namotanim rotorom (sa kliznim prstenovima) i
- asinhronne mašine sa kaveznim (kratkospojenim) rotorom.

Asinhrona mašina sa namotanim rotorom posjeduje rotor u kojem je smješten trofazni namotaj. Ako je namotaj spregnut u zvijezdu onda se tri kraja spoje u neutralnu tačku, preostala tri kraja se izvode do tri klizna prstena izolovana međusobno i od vratila. Na klizne prstenove naliježu četkice koje su u vezi sa trofaznim rotorskim otpornikom koji se često naziva otpornik za puštanje u rad. Kako je rotorski otpornik potreban samo za puštanje u rad, nakon toga se četkice podižu i namotaj rotora se kratko spaja preko odgovarajućeg uređaja (*slike 32.-33.*) [4].

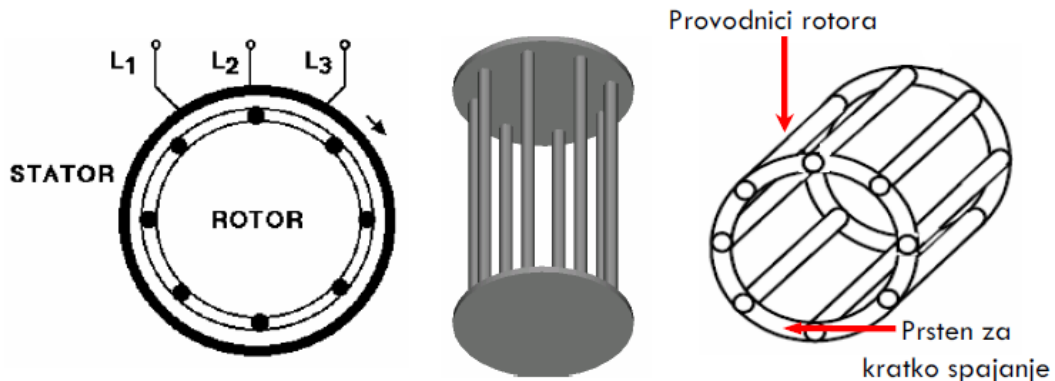


Slika 32. Šema namotanog rotora sa otpornicima u svom kolu

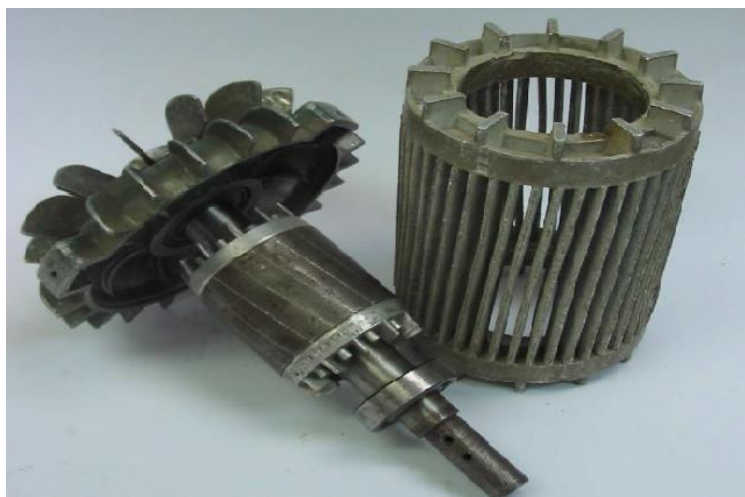


Slika 33. Namotani rotor asinhronne mašine

Asinhrona mašina sa kavezim rotorom posjeduje namotaj rotora koji je značajno različit-podsjeća na kavez (otuda potiče i naziv). Kod motora manjih i srednjih snaga je izliven od aluminijuma i kratko spojen, a kod motora većih snaga je izrađen od neizolovanih bakrenih štapnih provodnika, koji se na bočnim stranama kratko spajaju sa po jednim prstenom. U oba slučaja, kratkospojeni rotor nema mogućnost spoljnjeg električnog pristupa. Na sledećim slikama može se vidjeti ova vrsta rotora (slike 34.-35.) [8].



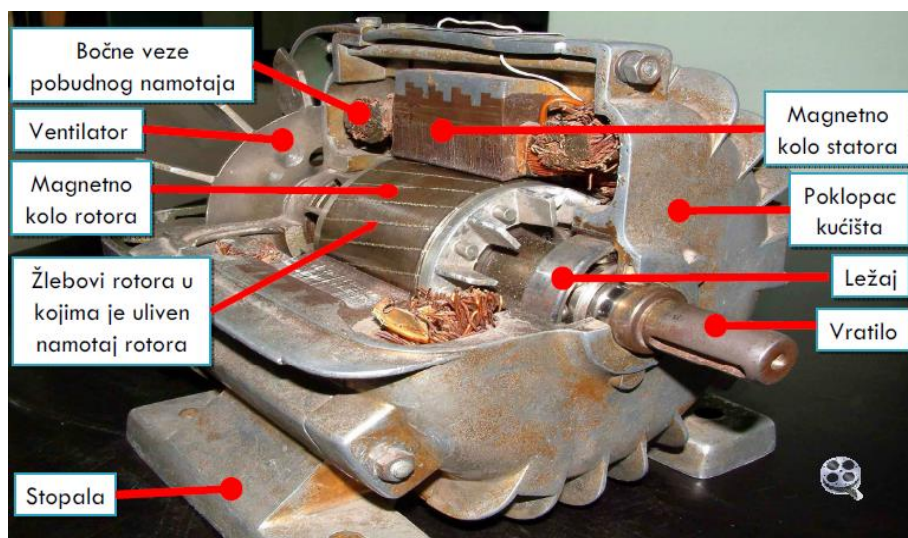
Slika 34. Šema i skica kaveznog rotora asinhronne mašine



Slika 35. Kavezni rotor asinhrone mašine

Ovaj vid konstrukcije rotora je neuporedivo prostiji u odnosu na konstrukciju namotanog rotora. Samim tim ovaj tip rotora je i jeftiniji, dok je, sa druge strane, sigurnost u radu mnogo veća jer ne zahtijeva rotorske otpornike. Međutim nedostatak asinhronih mašina sa kaveznim rotorom ogleda se u problemima prilikom puštanja u rad-zbog prevelike polazne struje (5-8 puta veće od nominalnih vrijednosti struja). Zbog toga se upotreba kaveznih asinhronih mašina ograničava na manje i srednje snage.

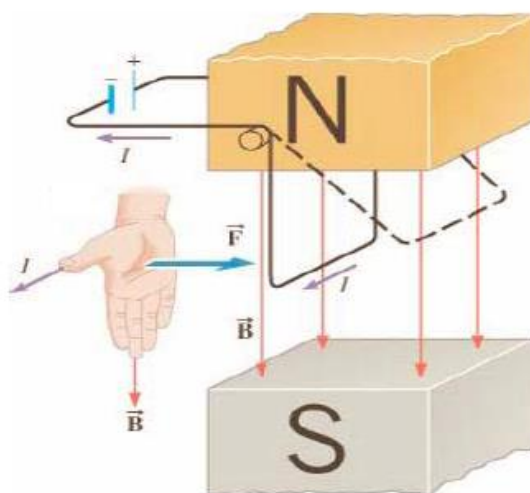
Čitav stator asinhronih mašina se postavlja u kućište, koje je kod manjih mašina obično izliveno od aluminijuma ili livenog gvožđa. Spolja su postavljena rebra, radi povećanja površine hlađenja, dok je ventilator, radi odnošenja toplote sa površine kućišta, ugrađen na vratilu za koje je pričvršćen rotor. Presjek asinhrone mašine prikazan je na slici 36. [8].



Slika 36. Presjek asinhrone mašine

Pretvaranje električne energije u mehaničku i obratno, koje se naziva elektromehaničkim pretvaranjem energije, zasniva se na izvjesnim prirodnim pojavama kojima su povezani, sa jedne strane magnetno i električno polje, a sa druge strane mehanička sila i kretanje. Tih pojava je više, međutim najvažnije pojave u tom smislu su one na kojima se zasniva rad elektromagnetnih obrtnih mašina, koje inače imaju daleko najveću praktičnu primjenu i značaj.

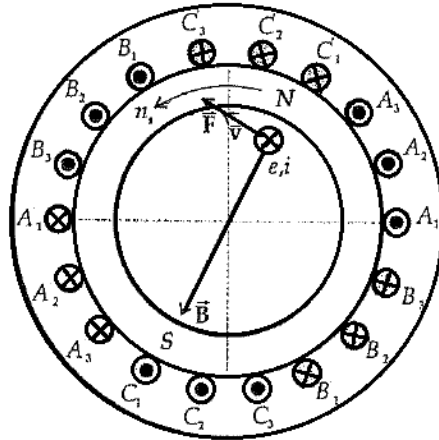
Fundamentalni princip na kojem se zasnivaju elektromagnetni motori je mehanička (elektromagnetna) sila koja djeluje na provodnik, kroz koji protiče električna struja, i koji se nalazi u magnetnom polju (slika 37.) [43] kao i na pojavi da se u kolu koje se kreće kroz magnetno polje indukuje elektromotorna sila. Elektromotorna sila (*ems*) indukovana u električnom kolu ima smjer takav da struja koja se stvara u tom kolu usled nje, indukuje magnetno polje koje se suprotstavlja promjeni magnetnog fluksa.



Slika 37. Provodnik u magnetnom polju i prikaz fizičkih veličina koje se javljaju

Te dvije pojave se odigravaju istovremeno, kao akcija i reakcija, zbog čega je proces elektromehaničkog pretvaranja energije reverzibilan. Pretvaranje mehaničke energije u električnu i obratno postoji samo onda, ako postoji relativno kretanje provodnika prema magnetnom polju.

Princip rada asinhronog motora je u suštini jednostavan. Priključenjem namotaja statora na trofazni sistem naizmjeničnih napona, kroz prostorno pomjerene fazne namotaje protekne vremenski promjenljiva struja. Time se u mašini formira obrtno magnetno polje koje rotira sinhronom brzinom. Broj pari polova tog magnetnog polja, a samim tim i brzinu obrtanja obrtnog magnetnog polja, određuje način na koji je namotaj statora izveden. Obrtno magnetno polje na slici 38. [6] prikazano je kao dvopolno. U jednom trenutku je položaj magnetnih polova kao na slici, tako da je vektor magnetne indukcije \vec{B} usmjeren od sjevernog ka južnom magnetnom polu, kroz rotor, kroz oba vazдушna procjepa i nazad kroz magnetno kolo statora.



Slika 38. Smjer indukovane ems, aktivne komponente struje i magnetske sile na jedan štاپ provodnika rotora

U jednom provodniku (štapu) rotora, pod uslovom da se obrće brzinom manjom od sinhronne brzine (brzine obrtanja magnetnog polja), obrtni talas magnetne indukcije indukuje ems prema poznatoj zakonitosti:

$$e = - \int_l (\vec{v} \times \vec{B}) \cdot d\vec{l}, \quad (38.)$$

gdje je: e - elektromotorna sila (ems) indukovana u provodniku rotora,

\vec{v} - vektor brzine kretanja provodnika rotora,

\vec{B} - vektor magnetne indukcije kojeg provodnik presijeca,

$d\vec{l}$ - dužina provodnika koju presijecaju linije magnetnog polja.

Treba obratiti pažnju na sledeće: smjer indukovane ems određen vektorskim proizvodom $\vec{v} \times \vec{B}$ je ispravan onda kada se provodnik kreće brzinom \vec{v} u nepokretnom magnetnom polju indukcije \vec{B} . Međutim, ovdje je slučaj inverzan jer se polje kreće u odnosu na provodnik pa je smjer indukovane ems suprotan smjeru kojeg određuje već pomenuti vektorski proizvod. Zbog toga se u izrazu (38.) javlja znak minus.

Indukovana ems u provodniku uzrokuje tok struje jer je taj provodnik u kratkom spoju sa ostalim provodnicima na rotoru. Aktivna komponenta te struje je u fazi sa indukovanom ems što znači da su istog smjera. Ono što pokreće rotor u obrtno stanje je sila koja djeluje na provodnik u magnetnom polju (Lorencova sila):

$$\vec{F} = I \int_l d\vec{l} \times \vec{B}, \quad (39.)$$

smjera takvog da rotorske provodnike a samim tim i rotor, zarotira u smjeru obrtanja magnetnog polja (*slika 38.*). Naravno sve ovo važi u slučaju dok brzina obrtanja rotora ne dostiže vrijednost sinhronne brzine jer u protivnom linije magnetnog polja ne bi presijecale provodnike rotora i ne bi se indukovala ems u njima. Relativnim klizanjem s (*slip*), naziva se veličina koja je određena sledećim izrazom:

$$s = \frac{n_S - n_r}{n_S}, \quad (40.)$$

gdje su: n_S - brzina okretanja magnetnog polja (sinhrona brzina),

n_r - brzina okretanja rotora.

Vrijednost relativnog klizanja kod motora manjih snaga kreće se u intervalu od 3 do 8%, a kod motora većih snaga do 1 do 3%.

2.3. EKVIVALENTNA ŠEMA

Poznavanje oblika i elemenata ekvivalentne šeme od velikog je značaja kod proučavanja raznih režima rada asinhronih motora, posebno prelaznih pojava. Budući da analize prelaznih režima rada mogu biti jako osjetljive na vrijednosti pojedinih ulaznih veličina, tj. parametara ekvivalentnog kola, nastoji se da se mjerenjima oni što tačnije odrede.

Kako je zakočena asinhrona mašina u suštini transformator, ekvivalentna šema asinhronne mašine izvodi se iz jednačina dva magnetno spregnuta namotaja, od kojih jedan rotira.

Otvoren rotorski namotaj

Priključivanje namotaja statora na određeni napon dovodi do formiranja obrtnog magnetskog polja unutar mašine. U slučaju da su rotorski namotaji otvoreni, ovo obrtno magnetno polje indukuje u namotajima statora elektromotornu silu (ems) samoindukcije, koja čini protivtežu primijenjenom naponu. Efektivna vrijednosti ove ems po jednoj fazi predstavljena je izrazom:

$$E_1 = 4.44 f_1 N_{1eff} \Phi, \quad (41.)$$

gdje je: f_1 - učestanost električnih veličina statora,

N_{1eff} - stvarni broj redno vezanih navojaka po fazi, pomnožen pojasnim i tetivnim navojnim sačiniocem,

Φ - fluks po polu.

Obrtni magnetni fluks obuhvata i namotaje rotora, stoga u njima indukuje *ems* međusobne indukcije. Uzevši u obzir da je u ovom slučaju namotaj rotora otvoren, što znači da je rotor u stanju mirovanja, slijedi da je vrijednost indukovane fazne *ems* međusobne indukcije:

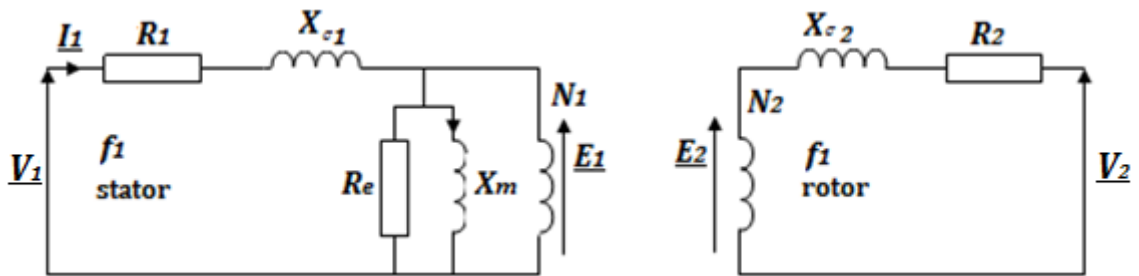
$$E_2 = 4.44 f_1 N_{2eff} \Phi. \quad (42.)$$

Odnos ove dvije fazne *ems* daje prenosni odnos, tj. odnos N_1 i N_2 koji predstavljaju broj redno vezanih navojaka faznog namotaja statora i rotora i predstavljen je sljedećim izrazom:

$$n_{12} = \frac{N_{1eff}}{N_{2eff}} = \frac{k_{1p} k_{1t} N_1}{k_{2p} k_{2t} N_2}. \quad (43.)$$

Kako je rotor u stanju mirovanja, obrtno magnetno polje prelazi istom brzinom preko namotaja statora i rotora, što znači da su indukovane *ems* u namotajima statora i namotajima rotora iste učestanosti f_1 .

Ekvivalentno kolo jedne faze asinhronog motora sa otvorenim namotajima rotora dato je slikom 39. [6].



Slika 39. Ekvivalentno kolo jedne faze asinhronog motora sa otvorenim namotajima rotora

Oznake na slici su:

- R_1 - otpornost namotaja statora,
- R_2 - otpornost namotaja rotora,
- $X_{\sigma 1}$ - rasipna reaktansa u kolu statora,
- $X_{\sigma 2}$ - rasipna reaktansa u kolu rotora,
- V_1 - fazni napon na statoru,
- V_2 - fazni napon na rotoru,

I_1 - fazna struja rotora,

X_m - reaktansa magnećenja,

R_e - otpornost koja služi za modelovanje gubitaka u gvožđu.

Prethodnom slikom prikazana je šema samo jedne faze asinhronog motora, međutim za preostale dvije faze važe identične efektivne vrijednosti struja, napona i *ems* ali fazno pomjerenih za $\pm 120^\circ$.

Kratkospojen rotorski namotaj

Pri normalnom radu asinhronog motora, rotorski namotaji su kratko spojeni. U tom slučaju, kao što je ranije navedeno, indukovana *ems* dovodi do toka struje a time i do pojave elektromagnetnog momenta. Sve to uzrokuje zalijetanje rotora.

Usljed rotacije rotora, obrtno magnetno polje preko namotaja rotora prelazi brzinom koja je jednaka razlici sinhrone brzine i brzine rotacije rotora. Stoga se indukovana *ems* međusobne indukcije u namotajima rotora mijenja i po veličini i po učestanosti, što je prikazano izrazom:

$$E_{2,f_2} = 4.44 f_2 N_{2eff} \Phi, \quad (44.)$$

gdje je učestanost rotorskih veličina:

$$f_2 = s f_1. \quad (45.)$$

Uzimajući u obzir izraz (42.) iz prethodnog režima (ukočen rotor), dolazi se do:

$$E_{2,f_2} = 4.44 f_2 N_{2eff} \Phi = 4.44 s f_1 N_{2eff} \Phi = s E_2. \quad (46.)$$

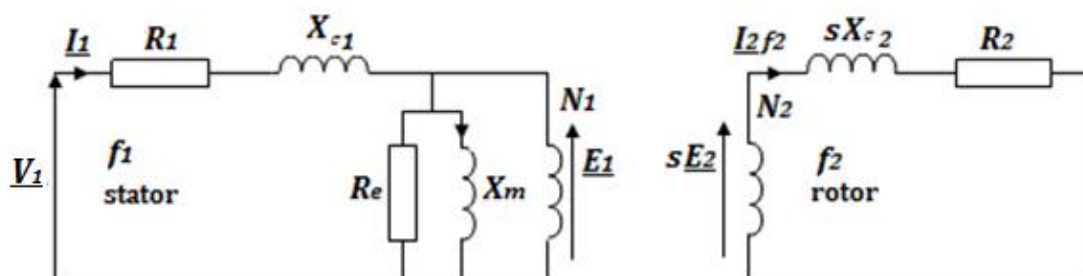
Izrazom (45.) data je učestanost indukovane *ems*, a samim tim i struje rotirajućeg rotora, pa se može zaključiti da se i rasipna reaktansa u kolu rotora mijenja po veličini u odnosu na stanje ukočenog rotora:

$$X_{\sigma 2, f_2} = \omega L_{\sigma 2} = 2\pi f_2 L_{\sigma 2} = 2\pi s f_1 L_{\sigma 2} = s X_{\sigma 2}. \quad (47.)$$

Efektivna vrijednost struje faznog namotaja rotora, učestanosti f_2 , je:

$$I_{2, f_2} = \frac{E_{2, f_2}}{\sqrt{R_2^2 + X_{\sigma 2, f_2}^2}} = \frac{s E_2}{\sqrt{R_2^2 + (s X_{\sigma 2})^2}}. \quad (48.)$$

Stanje ovog radnog režima prikazano je ekvivalentnim kolom na slici 40. [6].

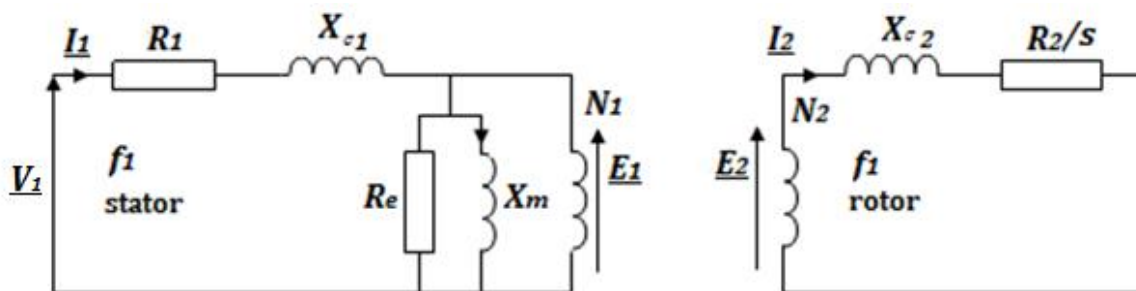


Slika 40. Ekvivalentno kolo jedne faze asinhronog motora sa kratkospojenim namotajima rotora

Dijeljenjem brojioca i imenioca sa desne strane izraza (27.) klizanjem s , za faznu struju rotora se dobija:

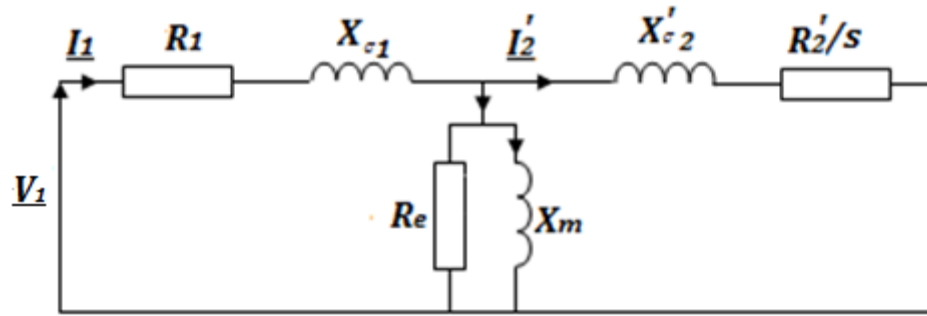
$$I_2 = \frac{E_2}{\sqrt{\left(\frac{R_2}{s}\right)^2 + X_{\sigma 2}^2}}, \quad (49.)$$

čime je efektivna vrijednost struje ostala nepromijenjena ali je izvršena frekventna transformacija, tj. sa desne strane izraza (49.) figurišu veličine ukočenog rotora učestanosti f_1 . Primjenom opisane transformacije, otpornost faznog namotaja rotora se virtuelno mijenja klizanjem. Nakon ove frekventne transformacije dobija se ekvivalentno kolo prikazano slikom 41. [6].



Slika 41. Ekvivalentno kolo jedne faze asinhronog motora sa kratkospojenim namotajima rotora nakon frekventne transformacije

Kako su sada sve električne veličine i sa strane statora i sa strane rotora, iste, mrežne učestanosti f_1 , moguće je sekundarnu stranu (rotor) svesti na stranu primara (statora), korišćenjem prenosnog odnosa datog izrazom (43.), te se dobija ekvivalentno kolo dato slikom 42. [6].

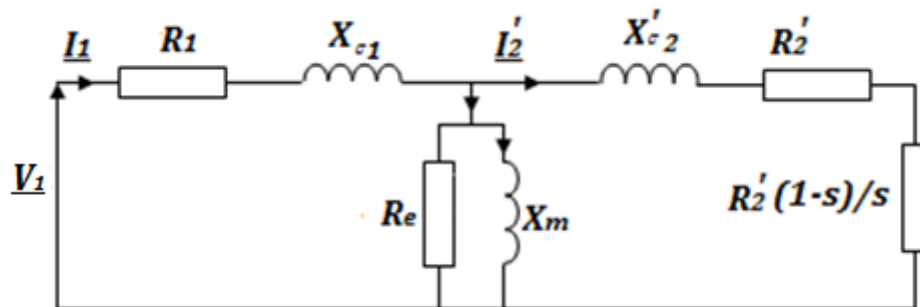


Slika 42. Ekvivalentno kolo jedne faze asinhronog motora svedeno na primarnu stranu

Dodatno razlažući član $\frac{R_2'}{s}$ na oblik:

$$\frac{R_2'}{s} = R_2' + \frac{1-s}{s} R_2', \quad (50.)$$

dolazi se do ekvivalentne šeme date na slici 43. [6].

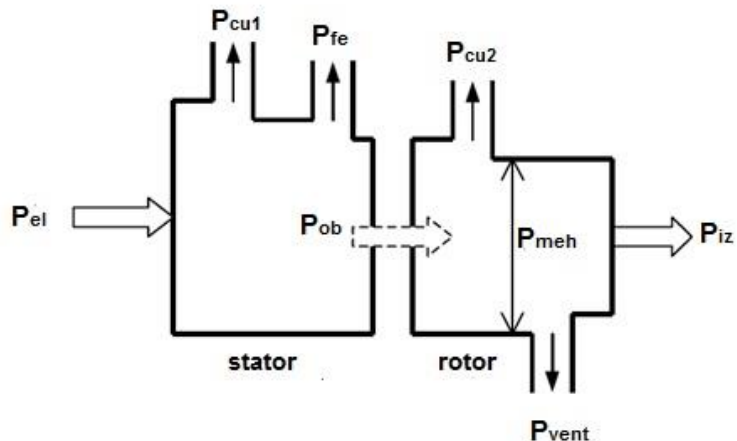


Slika 43. Ekvivalentno kolo jedne faze asinhronog motora svedeno na primarnu stranu sa razloženom otpornošću u kolu rotora

Parametri prezentovanih ekvivalentnih šema određuju se iz standardnih eksperimenata praznog hoda i kratkog spoja.

2.4. ENERGETSKI BILANS I ELEKTROMAGNETNI MOMENT

Kao i svaka električna mašina, asinhroni motor uzima određenu električnu snagu iz mreže. Poslije niza raznih gubitaka snage unutar samog motora, na svom vratilu daje mehaničku snagu. Energetski bilans asinhronog motora dat je slikom 44.



Slika 44. Energetski bilans asinhronog motora

Snaga koju motor vuče iz mreže data je izrazom:

$$P_{el} = 3U_f I_f \cos \varphi = \sqrt{3}U_l I_l \cos \varphi. \quad (51.)$$

U statoru, dio ove snage troši se na Džulove gubitke u namotajima (P_{cu1}) i na gubitke u gvožđu (P_{fe}). Preostala snaga je snaga obrtnog magnetnog polja ili tkz. obrtna snaga (P_{ob}), što se može predstaviti izrazom:

$$P_{ob} = P_{el} - P_{cu1} - P_{fe} = \sqrt{3}U_l I_l - 3R_1 I_1^2 - 3\frac{E_1^2}{R_e}. \quad (52.)$$

Usljed male učestanosti magnećenja magnetskog kola rotora ($f_2 = sf_1$), gubici u gvožđu rotora se zanemaruju. Takođe, mogu se zanemariti i gubici trenja i ventilacije (P_{vent}). Tada je:

$$P_{iz} = P_{meh}. \quad (53.)$$

Slijedi, da se snaga obrtnog magnetnog polja prenosi u rotor, gdje se nakon oduzimanja Džulovih gubitaka u namotajima rotora (P_{cu2}) prenosi na osovinu kao mehanička snaga (P_{meh}).

Prema ekvivalentnoj šemi sa slike 43., ova snaga se troši na gubitke u otpornostima kola rotora R_2' i $R_2'(1-s)/s$, što se može predstaviti izrazom:

$$P_{ob} = P_{cu2} + P_{meh} = 3R_2' I_2'^2 + 3R_2' \frac{1-s}{s} I_2'^2. \quad (54.)$$

Mehanička snaga na osovini motora data je kao proizvod elektromagnetnog momenta i brzine obrtanja rotora:

$$P_{meh} = M \omega_r. \quad (55.)$$

Moment se može izraziti:

$$M = \frac{P_{meh}}{\omega_r} = \frac{60}{2\pi} \frac{P_{meh}}{n_r}, \quad (56.)$$

Polazeći od izraza za mehaničku snagu iz (54.) i prethodne relacije, dobija se:

$$P_{meh} = 3R_2' \frac{1-s}{s} I_2'^2 = M \omega_r = M \omega_s (1-s) = M \frac{2\pi f_1}{p} (1-s). \quad (57.)$$

Na osnovu prethodnog izraza, formula za elektromagnetni moment glasi:

$$M = \frac{3p}{2\pi f_1} \frac{R_2'}{s} I_2'^2 \quad (58.)$$

Veoma važna karakteristika asinhronih motora je stepen iskorišćenja motora. Čini ga odnos mehaničke i električne snage, odnosno pokazuje koliko je motor energetski efikasan prikazivanjem odnosa snage koju daje na svom vratilu i snage koju uzima iz mreže. Stepenn iskorišćenja dat je relacijom (59.) i izražava se u procentima.

$$\eta_{\%} = \frac{P_{meh}}{P_{el}} 100. \quad (59.)$$

2.5. NESIMETRIČNO NAPAJANJE ASINHRONIH MOTORA

Asinhrona mašine su dizajnirane tako da se napajaju sinusoidalnim i simetričnim naponima. Međutim, u realnim uslovima sistem napona napajanja nije simetričan.

Rad asinhronih motora u uslovima nesimetrije napona napajanja (nesimetrično napajanje), predstavlja nesimetrični režim, pri kojem dolazi do promjene performansi motora sa značajnim negativnim efektima kako za motor tako i za sam sistem napajanja.

Analiza ovih režima vrši se opisanom metodom simetričnih komponenti, sa simetričnim komponentama direktnog i inverznog redosljeda.

Kod asinhronih motora priključenih na trofazni izvor nesimetričnih napona, direktne komponente napona uspostaviće struje direktnog redosljeda u statoru, a one elektromagnetno polje koje rotira u direktnom smjeru. Inverzne komponente napona uzrokovat će statorske struje inverznog redosljeda, koje formiraju elektromagnetno obrtno polje koje rotira u inverznom smjeru. Komponente napona nultog redosljeda ne stvaraju obrtno polje.

Stoga u analizama režima rada asinhronih motora napajanim nesimetričnim sistemom napona, figurišu se simetrični sistem direktnog i sistem inverznog redosljeda, a u skladu sa tim i direktna i inverzna komponenta klizanja [9].

Direktna komponenta klizanja data je izrazom:

$$s_d = \frac{\omega_s - \omega_r}{\omega_s} = s, \quad (60.)$$

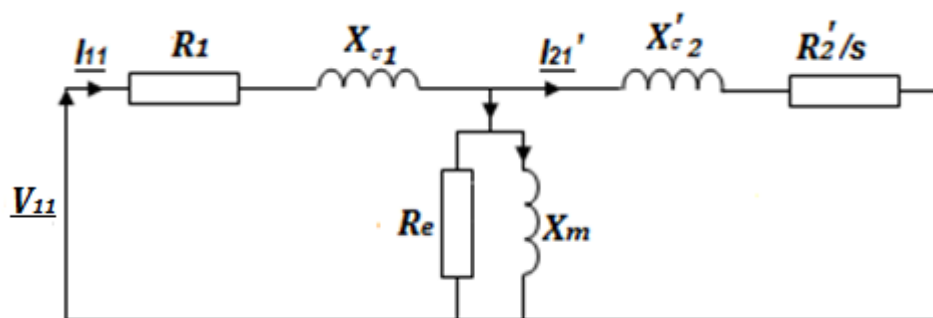
gdje je: ω_s - ugaona brzina direktne komponente obrtnog magnetskog polja i

ω_r - ugaona brzina rotora.

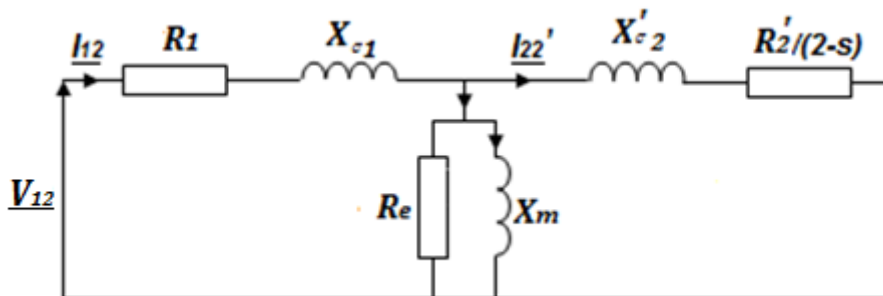
Inverzna komponenta klizanja je:

$$s_i = \frac{-\omega_s - \omega_r}{-\omega_s} = 2 - s, \quad (61.)$$

Polazeći od šeme sa slike 42., dobijaju se ekvivalentne šeme za direktnu i inverznu komponentu faze asinhronog motora kao na slici 45. i slici 46., respektivno [6 i 9].



Slika 45. Direktna komponenta ekvivalentnog kola faze asinhronog motora



Slika 46. Inverzna komponenta ekvivalentnog kola faze asinhronog motora

Posmatrajući prethodne šeme i izraz (58.) dolazi se do zaključka da ukupni elektromagnetni moment čini zbir direktne i inverzne komponente:

$$M = \frac{3p}{2\pi f_1} \frac{R_2' I_{21}'^2}{s} + \frac{3p}{-(2\pi f_1)(2-s)} \frac{R_2' I_{22}'^2}{s}, \quad (62.)$$

gdje su: I_{21}' - direktna komponenta fazne struje rotora svedena na stranu primara i

I_{22}' - inverzna komponenta fazne struje rotora svedena na stranu primara.

Nesimetrija napona izaziva pojavu inverznog momenta koji dovodi do smanjenja polaznog i maksimalnog momenta motora, kao i do izvjesnog povećanja klizanja motora u radu.

Značajan uticaj nesimetrije napona napajanja na rad asinhronih motora je u povećanju gubitaka i smanju stepena iskorišćenja, sa višestrukim negativnim efektima, kao što su povećano zagrijavanje motora, ubrzano starenje izolacije, povećana vjerovatnoća kvara, nepotrebno povećanje potrošnje električne energije zbog smanjenja stepena iskorišćenja i sl.

Radi analize gubitaka, iz izraza (52.) izdvaja se komponenta koja predstavlja Džulove gubitke u faznom namotaju statora:

$$P_{cu1}' = R_1 I_1'^2, \quad (63.)$$

a iz izraza (54.) komponenta koja predstavlja snagu Džulovih gubitaka u faznom namotaju rotora:

$$P_{cu2}' = R_2' I_2'^2, \quad (64.)$$

Ukupni Džulovi gubici čine zbir ove dvije komponente.

Nesimetrični sistem napona napajanja, uzrokuje nesimetrični sistem struja statora, čije vrijednosti u pojedinim fazama mogu biti i značajno iznad nazivnih. S obzirom da su Džulovi gubici u namotajima statora direktno proporcionalni kvadratu struje kroz taj namotaj, zaključuje se da su gubici po fazama neravnomjerni i da u pojedinim fazama mogu biti

značajno povećani. Ovakva raspodjela i povećanje gubitaka predstavlja veoma nepovoljan režim rada asinhronog motora, kako zbog povećanog zagrijavanja i njegovih posljedica tako i zbog moguće pojave "slabih tačaka" koje mogu značajno smanjiti pouzdanost rada motora.

Kao što je rečeno, kod asinhronih motora pojava nesimetrije napona napajanja izaziva izvjesno povećanja klizanja s , što, saglasno izrazu (49.), dovodi do dodatnog povećanja struja rotorskih namotaja. Kako je snaga Džulovih gubitaka u faznim namotajima rotora direktno proporcionalna kvadratu vrijednosti struje kroz te namotaje, zaključuje se da pri pojavi nesimetrije napona napajanja neminovno dolazi do povećanja Džulovih gubitaka u rotoru asinhronih motora.

Pri nesimetričnom napajanju, kao i kod drugih parametara javljaju se direktne i inverzne komponente stepena iskorišćenja. Stoga, umjesto relacije (59.) stepen iskorišćenja motora određen je relacijom [59]:

$$\eta_{\%} = \frac{P_p + P_n}{P_{el}} 100, \quad (65.)$$

gdje su: P_p - direktna komponenta izlazne snage motora,
 P_n - inverzna komponenta izlazne snage motora i
 P_{el} - ukupna ulazna snaga motora.

Direktna komponenta P_p i inverzna komponenta P_n izlazne snage motora predstavljene su relacijama (66.) i (67.):

$$P_p = \frac{3(I_{21}')^2 R_2' (1-s)}{s}, \quad (66.)$$

$$P_n = \frac{3(I_{22}')^2 R_2' (s-1)}{(2-s)}. \quad (67.)$$

Stoga se može zaključiti da nesimetrije u sistema napona napajanja asinhronih motora utiču na smanjenje stepena iskorišćenja motora, tim više što je procenat, odnosno faktor nesimetrije napona veći.

Prethodna razmatranja ukazuju na niz negativnih uticaja nesimetrije napona napajanja, kao jednog od osnovnih pokazatelja kvaliteta električne energije, na rad asinhronih motora. S obzirom na dominantnu zastupljenost ovih potrošača u ukupnoj potrošnji električne energije i uz činjenicu da se pojave nesimetrije napona praktično ne mogu u potpunosti eliminisati, izučavanje problematike uticaja nesimetrije napona na rad asinhronih motora, kojom se bavi ovaj rad, je veoma je značajna i aktuelna.

3. ANALIZA UTICAJA NESIMETRIČNOG NAPAJANJA NA KARAKTERISTIKE ASINHRONIH MOTORA

Shodno postavljenim ciljevima, u ovom radu se istraživanja uticaja nesimetrije napona napajanja na rad asinhronih motora baziraju na simulacionoj metodi i na mjernoj metodi.

3.1. REZULTATI SIMULACIONOG MODELA

Simulacioni metod za analizu uticaja nesimetrija napona na karakteristike rada asinhronih motora obuhvata formiranje simulacionog modela, realizaciju simulacija za definisane varijante napajanja, kao i prikaz i analizu rezultata simulacija.

3.1.1. Karakteristike Simulacionog modela

Simulacioni model za analizu uticaja nesimetrija napona na rad i karakteristike asinhronih motora (u daljem tekstu Simulacioni model) realizovan je u programskom paketu MATLAB/Simulink.

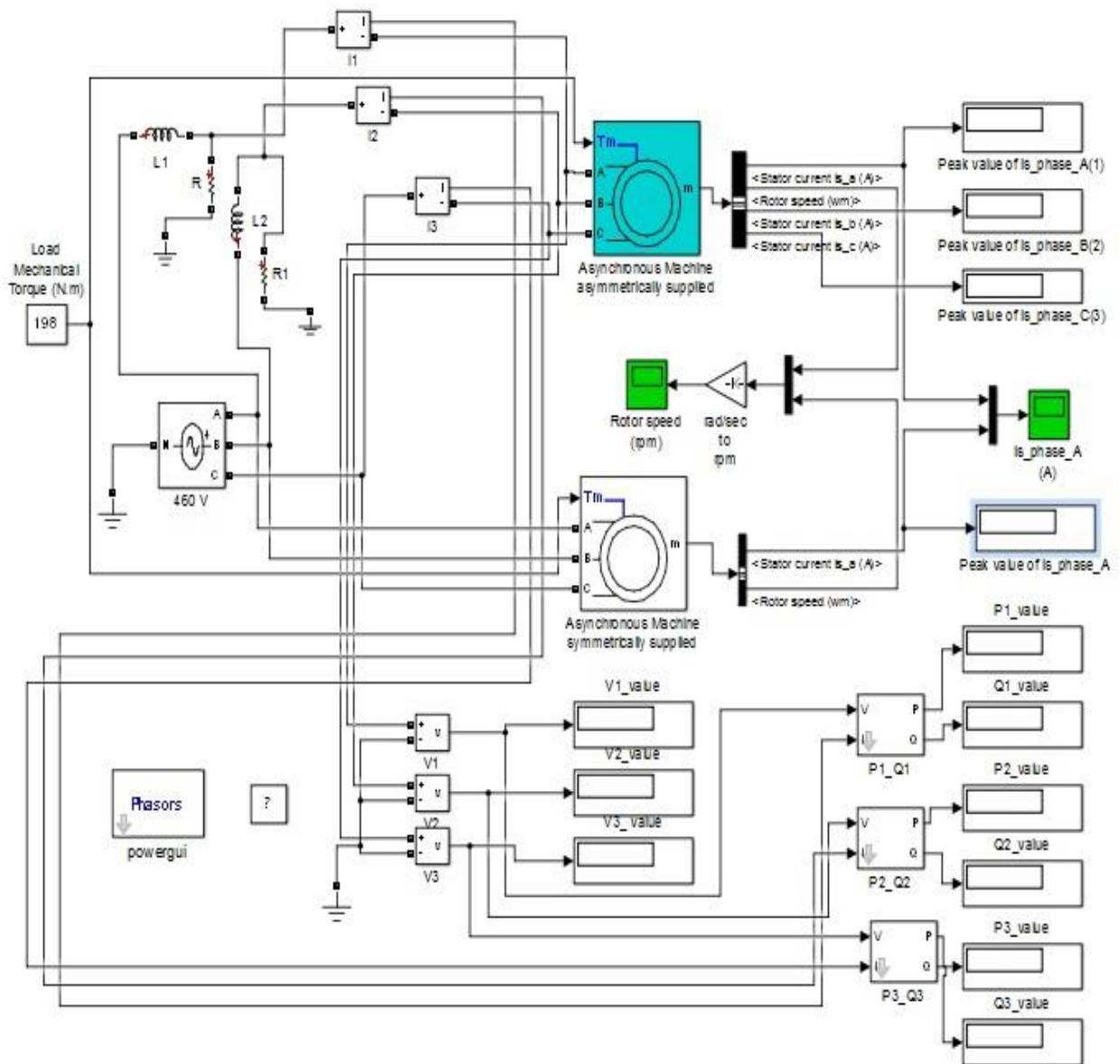
Šema kompletnog Simulacionog modela prikazana je na *slici 47*.

Model sadrži dva osnovna bloka. Glavi blok (gornji dio šeme) sa asinhronim motorom napajanim nesimetričnim sistemom napona (nesimetrično napajanje) i blok sa asinhronim motorom istih karakteristika napajanim trofaznim simetričnim sistemom napona (simetrično napajanje). Takva realizacija Simulacionog modela omogućava direktno poređenje analiziranih nesimetričnih režima sa režimom rada asinhronog motora u uslovima simetričnog napajanja.

U realizovanom simulacionom modelu, nesimetrija napona napajanja se ostvaruje dodavanjem kalemova određene vrijednosti induktivnosti u pojedine faze napajanja, zavisno od nivoa nesimetrije koji se želi postići. Ostvareni nivo naponske nesimetrije se izražava preko faktora nesimetrije napona **PVUR1 %** (u daljem tekstu dat kao **PVU**).

Vrijednosti faktora nesimetrije napona izračunavaju se na osnovu poznatih vrijednosti faznih napona. Ovdje su to vrijednosti dobijene "mjerenjem" u okviru simulacije režima nesimetričnog napajanja asinhronog motora. Na primjer, za varijantu simulacije u kojoj su "izmjerene" vrijednosti faznih napona: $V_a = 245.1 \text{ V}$, $V_b = 250.7 \text{ V}$ i $V_c = 265.6 \text{ V}$, vrijednost faktora nesimetrije napona je:

$PVU = ((265.6 - 253.8)/253.8)100 = 4.648\%$, gdje je 253.8 V izračunata srednja vrijednost faznih napona.



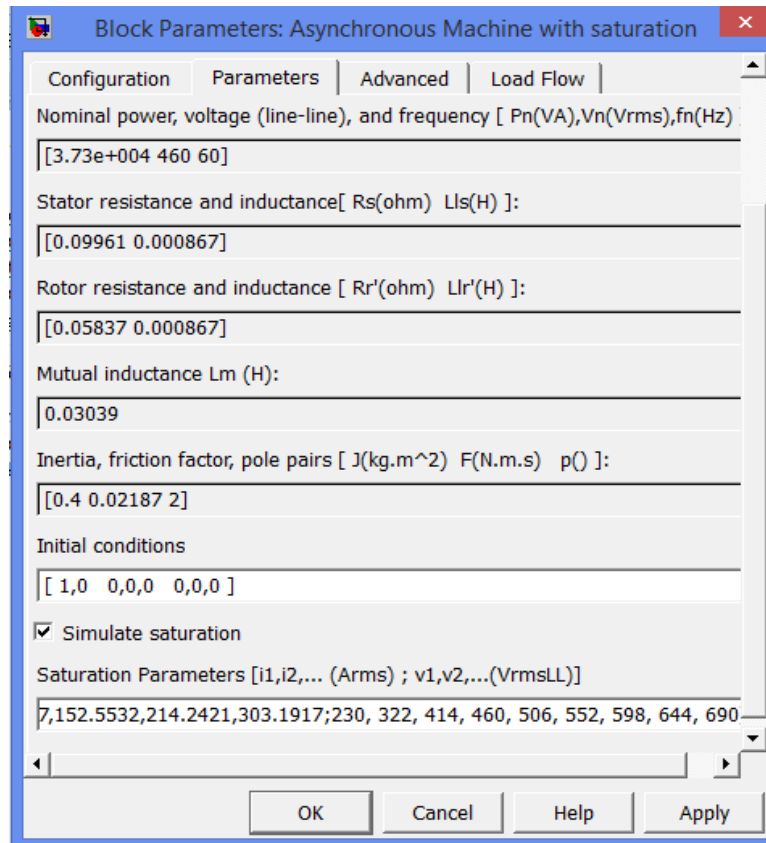
Three-Phase Asynchronous Machine

Slika 47. Simulacioni model simetrično i nesimetrično napajanog asinhronog motora

U sklopu Simulacionog modela je adekvatnim postavljanjem i vezivanjem “elemenata mjerne opreme”, omogućeno mjerenje: faznih vrijednosti napona i struja, snaga sve tri faze, momenta i brzine ostvarene na vratilu. Na osnovu ovih parametara moguće je izračunati ostale važne parametre motora, npr. klizanje s , gubitke, stepen iskorišćenja i dr., kao i nivo naponske nesimetrije, odnosno vrijednost faktora nesimetrije napona PVU .

Primjenom odgovarajućeg modela motora i unošenjem podataka o motoru (ulazni podaci), Simulacioni model omogućava ispitivanja za različite vrste i veličine asinhronih motora, kao i za različite režime opterećenja.

Podaci o motoru se prikazuju u obliku kao na slici 48.



Slika 48. Parametri ispitivanog modela asinhronog motora

Na slici 48. su upisani podaci za motor koji je korišćen pri simulaciji i za koji je u radu izvršena detaljna analiza uticaja nesimetrije napona napajanja na njegove karakteristike.

3.1.2. Rezultati simulacija

Za simulaciju uticaja nesimetrije napona napajanja na rad i karakteristike asinhronih motora, u radu je korišćen model trofaznog asinhronog motora spregnutog u zvijezdu, nazivne snage 37.3 kVA, rotora kaveznog tipa, nazivnog napona 460 V i frekvencije 60 Hz sa mogućnošću simulacije zasićenja. Podaci o motoru prikazani su na slici 48.

Važno je istaći da su sve simulacije realizovane za režim nominalnog opterećenja motora!

Pomoću Simulacionog modela, za asinhroni motor navedenih karakteristika, realizovan je niz simulacija režima rada nominalno opterećenog motora u uslovima nesimetričnog napajanja.

Razmatrane su sljedeće varijante nesimetričnog napajanja:

1. nesimetrično napajanje, uzrokovano **dodatim kalemom induktivnosti 1mH u prvoj fazi**, $PVU1=2.184\%$;
2. nesimetrično napajanje, uzrokovano **dodatim kalemom induktivnosti 2mH u prvoj fazi**, $PVU2=3.797\%$;
3. nesimetrično napajanje, uzrokovano **dodatim kalemom induktivnosti 3mH u prvoj fazi**, $PVU3=5.032\%$;
4. nesimetrično napajanje, uzrokovano **dodatim kalemovima induktivnosti 1mH u prvoj i drugoj fazi**, $PVU4=4.648\%$.

U skladu sa strukturom Simulacionog modela, uz svaku varijantu nesimetričnog napajanja, simulira se i režim rada posmatranog asinhronog motora pri nominalnom opterećenju i simetričnom sistemu napona napajanja. Simetrično napajanje je osnovni režim, za koji se praktično motori projektuju i koji sa aspekta napajanja obezbjeđuje optimalne uslove rada motora.

Kao rezultat simulacija dobijene su vrijednosti faznih struja statora i snaga (električne snage), na osnovu kojih su realizovane I/U karakteristika i P/U karakteristika motora za sve definisane varijante napajanja:

0. simetrično napajanje ($PVU0=0\%$), *slike 49. i 50.*
1. nesimetrično napajanje $PVU1=2.184\%$, *slike 51. i 52.*
2. nesimetrično napajanje $PVU2=3.797\%$, *slike 53. i 54.*
3. nesimetrično napajanje $PVU3=5.032\%$, *slike 55. i 56.*
4. nesimetrično napajanje $PVU4=4.648\%$, *slike 57. i 58.*

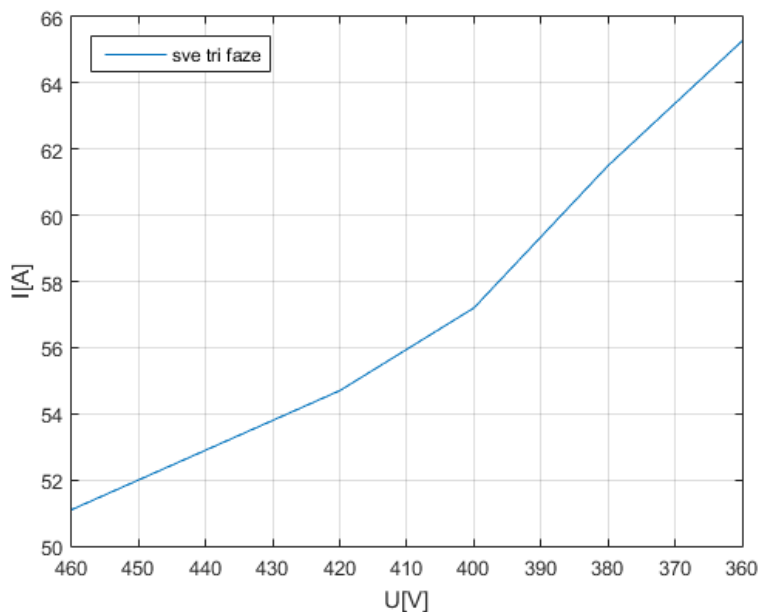
Vrijednost napona (napon "idealnog izvora", ispred priključenih kalemova kao uzroka nesimetrije napona) varirana je od nazivne vrijednosti napona motora (460 V) do najnižih vrijednosti napona pri kojima je bilo moguće ostvariti nominalni režim opterećenja motora u uslovima nesimetričnog napajanja. Pri najnižem nivou nesimetrije to je vrijednost 360 V ($78\% U_n$), a za najveću nesimetriju 420 V ($91\% U_n$).

Realizovani grafici, pored praćenja uticaja nesimetrije napona na strujno opterećenje faza statora i električnu snagu asinhronog motora, omogućavaju i sagledavanje uticaja sniženja napona, odnosno odstupanja napona kao veoma uticajnog parametra kvaliteta električne energije, na ove parametre.

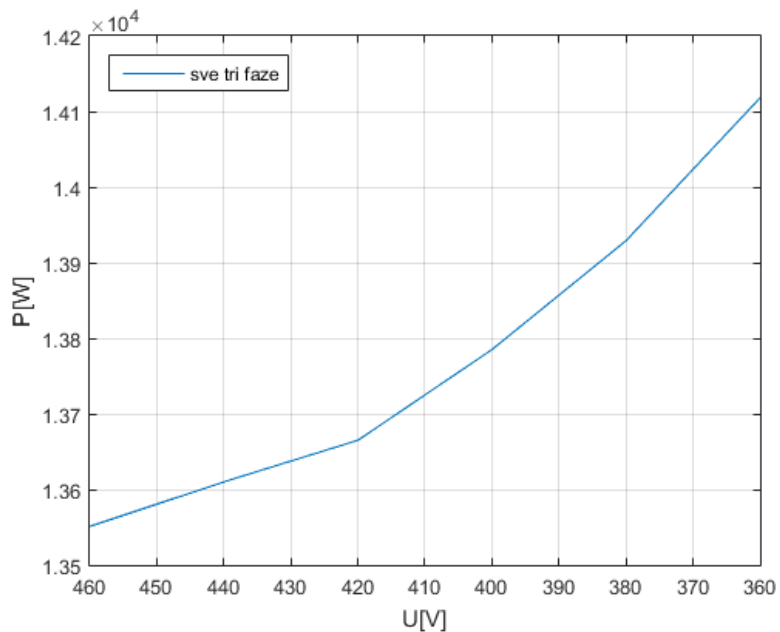
Slike 49. i 50. se odnose na režim simetričnog napajanja. U ovom slučaju "idealni izvor", sa čistim sinusoidalnim simetričnim trofaznim sistemom napona, vrijednosti linijskih napona U i faznih pomjeraja 120° , direktno napaja asinhroni motor u režimu nominalnog opterećenja.

Prikazani grafici pokazuju da se pri idealnom simetričnom napajanju nominalno opterećenog asinhronog motora, struje i snage raspoređuju po fazama statora potpuno ravnomjerno. Evidentan je porast analiziranih veličina pri sniženju napona. Konkretno, npr. pri sniženju napona za 10%, porast struja iznosi 7.4%, a povećanje snaga 0.9%. Za sniženje

napona 5%, što predstavlja donju granicu intervala dozvoljenog odstupanja napona, te vrijednosti iznose 3.5% i 0.4%.

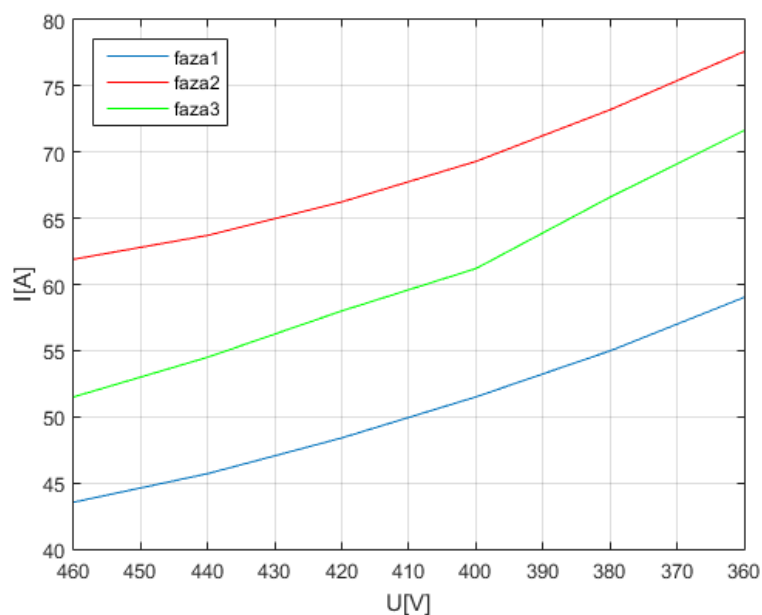


Slika 49. Fazne struje statora u funkciji napona, simetrično napajanje

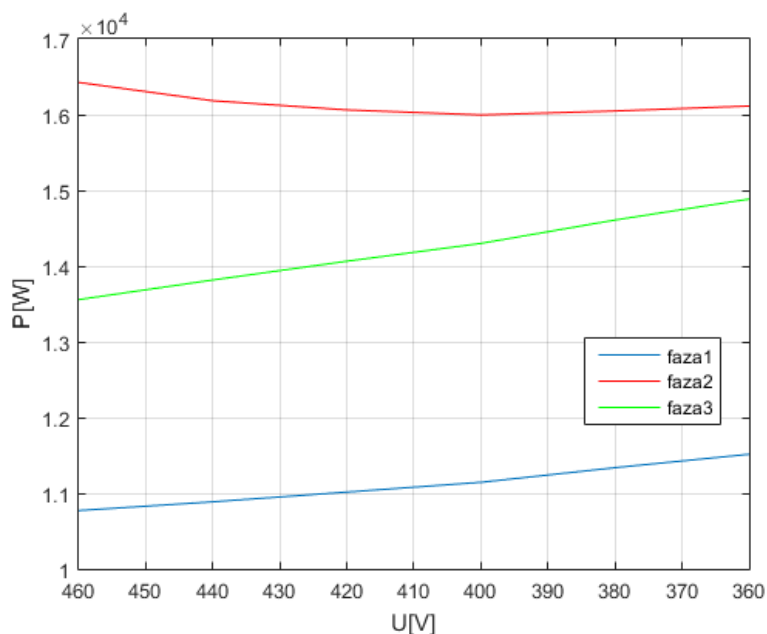


Slika 50. Snaga faza u funkciji napona, simetrično napajanje

Grafici na slikama 51.-58. se odnose na definisane varijante nesimetričnog napajanja. Nesimetrično napajanje uzrokuje nesimetričnu raspodjelu struja i snaga po fazama statora.



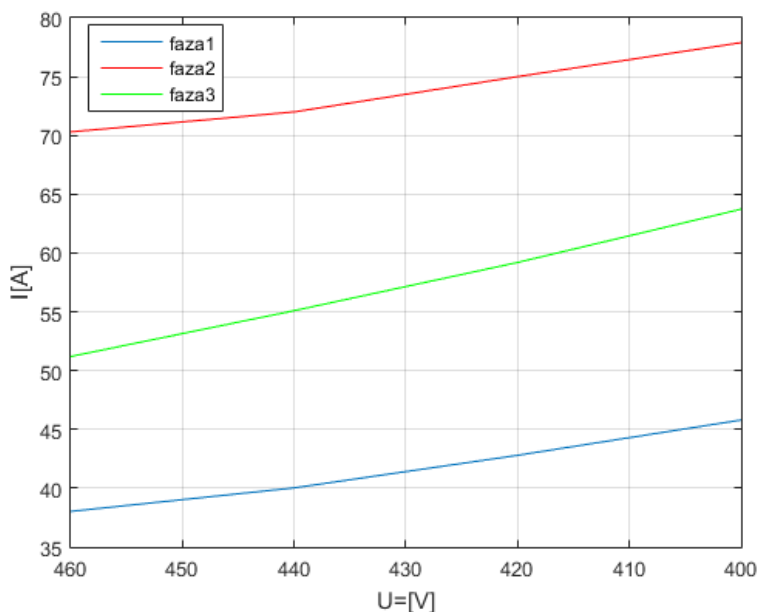
Slika 51. Fazne struje statora u funkciji napona, PVU1=2.184%



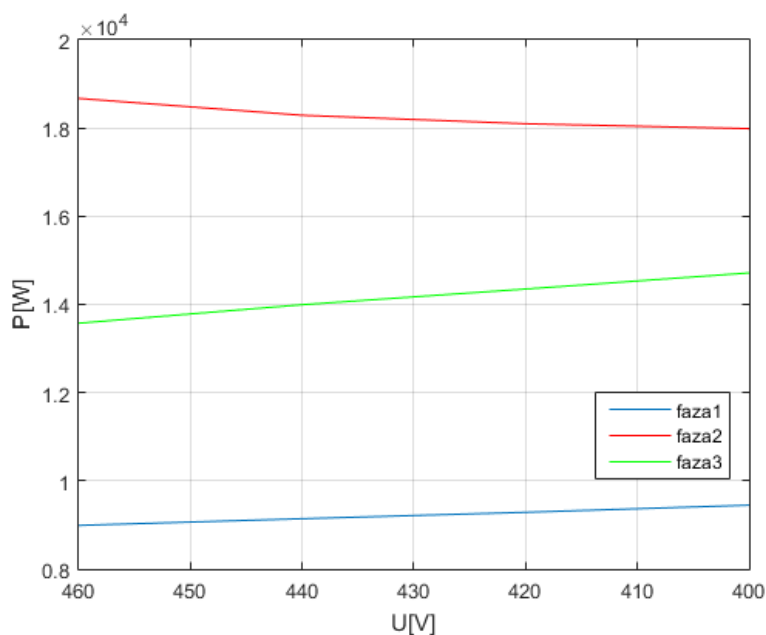
Slika 52. Snage faza u funkciji napona, PVU1=2.184%

U varijanti 1 nesimetričnog napajanja (slike 51. i 52.), sa najnižim nivoom nesimetrije, pri naponu "izvora napajanja" jednakom nazivnom naponu motora, razlika između struja najopterećenije i najmanje opterećene faze je 42.2%, dok je razlika u vrijednostima snaga 52.5%. Ukupna električna snaga (angažovana snaga) motora iznosi 40753 W. Pri nazivnom naponu, strujno preopterećenje najopterećenije faze iznosi 21.1%. Pri sniženom naponu

napajanja za 5% preopterećenje je 23.5%, a pri 10% nižem naponu iznosi 29.8%. Pri sniženju napona napajanja, porast vrijednosti struja sve tri faze je približno isti.



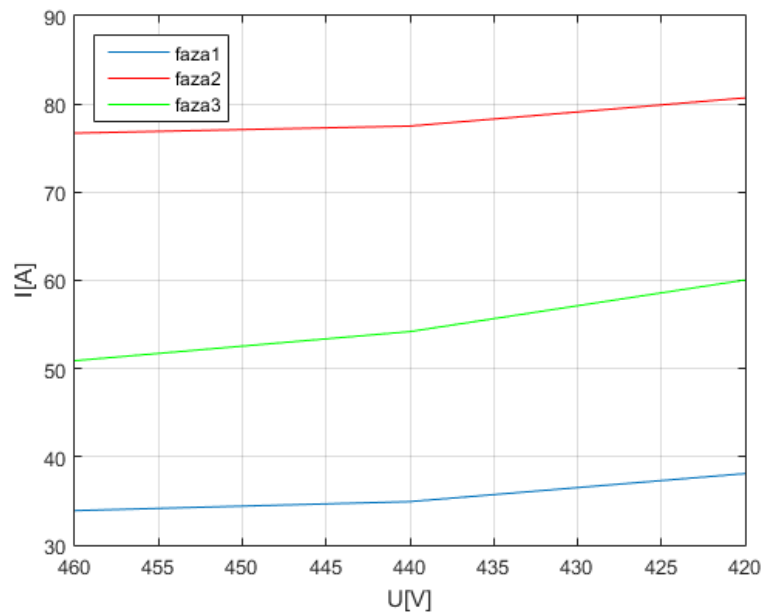
Slika 53. Fazne struje statora u funkciji napona, PVU2=3.797%



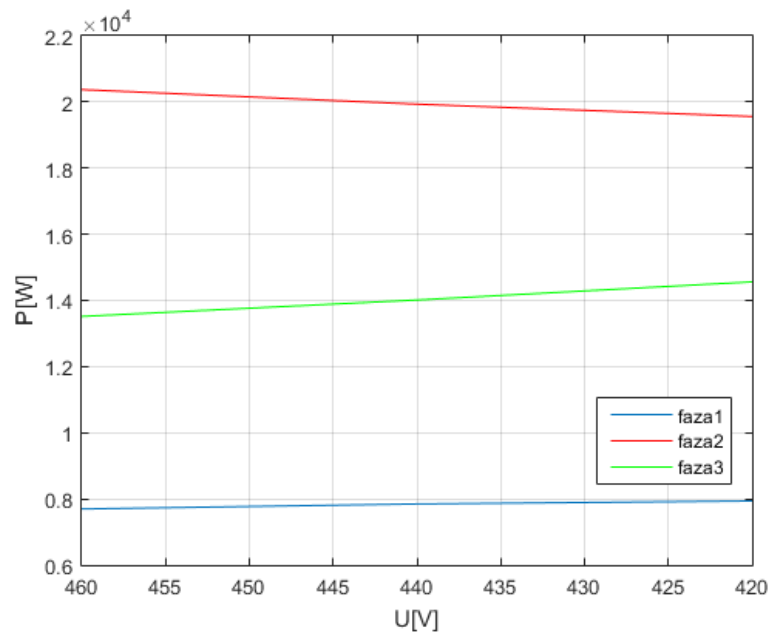
Slika 54. Snage faza u funkciji napona, PVU2=3.797%

U varijanti 2 nesimetričnog napajanja (slike 53. i 54.), kod koje imamo povećanje nivoa nesimetrije, pri nazivnom naponu razlika između struja najopterećenije i najmanje opterećene faze je 84.9%, a razlika snaga iznosi 100.1%, dakle razlike su izraženije nego u prvoj varijanti. Ukupna angažovana snaga u ovom slučaju iznosi 41424 W. Pri nazivnom

naponu, strujno preopterećenje najopterećenije faze je 37.6%. Pri sniženju napona napajanja za 5% preopterećenje iznosi 40.9%, a pri 10% nižem naponu 46.8%.



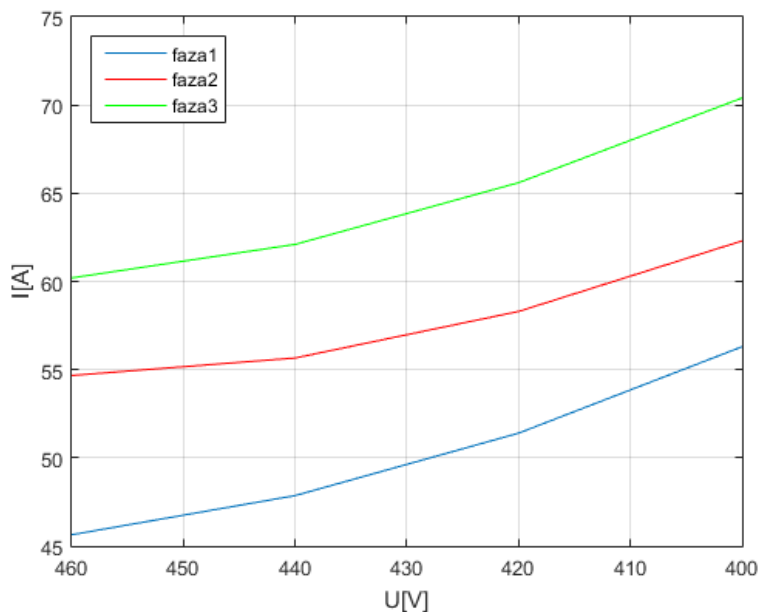
Slika 55. Fazne struje statora u funkciji napona, PVU3=5.032%



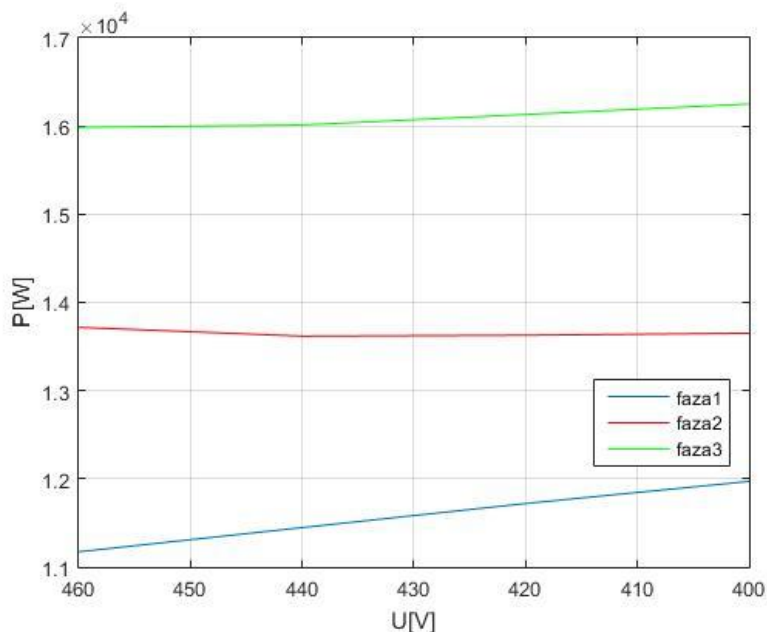
Slika 56. Snage faza u funkciji napona, PVU3=5.032%

U varijanti 3 (slike 55. i 56.) u kojoj imamo isti tip nesimetrije kao u varijantama 1 i 2, ali je vrijednost faktora nesimetrije PVU znatno veća, imamo i značajnije povećanje nesimetrije u raspodjeli struja i snaga po fazama statora. Ovdje je, pri nazivnom naponu, razlika između struja najopterećenije i najmanje opterećene faze 126.3%, a razlika snaga je 164.8%.

Ukupna angažovana snaga iznosi 41584 W. Strujno preopterećenje najopterećenije faze pri nazivnom naponu iznosi 50.1%, pri 5% nižem naponu je 53.7%, a pri 10% nižem naponu napajanja i ovom nivou nesimetrije preopterećenje je 57.9%.



Slika 57. Fazne struje statora u funkciji napona, PVU4=4.648%



Slika 58. Snage faza u funkciji napona, PVU4=4.648%

Tip nesimetrije u varijanti 4 (slike 57. i 58.) je drugačiji nego u prethodnim varijantama, pa je i nesimetričnost raspodjele struja i snaga po fazama statora drugačija. Evidentno je preopterećenje dvije faze. Pri nazivnom naponu ona iznose 7% i 17.8%, pri 5% nižem

naponu 10.8% i 23.4%, a pri 10% nižem naponu napajanja su 16.1% i 30.4%. Ovdje je, pri nazivnom naponu, razlika između struja najopterećenije i najmanje opterećene faze 21.4%, dok je razlika u vrijednostima snaga 40.1%. Vrijednost ukupne angažovane snage je 40874 W.

Na osnovu prikazanih rezultata simulacije, mogu se formirati neki važni opšti stavovi o uticaju nesimetrije napona napajanja na struje statora i angažovanu (električnu) snagu asinhronih motora.

Pri simetričnom napajanju, raspodjela struja i snaga po fazama je simetrična. Sniženje vrijednosti napona napajanja uzrokuje povećanje vrijednosti struja, a time i gubitaka, što dalje za posljedicu ima povećanje zagrijavanja motora i u krajnjem sniženje životnog vijeka. Takođe, povećava se i snaga koju motor angažuje iz mreže, a time i potrošnja električne energije, što u principu uzrokuje negativne finansijske efekte.

Nesimetrično napajanje asinhronih motora uzrokuje nesimetričnu raspodjelu struja i snaga u fazama statora motora. Karakteristike i vrijednosti te nesimetričnosti prvenstveno zavise od tipa i nivoa nesimetrije napona napajanja. Uticaj takođe imaju i karakteristike, veličina i režim opterećenja motora.

Sa povećanjem nivoa nesimetrije napona, odnosno vrijednosti faktora nesimetrije (konkretno faktora *PVU*), razlike u strujnom opterećenju faza se povećavaju, kao i vrijednosti strujnih preopterećenja. Takođe se povećava nesimetričnost raspodjele snaga po fazama, opterećenja pojedinih faza, kao i ukupna angažovana snaga.

Sniženje vrijednosti napona napajanja i pri nesimetričnom napajanju uzrokuje povećanje struja statora, pri čemu su ta povećanja nešto blaža nego kod simetričnog napajanja.

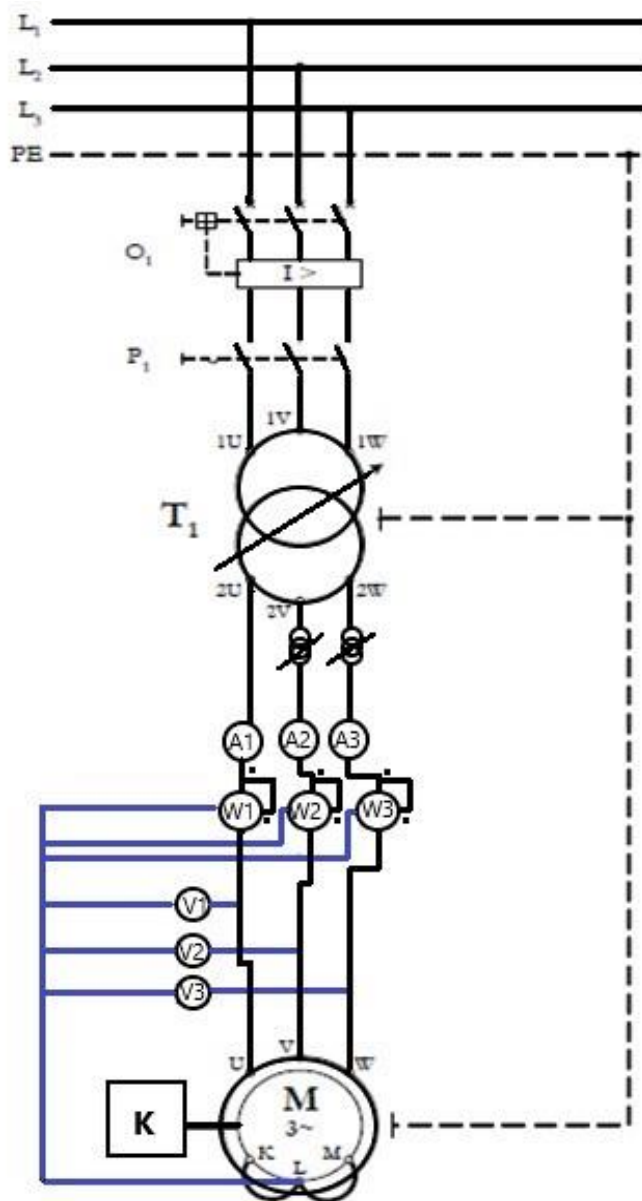
3.2. REZULTATI EKSPERIMENTA

Mjerne metode za analizu uticaja nesimetričnog napajanja na karakteristike rada asinhronih motora mogu se realizovati mjerenjima na konkretnim asinhronim motorima u pogonu, ili kroz eksperimentalna mjerenja. Metoda korišćena u ovom radu bazirana je na eksperimentu formiranom u laboratorijskim uslovima, Elektrotehničkog fakulteta Univerziteta „La Sapienza” (Dipartimento di Ingegneria Astronautica, Elettrica ed Energetica). Eksperiment obuhvata: formiranje fizičkog modela na osnovu postavljene šeme veze i odabrane opreme, realizaciju mjerenja, prikaz mjernih podataka i analizu rezultata.

3.2.1. Šema veze

Šema veza, prema kojoj je vršen eksperiment, je prikazana na *slici 59*. Na šemi je trofazni četvorožični sistem mrežnog napajanja označen sa *L1*, *L2*, *L3* i *PE*. Priključenje na mrežno

napajanje izvršeno je preko regulacionog transformatora T_1 , koji omogućava promjenu vrijednosti mrežnog napona, i odgovarajućeg sistema zaštite $O_1, I>, P_1$ za zaštitu od nedozvoljenih preopterećenja izazvanih tokom eksperimenta. Šematskim prikazom na slici 59., jasno su istaknuti mjerni instrumenti, kalemovi kojim se izaziva nesimetrija, kao i elektromagnetna kočnica K spojena na vratilo motora.

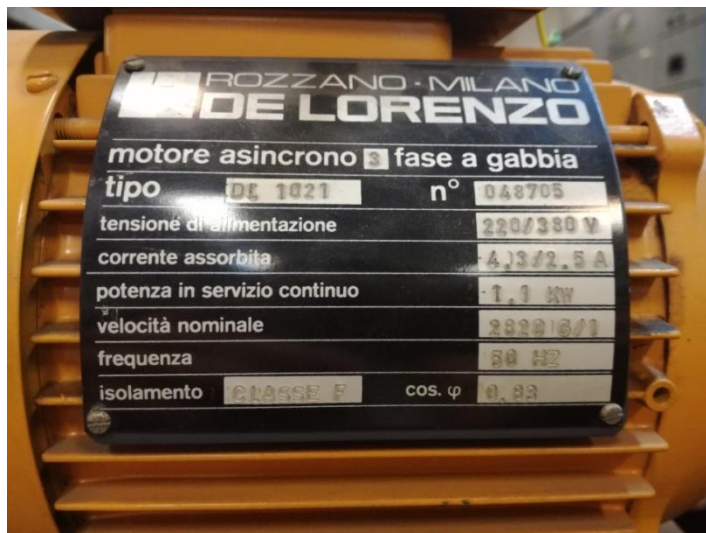


Slika 59. Šema sprovedenog eksperimenta

Postavljena mjerna oprema omogućava mjerenja napona, struja i snaga faza statora, ukupne električne snage koju motor vuče iz mreže (angažovana snaga motora) kao i snage ostvarene na vratilu motora.

3.2.2. Oprema

Za sprovedeni eksperiment korišćen je trofazni asinhroni motor, čija je pločica sa podacima prikazana na slici 60.



Slika 60. Natpisna pločica asinhronog motora korišćenog u eksperimentu

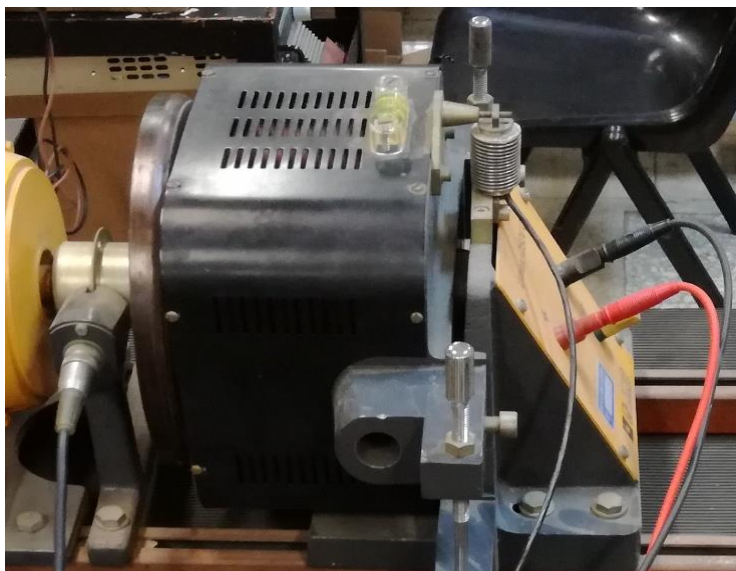
Nazivna snaga motora je 1.1 kW, nazivni napon 380/220 V, brzine 2820 obr/min, faktora snage 0.83, pri frekvenciji 50Hz i sprezi zvijezda, čiji se način priključivanja može vidjeti na slici 61.



Slika 61. Povezivanje asinhronog motora spregnutog u zvijezdu

Opterećenje na osovini realizovano je pomoću elektromagnetne kočnice (slika 62.) koja radi na principu indukovanih struja (*Eddy currents*), gdje se javlja mogućnost primjene

željenog momenta. Prilagođavanjem određene vrijednosti momenta u odnosu na brzinu okretanja vratila, prema relaciji (55.) može se dobiti željeno opterećenje, odnosno snaga na vratilu motora.



Slika 62. Elektromagnetna kočnica

Fotografija univerzalnog instrumenta korišćenog za mjerenja, prikazana je na slici 63.



Slika 63. Univerzalni instrument

Sto za testiranje sa svom potrebnom, međusobno povezanom opremom i uređajima za realizaciju eksperimenta prikazan je na slici 64.



Slika 64. Testni sto za izvođenje eksperimenta

3.2.3. Rezultati eksperimentalnih mjerenja

Na opisanom eksperimentalnom modelu, izvršen je niz mjerenja karakteristika rada motora u uslovima nesimetričnog napajanja.

Nesimetrija napona napajanja, odnosno naponska nesimetrija statora je vještački izazivana dodavanjem kalema u jednu fazu ili u dvije faze napojne mreže. Sa povećanjem induktivnosti kalema, raste pad napona na induktivnoj otpornosti, odnosno povećava se nesimetrija u naponu napajanja. Za indikator nivoa nesimetrije napona korišćen je, kao i kod simulacija, faktor nesimetrije PVU , sa vrijednostima izraženim u procentima.

Pored osnovne varijante simetričnog napajanja ("varijanta 0"), u okviru eksperimenta su realizovane sljedeće varijante nesimetričnog napajanja:

1. nesimetrično napajanje, uzrokovano **dodatim kalemom induktivnosti 16mH u trećoj fazi** napajanja, $PVU1=2.17\%$;
2. nesimetrično napajanje, uzrokovano **dodatim kalemom induktivnosti 32 mH u trećoj fazi** napajanja, $PVU2=4.32\%$;
3. nesimetrično napajanje, uzrokovano **dodatim kalemom induktivnosti 48 mH u trećoj fazi** napajanja, $PVU3=6.12\%$;
4. nesimetrično napajanje, uzrokovano **dodatim kalemom induktivnosti 32mH u trećoj fazi i 16mH u drugoj fazi** napajanja, $PVU4=2.79\%$.

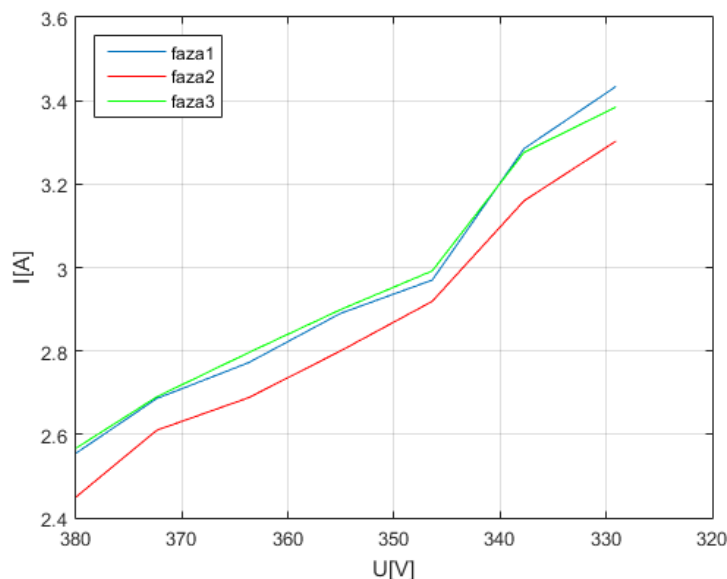
Važno je istaći da su sva mjerenja realizovana za režim nominalnog opterećenja motora!

Mjerenjima na postavljenom eksperimentalnom modelu, dobijene su vrijednosti faznih struja statora i snage (električne) motora, na osnovu kojih su formirane I/U i P/U karakteristike motora za sve definisane varijante napajanja:

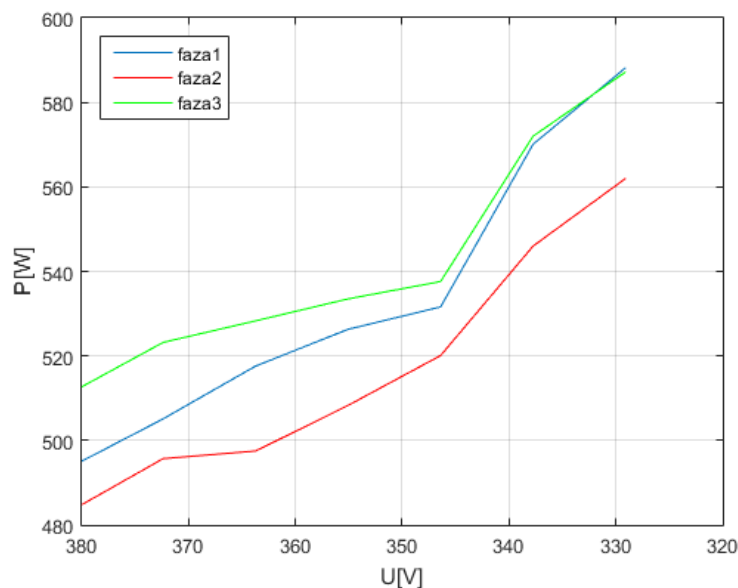
0. simetrično napajanje ($PVU0=0\%$), *slike 65 i 66.*
1. nesimetrično napajanje $PVU1=2.17\%$, *slike 67. i 68.*
2. nesimetrično napajanje $PVU2=4.32\%$, *slike 69. i 70.*
3. nesimetrično napajanje $PVU3=6.12\%$, *slike 71. i 72.*
4. nesimetrično napajanje $PVU4=2.79\%$, *slike 73. i 74.*

Za formiranje I/U i P/U karakteristika, pomoću regulacionog transformatora su varirane vrijednost mrežnog napona (napon ispred priključenih kalemova kao izvora nesimetrije napona), od nazivne vrijednosti napona motora (380 V) do najnižih vrijednosti napona pri kojima je bilo moguće ostvariti nominalni režim opterećenja motora u uslovima nesimetričnog napajanja. Za niže nivoe nesimetrije to je vrijednost 329 V (86.6% U_n), a za najveću nesimetriju 355 V (93.4% U_n). Formirani grafici, pored praćenja uticaja nesimetrije napona na strujno opterećenje i snagu asinhronog motora, omogućavaju i sagledavanje uticaja sniženja vrijednosti napona, odnosno odstupanja napona na ove parametre.

Slike 65. i 66. odnose se na režim rada nominalno opterećenog asinhronog motora napajanog direktno iz mreže. Ovu varijantu napajanja definisali smo kao "simetrično napajanje", iako mrežni naponi najčešće ne odgovaraju uslovima idealnog simetričnog napajanja, što je i ovdje slučaj.



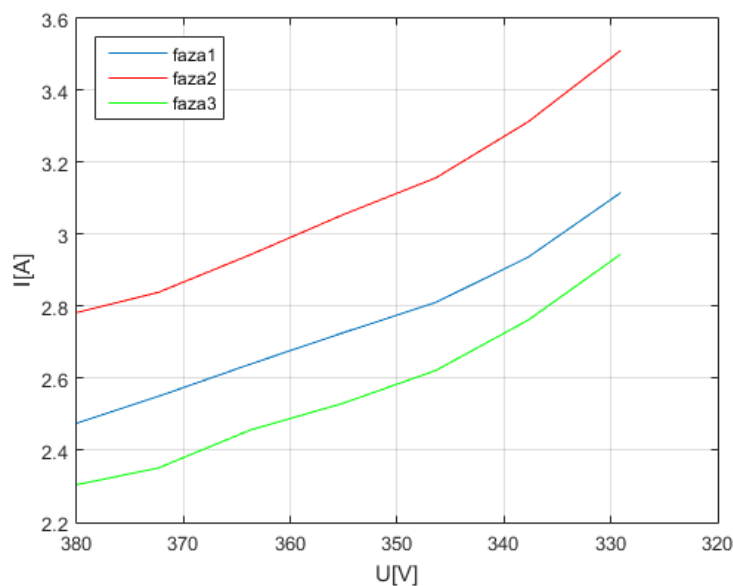
Slika 65. Fazne struje statora u funkciji napona, "simetrično napajanje"



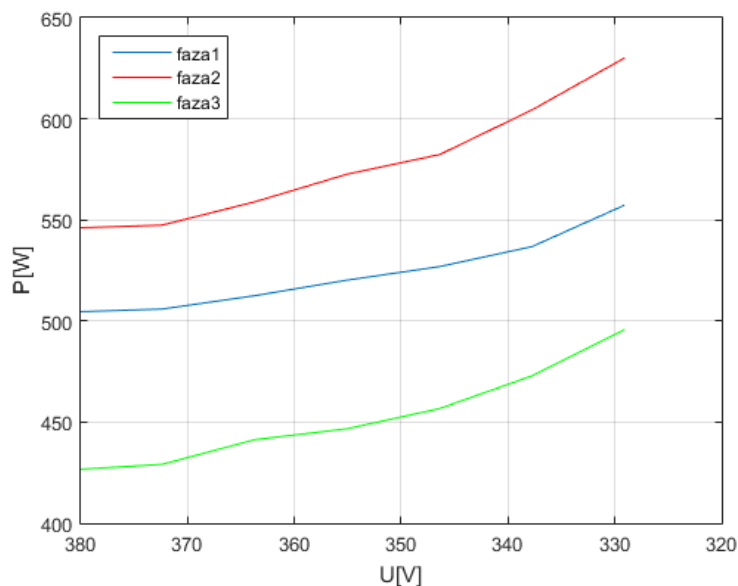
Slika 66. Snage faza u funkciji napona, "simetrično napajanje"

Zbog realno prisutne nesimetrije u mrežnom naponu, ili pak prisustva drugih deformacija napona, npr. viših harmonika, raspodjela struja i snaga po fazama statora asinhronog motora nije apsolutno simetrična. Kao i u slučaju simulacija, evidentno je povećanje struja statora i snaga sa sniženjem napona. Na primjer, pri sniženju napona za 10%, povećanja struja i snaga (srednje vrijednosti) iznose 13.5% i 5.2%, respektivno. Za sniženje napona 5%, te vrijednosti iznose 9.1% i 3.4%.

Grafici na slikama (67.-74.) se odnose na definisane varijante nesimetričnog napajanja. Nesimetrično napajanje uzrokuje nesimetričnu raspodjelu struja i snaga po fazama statora.

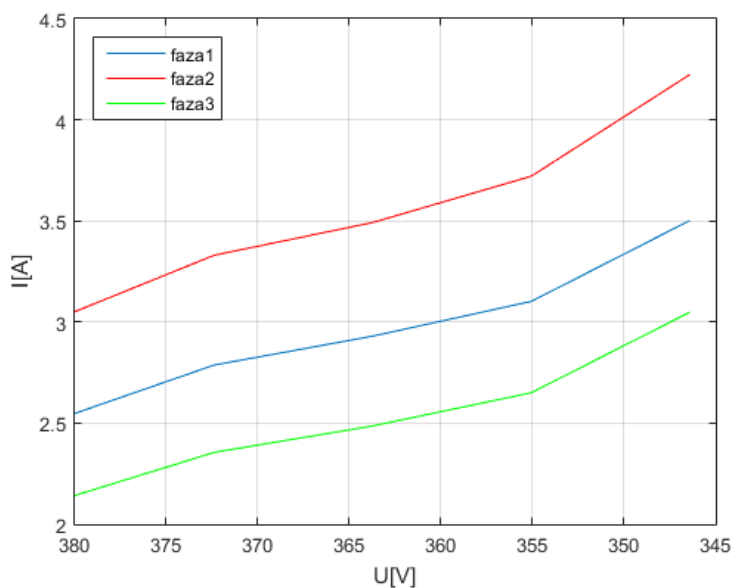


Slika 67. Fazne struje statora u funkciji napona, PVU1=2.17%

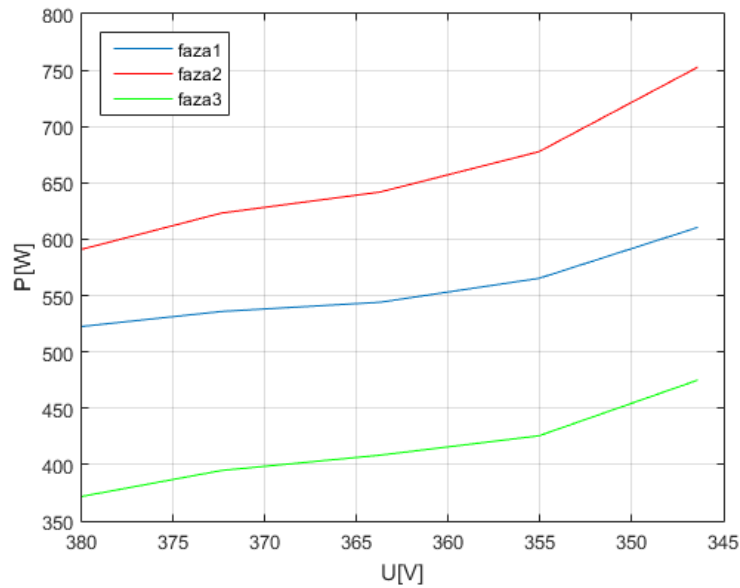


Slika 68. Snage faza u funkciji napona, PVU1=2.17%

U varijanti 1 nesimetričnog napajanja sa najnižim nivoom nesimetrije (slike 67. i 68.), pri mrežnom naponu jednakom nazivnom naponu motora, razlika između struja najopterećenije i najmanje opterećene faze je 20.8%, dok je razlika u vrijednostima snaga 27.9%. Ukupna angažovana snaga je 1477.4 W. Pri nazivnom naponu, strujno preopterećenje najopterećenije faze je 10.3%, pri 5% nižem naponu je 16.7%, a pri 10% nižem naponu ono iznosi 21.1%. Pri sniženju napona, porast vrijednosti struja sve tri faze je približno isti.

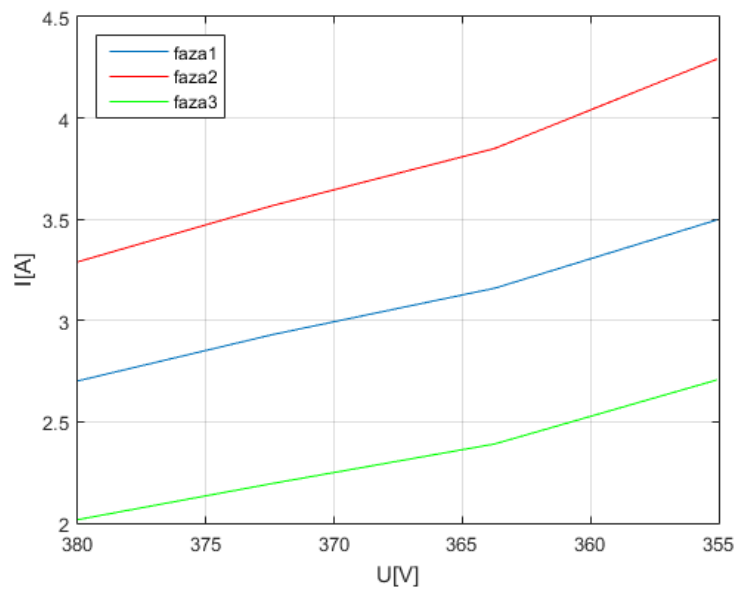


Slika 69. Fazne struje statora u funkciji napona, PVU2=4.32%

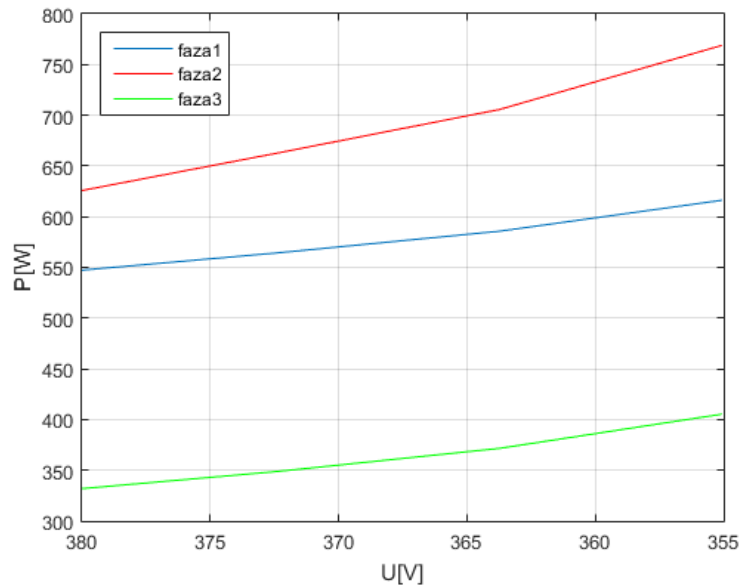


Slika 70. Snage faza u funkciji napona, PVU2=4.32%

U varijanti 2 nesimetričnog napajanja (slike 69. i 70.), sa dvostruko većom vrijednošću faktora nesimetrije, pri nazivnom naponu razlika između struja najopterećenije i najmanje opterećene faze je 42.5%, a razlika snaga je 59%. Ukupna angažovana snaga u ovom slučaju je 1485.5 W. Pri nazivnom naponu, strujno preopterećenje najopterećenije faze je 20.9%, pri 5% nižem naponu je 38.4%, a pri 10% nižem naponu ono iznosi 47.5%.

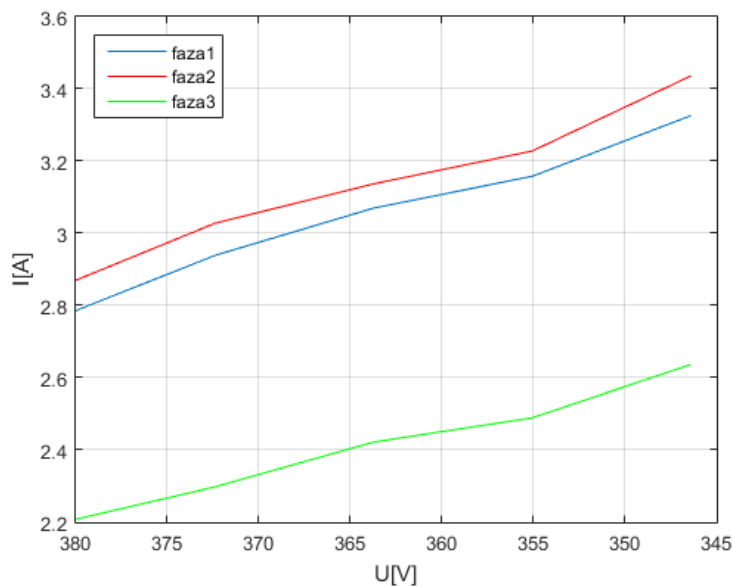


Slika 71. Fazne struje statora u funkciji napona, PVU3=6.12%

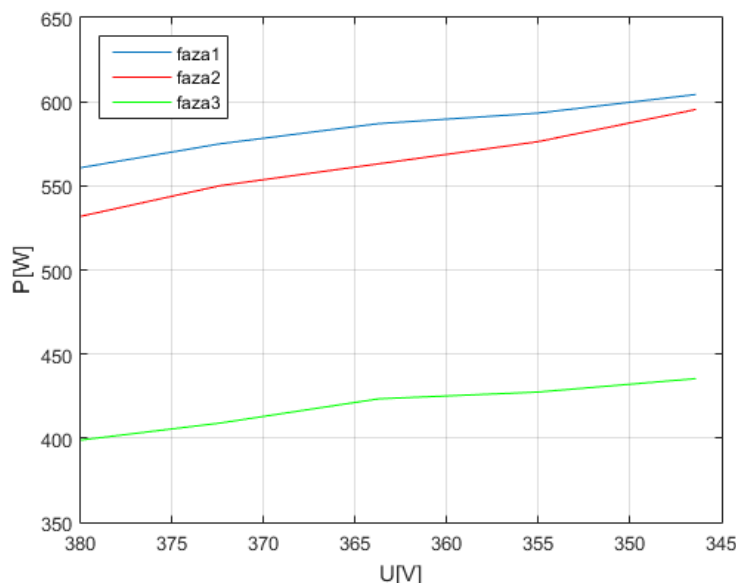


Slika 72. Snage faza u funkciji napona, PVU3=6.12%

U varijanti 3 (slike 71. i 72.), sa najvećim faktorom nesimetrije, javlja se najizraženija nesimetričnost u raspodjeli struja i snaga po fazama. Ovdje je pri nazivnom naponu, razlika između struja najopterećenije i najmanje opterećene faze 63.2%, a između snaga 88.5%. Ukupna angažovana snaga iznosi 1505 W i veća je nego u prethodnim varijantama. U odnosu na nazivnu snagu to povećanje iznosi 3.8%. U ovoj varijanti su i preopterećenja najveća. Pri nazivnom naponu, strujno preopterećenje najopterećenije faze iznosi 27.2%, a povećanje snage 25.8%. Pri 5% nižem naponu te vrijednosti su 52.6% i 41.9%, dok pri 10% nižem naponu one iznose 70% i 54.6%, respektivno.



Slika 73. Fazne struje statora u funkciji napona, PVU4=2.79%



Slika 74. Snage faza u funkciji napona, PVU4=2.79%

U varijanti 4 imamo drugi tip nesimetrije napona napajanja u odnosu na prethodne varijante, pa je i drugačija nesimetrija struja statora i angažovane snage motora (slike 73. i 74.). Ovdje su evidentna preopterećenja dvije faze. Pri nazivnom naponu strujna preopterećenja ovih faza iznose 10.4% i 13.8%, a povećanja snaga 12.7% i 7%. Pri 10% nižem naponu ta strujna preopterećenja su 25.2% i 27.9%, a kod snaga 19.3% i 15.9%. Ukupna angažovana snaga je 1491.6 W.

Opšti zaključci o uticaju nesimetrije napona napajanja na struje statora i angažovanu (električnu) snagu motora, koji se mogu formirati na osnovu prikazanih rezultata eksperimentalnih mjerenja, praktično su identični onima datim u okviru rezultata simulacija.

Prisutne razlike u rezultatima, odraz su razlika i specifičnosti formiranih modela, kao što su npr.: razlike u izvoru napajanja ("idealni izvor" izvor kod Simulacionog modela, realna mreža kod Eksperimenta), različite karakteristike i veličine (snage) motora, moguće greške pri eksperimentalnim mjerenjima i sl., a sa aspekta dobijenih vrijednosti, prije svega razlike u vrsti i veličini motora.

3.3. ANALIZA I POREĐENJE KARAKTERISTIKA ASINHRONIH MOTORA, DOBIJENIH SIMULACIJOM I EKSPERIMENTOM

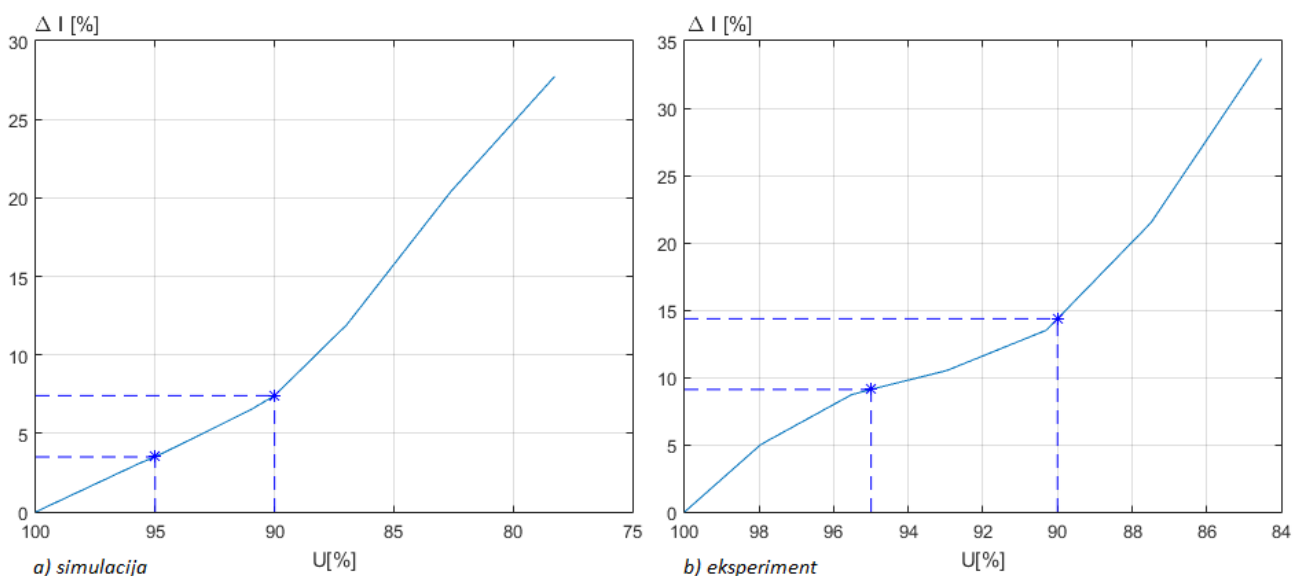
Pored prethodno datih analiza, na osnovu rezultata dobijenih primjenom Simulacionog modela i primjenom Eksperimenta, izvršene su i dodatne analize uticaja nesimetrije napona napajanja na najznačajnije karakteristike asinhronih motora. Najpotpuniji uvid se ima kroz uporedni prikaz rezultata simulacija i rezultata eksperimentalnih mjerenja. Preko tih

prikaza direktno se može sagledati i uticaj, npr. vrste i veličine motora na promjena karakteristika motora u uslovima nesimetričnog napajanja. Takođe, ovdje je poređenje rezultata simulacija sa rezultatima mjerenja u realnom sistemu (eksperiment), koji se mogu smatrati tačnim podacima, upotrebljeno za verifikaciju Simulacionog modela, čime je potvrđena njegova opšta primjenljivost.

3.3.1. Struje faza statora i električna snaga

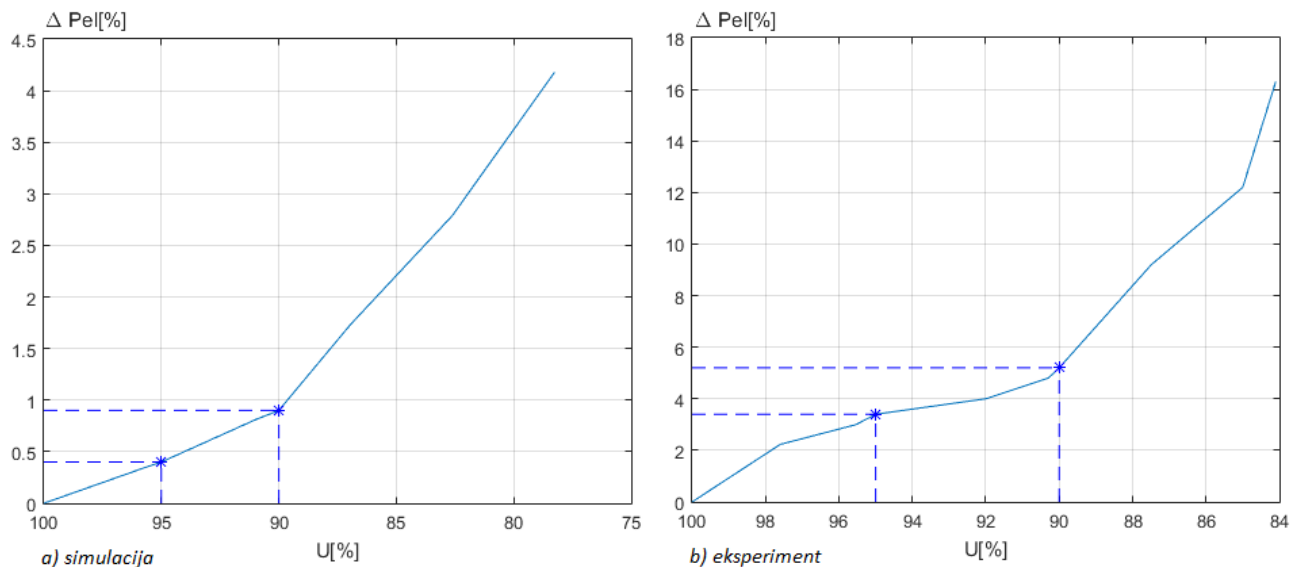
Prethodno prikazane I/U i P/U karakteristike ukazuju na značajan uticaj odstupanja napona, konkretno sniženja napona na povećanje struja statora i na angažovanu (električnu) snagu motora. Sve karakteristike imaju praktično isti trend porasta, sa neznatnim razlikama u vrijednostima rasta. Stoga je za analizu odstupanja napona na karakteristike rada asinhronih motora dovoljno posmatrati režim rada motora pri simetričnom napajanju.

Na *slici 75.* su date procentualne zavisnosti promjene struje statora pri promjeni (sniženju) napona napajanja, a na *slici 76.* procentualne zavisnosti promjene električne snage motora pri promjeni napona napajanja, za varijante simetričnog napajanja. *Slike 75.a.* i *76.a.* prikazuju rezultate simulacije, a *slike 75.b.* i *76.b.* rezultate eksperimenta.



Slika 75. Procentualna promjena faznih struja statora u zavisnosti od napona napajanja

Prikazani grafici, kao i cjelokupna prethodna analiza, pokazuju da pri sniženju napona, dolazi do značajnog povećanja struja statora, kao i do povećanja angažovane snage motora. To povećanje je izraženije pri većem odstupanju napona, a takođe zavisi i od karakteristika motora. Veće je kod motora manjih snaga.



Slika 76. Procentualna promjena električne snage u zavisnosti od napona napajanja

Isti uticaj sniženja napona na posmatrane električne parametre motora imamo i kod nesimetričnog napajanja. Tu nesimetrija napona uzrokuje nesimetričnu raspodjelu struja i snaga po fazama statora, sa izraženim preopterećenjem pojedinih faza. Pri smanjenju napona imamo dodatno povećanje struja i snaga u svim fazama, pri čemu je posebno kritična najopterećenija faza.

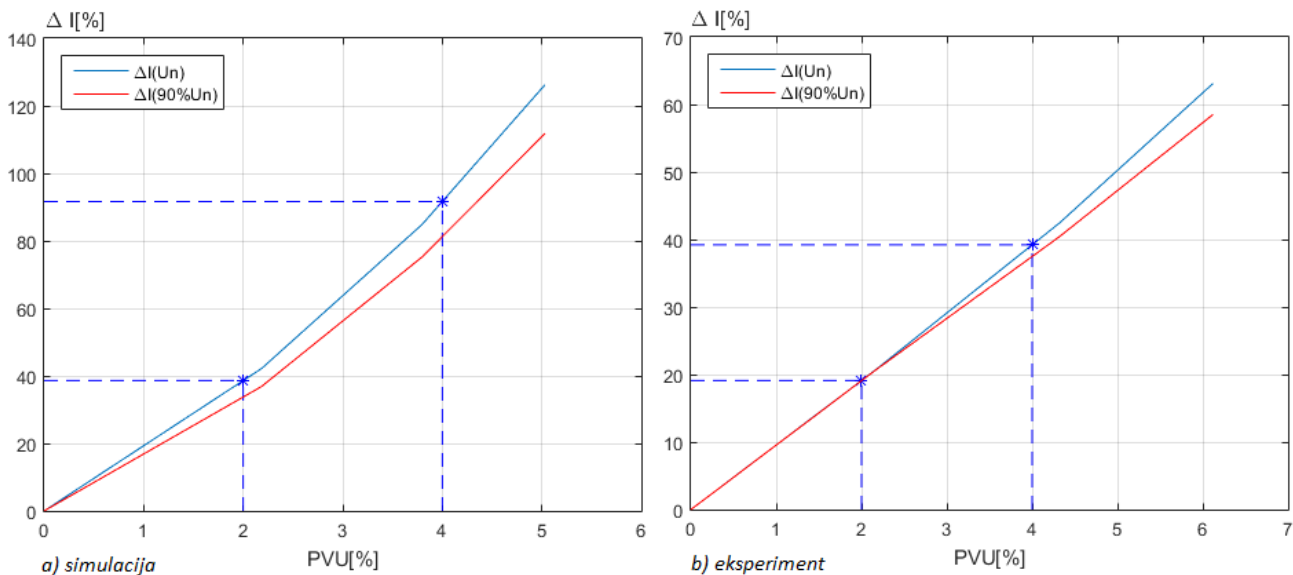
S obzirom na temu i postavljene istraživačke ciljeve ovog rada, detaljnija analiza uticaja odstupanja napona na karakteristike asinhronih motora nije vršena.

Kroz uporedni prikaz simulacionih i eksperimentalnih rezultata, dat narednim slikama, izvršena je dalja analiza uticaja nesimetrije napona napajanja na karakteristike asinhronih motora.

Na slici 77. su prikazane zavisnosti procentualne razlike struja najopterećenije faze i najmanje opterećene faze od faktora nesimetrije napona, dobijene simulacijom (slika 77.a.) i eksperimentom (slika 77.b.).

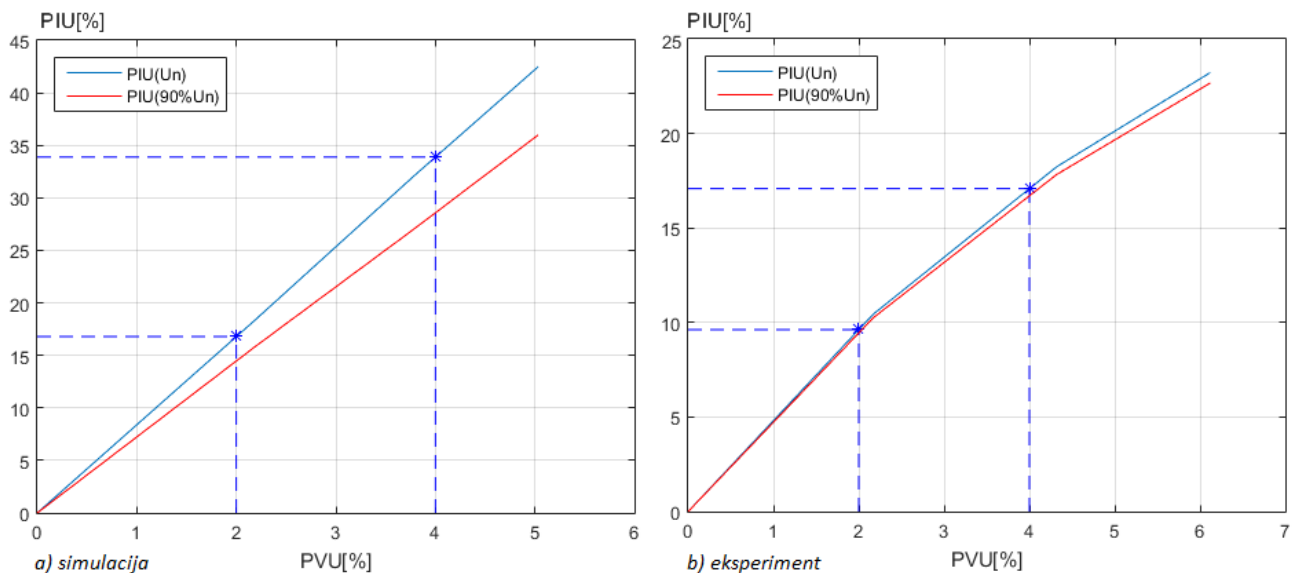
Evidentne su značajne razlike u strujnim opterećenjima faza statora pri nesimetričnom napajanju, kao i njihov rast sa povećanjem nivoa nesimetrije. Rezultati simulacija i eksperimenta se "poklapaju", ali su procentualne vrijednosti razlika struja kod simulacija značajno veće nego kod eksperimenta. Uticaj nesimetrije napona napajanja na nesimetriju struja statora izraženiji je kod motora većih snaga.

Nesimetrija napona napajanja uzrokuje nesimetričnost u trofaznom sistemu faznih struja statora asinhronih motora, i to veću što je nivo nesimetrije napona veći. Nivo te strujne nesimetrije se može izraziti preko faktora nesimetrije struja PIU , izračunatog istom metodologijom kao i faktor nesimetrije napona PVU , izraz (33.).



Slika 77. Procentualna razlika struja najopterećenije i najmanje opterećene faze statora u zavisnosti od faktora nesimetrije napona PVU

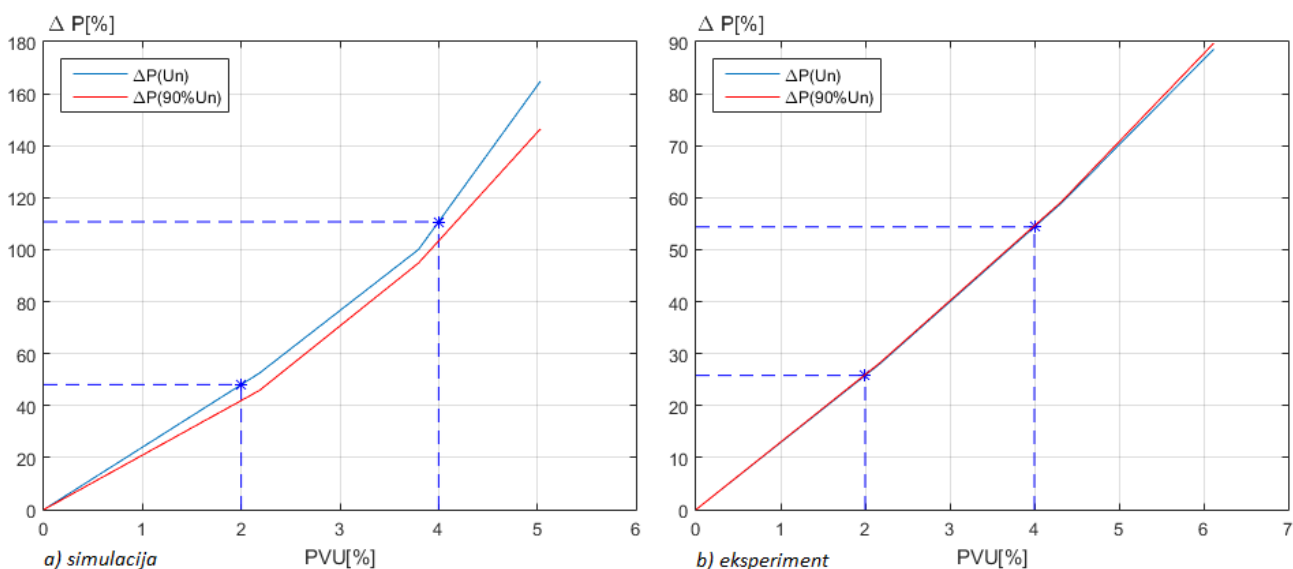
Zavisnosti faktora strujne nesimetrije (PIU) od faktora nesimetrije napona napajanja, prikazane su na slici 78.a-simulacija i slici 78.b.-eksperiment. Vrijednosti faktora nesimetrije struja statora su značajne i veće su kod motora veće snage.



Slika 78. Faktor nesimetrije struja statora u funkciji faktora nesimetrije napona PVU

Nesimetrično napajanje uzrokuje i nesimetričnost raspodjele snaga po fazama. Na slici 79. su prikazane zavisnosti procentualne razlike snaga najopterećenije faze i najmanje opterećene faze od faktora nesimetrije napona, dobijene simulacijom (slika 79.a.) i

eksperimentom (*slika 79.b.*). Razlika u raspodjeli snaga je izraženija od strujne razlike i veća je kod motora veće snage.

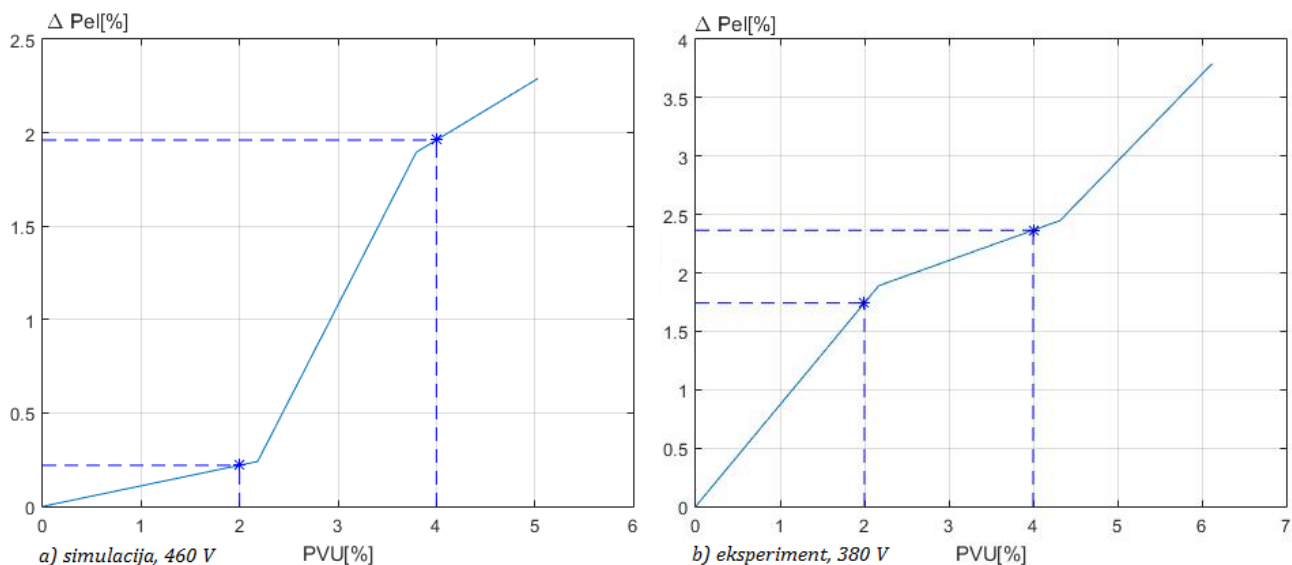


Slika 79. Procentualna razlika snaga najopterećenije i najmanje opterećene faze statora u zavisnosti od faktora nesimetrije napona PVU

Pri nesimetričnom napajanju dolazi i do promjene električne snage motora. To je ukupna angažovana snaga, odnosno ukupna snaga koju motor vuče iz mreže. Na *slici 80.* je prikazana zavisnost procentualne promjene, u odnosu na nazivnu električnu snagu, električne snage motora od faktora nesimetrije napona. *Slika 80.a.* se odnosi na motor simulacionog modela, a *slika 80.b.* na motor eksperimenta.

Evidentno je povećanje električne snage motora pri nesimetričnom napajanju. Sa porastom nivoa nesimetrije, odnosno vrijednosti faktora nesimetrije napona raste i električna snaga motora. Prema prikazanim graficima, do vrijednosti faktora nesimetrije od 4%, taj porast je ispod 2.5%, i nešto je izraženiji kod eksperimenta, odnosno za motor manje snage. Ukoliko motor radi i u uslovima sniženog napona napajanja, porast električne snage motora je izraženiji.

Porast električne snage znači porast snage koju motor vuče iz mreže, i krajnje porast utrošene električne energije. Stoga se održavanjem niske nesimetrije napona (ispod 2%, što je granična vrijednost dozvoljene nesimetrije napona u većini nacionalnih i međunarodnih standarda), kao i održavanjem vrijednosti napona u dozvoljenim granicama ($\pm 5\%$, za ovu vrstu potrošača) mogu ostvariti značajne uštede u potrošnji električne energije asinhronih motora, odnosno pogona sa asinhronim motorima, koji su dominantni potrošači u strukturi potrošnje distributivnih konzuma.



Slika 80. Procentualna promjena električne snage motora u zavisnosti od PVU

3.3.2. Klizanje

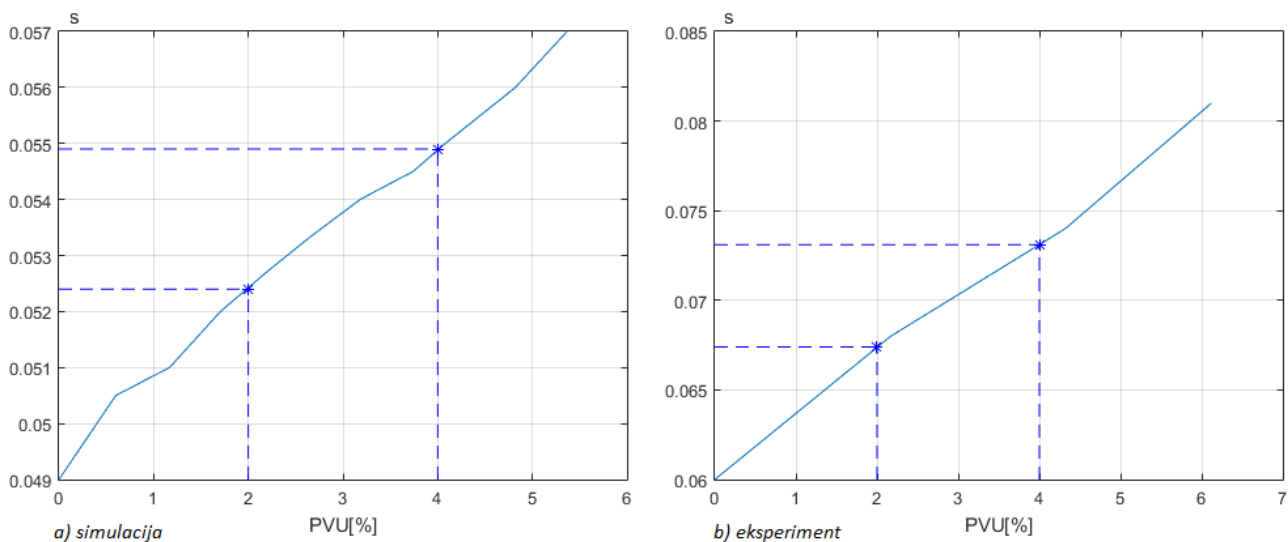
Nesimetrično napajanje asinhronih motora uzrokuje strujnu nesimetriju u statorskom namotaju. Karakteristika te nesimetrije je pojava inverznih komponenti struja statora, koje dalje uzrokuju pojavu inverznih komponenti i kod drugih električnih parametara motora.

Tako se u uslovima nesimetričnog napajanja asinhronih motora pored direktne komponente klizanja (klizanje pri simetričnom napajanju–s) javlja i inverzna komponenta klizanja (61.).

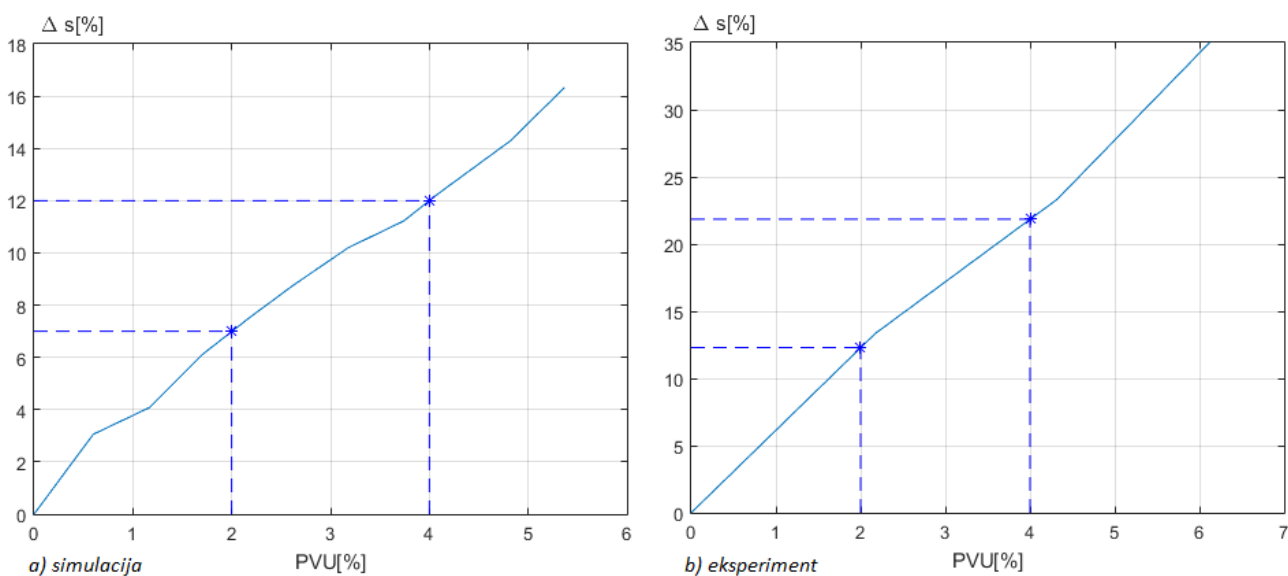
Na slici 81.a. je prikazana promjena klizanja u zavisnosti od vrijednosti faktora nesimetrije napona napajanja PVU , dobijena na osnovu rezultata simulacija, a na slici 81.b. promjena klizanja dobijena na osnovu eksperimentalnih rezultata. Rezultati simulacija i eksperimenta se "poklapaju", sa razlikama u vrijednostima klizanja, u skladu sa karakteristikama i veličinom korišćenih motora.

Procentualne promjene klizanja u funkciji nesimetrije napona napajanja (faktora PVU) prikazane su na slici 82.a.–simulacija i slici 82.b.–eksperiment. Pri povećanju nesimetrije napona, odnosno vrijednosti faktora PVU , klizanje raste, izraženije kod motora manje snage.

Povećanje klizanja u uslovima nesimetričnog napajanja, uzrokuje promjene vrijednosti struja rotora i sa kvadratnom zavisnošću promjenu gubitaka u kolu rotora asinhronog motora, a samim tim i ukupnih gubitaka u motoru.



Slika 81. Klizanje u funkciji faktora nesimetrije napona napajanja



Slika 82. Procentualna promjena klizanja u zavisnosti od faktora nesimetrije napona PVU

3.3.3. Gubici i stepen iskorišćenja

Prema prikazanom energetsom bilansu (**poglavlje 2.4.**), ukupni gubici u asinhronom motoru se sastoje od električnih, magnetnih i mehaničkih gubitaka, odnosno od gubitaka u bakru, gubitaka u gvožđu i gubitaka uslijed trenja i ventilacije (koji su praktično stalni). Gubitke u bakru (Džulovi gubici) čine gubici u bakru statora i gubici u bakru rotora. To su gubici zavisni od opterećenja, srazmjerni sa kvadratom odgovarajuće struje. Gubici u gvožđu su gubici uslijed histerezisa i vrtložnih struja, uzrokovani pojavom elektromagnetne

indukcije i zavisni od odgovarajuće frekvencije. Pošto je u nominalnom režimu (nazivne vrijednosti parametara i opterećenja, uz simetrično napajanje) rada asinhronih motora, frekvencija rotora ($f_r = s f_s$) znatno manja nego frekvencija u statoru (50 Hz), gubici u gvožđu rotora se mogu zanemariti.

Prethodne analize pokazuju, da nesimetrično napajanje asinhronih motora uzrokuje strujne nesimetrije u namotajima statora sa različitim vrijednostima faznih struja i značajnim preopterećenjima pojedinih faza. Nesimetričnost u raspodjeli strujnih opterećenja, kao i vrijednosti strujnih preopterećenja, rastu sa povećanjem nivoa nesimetrije napona napajanja.

U skladu sa ovim promjenama, sa kvadratnom zavisnošću od struja, mijenjaju se i Džulovi gubici u fazama statora, odnosno ukupni gubici u bakru statora jednaki njihovom zbiru (63. i 64.).

Nesimetrično napajanje utiče i na gubitke u namotaju rotora asinhronih motora. Nesimetrični sistem struja statora, formiran u uslovima nesimetričnog napajanja, karakteriše prisustvo direktne i inverzne komponente struja statora. Inverzne komponente struja statorskog namotaja proizvode inverzno magnetsko polje koje se obrće sinhronom brzinom suprotno od obrtanja rotora. Ovo inverzno polje indukuje u namotajima rotora elektromotornu silu, odnosno struju učestanosti oko dvostruke vrijednosti osnovne učestanosti (~ 100 Hz). U spektru struja rotora pojavljuje se drugi harmonik kao direktna posljedica nesimetričnog napona napajanja asinhronog motora. Sa povećanjem naponske nesimetrije, odnosno inverzne komponente struja statora raste i drugi harmonik struja rotora. Prisustvo viših (drugog) harmonika povećava efektivnu vrijednost struja rotora.

Pri nesimetriji napona napajanja, s kvadratnom zavisnošću od struja, povećavaju se i Džulovi gubici u fazama namotaja rotora, odnosno ukupni gubici u bakru rotora. Takođe i gubici u gvožđu rotora, koji se pri simetričnom napajanju mogu zanemariti, rastu zbog povećanja učestanosti rotora.

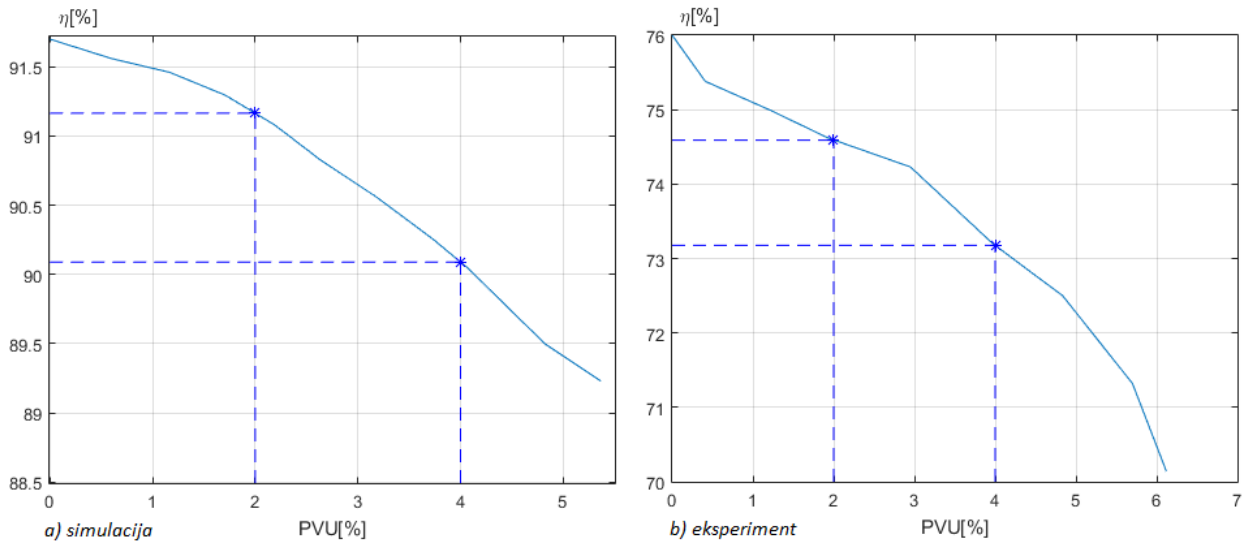
Trend povećanja ukupnih gubitaka asinhronog motora može se prikazati preko grafičke zavisnosti stepena iskorišćenja motora (59.) od nivoa naponske nesimetrije.

Na *slici 83.a.* je prikazana zavisnost stepena iskorišćenja od faktora nesimetrije napona, za asinhroni motor korišćen u simulacionom modelu, a na *slici 83.b.* za motor korišćen u eksperimentu. Zavisnosti procentualne promjene stepena iskorišćenja date su na *slici 84.*

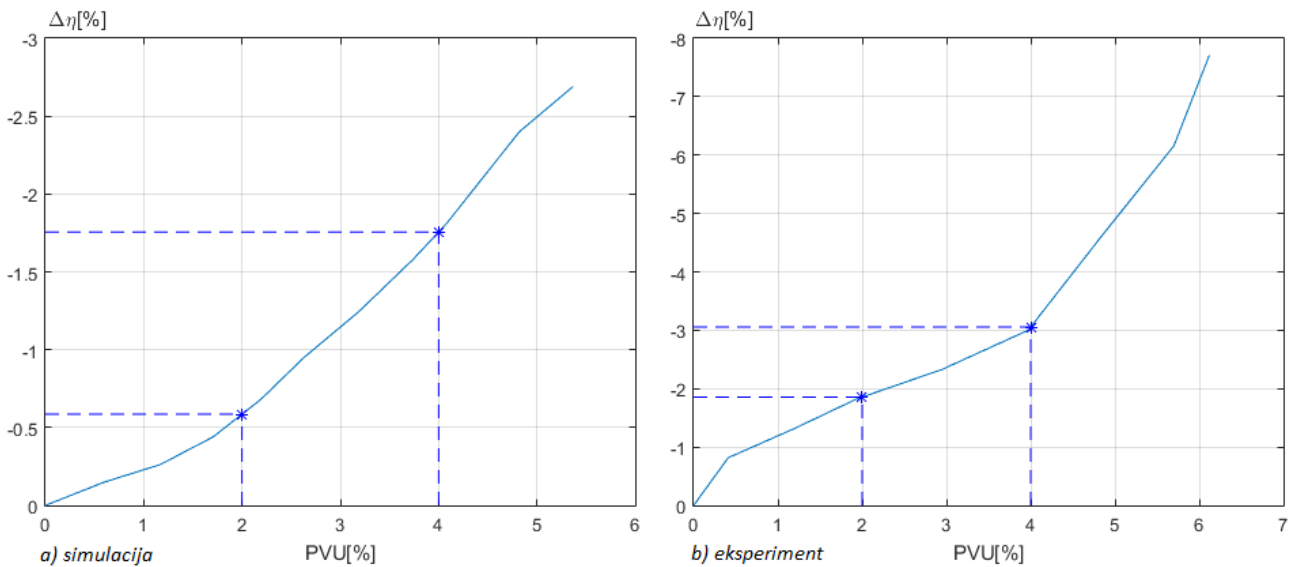
U uslovima nesimetričnog napajanja, smanjuje se vrijednost stepena iskorišćenja motora, to više što je nivo nesimetrije veći.

Smanjenje stepena iskorišćenja znači sniženje energetske efikasnosti motora koje se izražava kroz porast gubitaka, dodatno zagrijavanje, ubrzano starenje izolacije i skraćenje životnog vijeka.

Potrošnja električne energije se nepotrebno povećava zbog smanjenja stepena iskorišćenja motora, pa održavanje niske nesimetrije napona predstavlja značajnu mjeru za efikasan rad asinhronih motora i efikasno korišćenje električne energije.



Slika 83. Stepen iskorišćenja u funkciji faktora nesimetrije napona napajanja



Slika 84. Procentualna promjena stepena iskorišćenja u zavisnosti od faktora nesimetrije napona PVU

3.3.4. Preventivne mjere za zaštitu od uticaja nesimetričnog napajanja

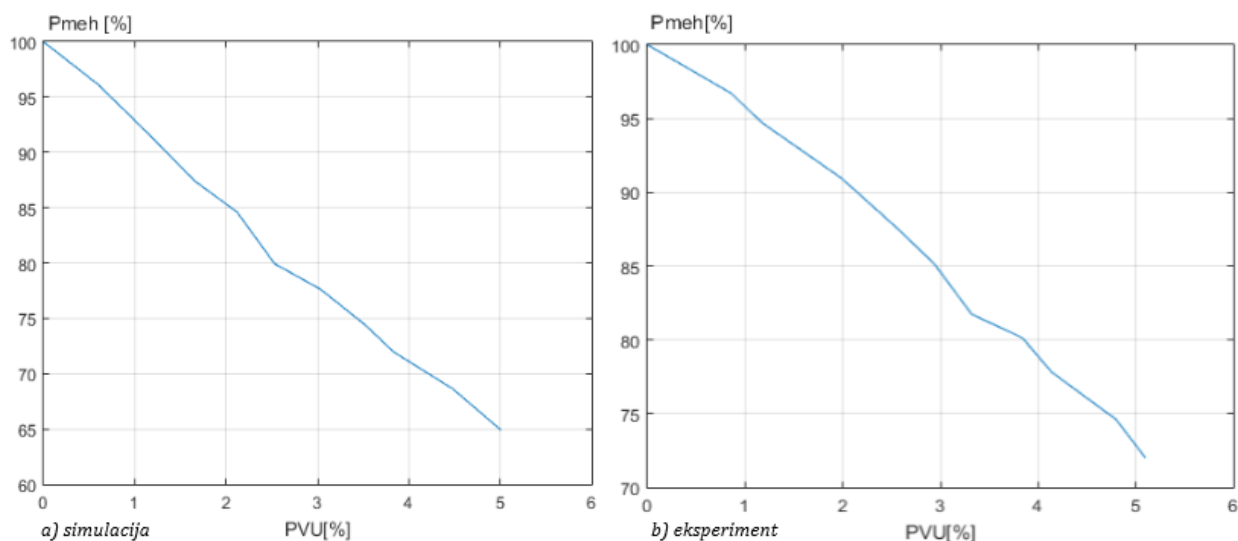
Sprovedena analiza ukazuje na značajne negativne efekte nesimetričnog napona napajanja na karakteristike i rad asinhronih motora. Sa strane motora, nivo i posljedice tog uticaja zavise od niza faktora, prije svega od tipa motora, veličine motora, kao i od stepena opterećenja motora. Sa strane sistema napajanja, od karakteristika i nivoa nesimetrije mrežnog napona, odnosno napona napajanja u tački priključka asinhronog motora zavisi nivo uticaja i negativnih posljedica na priključeni motor. Shodno uticajnim faktorima,

moguće mjere za zaštitu asinhronih motora od nesimetričnog napajanja mogu se posmatrati sa aspekta sistema napajanja i sa aspekta motora.

Sa strane sistema napajanja, mjere zaštite asinhronih motora, kao i uopšteno svih priključenih potrošača, od nesimetričnog napajanja realizuju se kroz faze projektovanja i eksploatacije sistema napajanja. U osnovi svih tih mjera je obezbjeđenje normiranog kvaliteta električne energije u potrošačkim čvornim tačkama sistema, uz stalni monitoring i preventivna djelovanja na održavanju kvaliteta električne energije.

Pri pojavi naponskih nesimetrija, najjednostavniji način preventivnog djelovanja u cilju zaštite asinhronih motora od neravnomjernog i prekomjernog zagrijavanja jeste redukcija opterećenja na njegovom vratilu. Redukcija opterećenja se vrši u iznosu takvom da vrijednosti faznih struja ne prelaze njihove nominalne vrijednosti.

U cilju sagledavanja tog odnosa, kreiran je grafik procentualne zavisnosti opterećenja motora i faktora nesimetrije napona uz uslov održavanja faznih struja i napona u granicama nominalnih vrijednosti. *Slika 85.a.* prikazuje navedeni grafik kreiran na osnovu rezultata simulacija, a *slika 85.b.* grafik dobijen na osnovu eksperimentalnih rezultata.



Slika 85. Odnos procenta nesimetrije i opterećenja održavajući fazne struje unutar granica nominalnih vrijednosti

4. ZAKLJUČAK

U savremenim elektroenergetskim sistemima sa decentralizovanom proizvodnjom i deregulisanim tržištem električne energije, sa sve većom konkurencijom među distributerima električne energije, istraživanje problematike kvaliteta električne energije poprima sve veći značaj, kako sa aspekta samog elektroenergetskog sistema, tako i iz ugla priključenih potrošača. U skladu sa zadacima i ciljevima istraživanja definiše se i sam pojam kvaliteta električne energije, kao i njegovi pokazatelji. U tehničkom smislu, kvalitet električne energije obuhvata kvalitet isporuke električne energije i kvalitet isporučene električne energije. Kvalitet isporuke obuhvata probleme pouzdanosti i sigurnosti napajanja, prisutne na svim nivoima, od proizvodnog do distributivnog, a koji se u principu rješavaju u fazama planiranja, razvoja i održavanja elektroenergetskih objekata, mreža i sistema uopšte. Problematika kvaliteta isporučene električne energije vezana je za dva osnovna parametra režima sistema, učestanost sistema i napon. Učestanost, kao sistemska veličina u osnovi je vezana za sveukupnu stabilnost rada sistema, u okviru koje se izučavaju i njeno odstupanje, odnosno kvalitet električne energije vezan za taj parametar. Stoga se problem kvaliteta električne energije, najčešće prepoznaje kao kvalitet napona. Takav pristup u definisanju pojma kvaliteta električne energije usvojen je i u ovom radu.

Na kvalitet električne energije, odnosno kvalitet napona utiče veliki broj faktora različitog karaktera. Tu spadaju konstrukcione karakteristike elemenata sistema, a prije svega to su neminovno prisutne smetnje u radu sistema, različite prirode i uzroka, kao i uticaj priključenih potrošača električne energije. Uticaj ovih faktora na kvalitet električne energije, odnosno na kvalitet napona manifestuje se kroz narušavanje osnovnih parametara napona (efektivna vrijednost napona i simetričnosti), kao i na izobličenja talasnog oblika napona (tranzijenti, propadi napona, kratkotrajni prekidi, prenaponi i podnaponi, viši harmonici, interharmonici, urezi, fluktuacije napona, šumovi i sl.), što u principu znači snižen kvalitet napona napajanja, odnosno nekvalitetno napajanje potrošača.

Nekvalitetno napajanje može izazvati brojne negativne efekte, često povezane sa značajnim finansijskim i materijalnim štetama. Pri tome karakter i nivo negativnih efekata zavisi prvenstveno od vrste izobličenja (narušenog parametra kvaliteta napona), njihovog intenziteta i učestanosti pojavljivanja, a takođe i od strukture opterećenja, odnosno vrste priključenih potrošača. Različite vrste potrošača su manje ili više osjetljive na sniženje kvaliteta napona. Jedna od karakteristika savremenih elektrodistributivnih sistema je i promjena strukture potrošnje, sa sve većim prisustvom nelinearnih potrošača (najrazličitije vrste elektronskih uređaja i dr.). S jedne strane, ova grupa potrošača ima značajan uticaj na karakteristike napona, a istovremeno sniženje kvaliteta napona najizraženiji negativni uticaj ima upravo na ovu grupu potrošača, tzv. "osjetljive" potrošače. Zbog istovremenog negativnog uticaja na kvalitet električne energije i izražene "osjetljivosti" na sniženje kvaliteta električne energije, ova vrsta potrošača je u fokusu stručnih naučnih istraživanja u ovoj oblasti. Pored njih, sa aspekta uticaja kvaliteta napona napajanja na njihov rad i

karakteristike, veoma značajnu potrošačku grupu čine asinhroni motori. To su danas najzastupljeniji potrošači električne energije, koji nalaze primjenu u skoro svim oblastima ljudske djelatnosti. Povećanjem energetske efikasnosti pogona sa asinhronim motorima mogu se postići značajni pozitivni efekti, prvenstveno značajne uštede u potrošnji električne energije. Pri tome izbor energetske efikasne pogona ne znači samo primjenu energetske efikasne motora, njihov pravilan izbor, korišćenje i održavanje, već i monitoring i unapređenje kvaliteta električne energije, tj. kvaliteta napona napajanja.

Od pokazatelja kvaliteta električne energije na asinhronu motore najveći uticaj imaju odstupanja napona, nesimetrija napona i viši harmonici. Stoga se i kvalitet napajanja za asinhronu motore uobičajeno definiše kroz zahtjeve za ispunjavanje propisanih (normiranih) kriterijuma u pogledu: vrijednosti napona (dozvoljena odstupanja napona), nesimetrije napona (dozvoljene vrijednosti faktora nesimetrije) i harmonijske distorzije napona (dozvoljene vrijednosti faktora totalne harmonijske distorzije). Ovaj magistarski rad posvećen je istraživanjima uticaja nesimetrije napona napajanja, kao jednog od osnovnih pokazatelja kvaliteta električne energije u trofaznim naizmjeničnim sistemima, na rad i karakteristike asinhronih motora. U okviru tih istraživanja, prethodno je izvršena sistematizacija pokazatelja kvaliteta napona, sa kratkim opisom uzroka nastanka i posljedica njihovog djelovanja, i detaljnijom analizom nesimetrije napona, kao izučavanog pokazatelja.

Nesimetrija napona je stanje kada se naponi u posmatranoj tački trofaznog naizmjeničnog sistema međusobno razlikuju po vrijednosti (amplitudna nesimetrija) ili/i ako su uglovi između pojedine dvije faze različiti od 120° (amplitudna nesimetrija). Uzroci nesimetrije napona su mnogobrojni i raznovrsni i praktično se ne mogu u potpunosti eliminisati. Pojave nesimetrije napona posebno su izražene na distributivnom i potrošačkom nivou. Osnovni uzroci nesimetrije napona na tim nivoima su prisustvo i rad većih jednofaznih potrošača i sistema kondenzatorskih baterija, neravnomjerna raspodjela opterećenja po fazama, kao i pojave nesimetričnih kvarova. Tu su i posljedice nesimetrije napona najizraženije, prvenstveno zbog direktnog negativnog uticaja na rad i karakteristike priključenih potrošača.

Proračuni i analize nesimetričnih režima u trofaznim naizmjeničnim sistemima, uobičajeno se vrše metodom simetričnih komponenti, zasnovanoj na *Fortescue*-ovoj teoremi. Po ovoj metodi nesimetrični trofazni sistem napona razlaže se i dalje analizira preko, u opštem slučaju tri simetrična trofazna sistema: sistem direktnog ili pozitivnog redosljeda, sa jednakim redosljedom faza kao i simetrični sistem, sistem inverznog ili negativnog redosljeda, sa obrnutim redosljedom faza u odnosu na direktni sistem i sistem nultog redosljeda, sa tri istofazne komponente. Pri tome je sam nivo (stepen) nesimetričnosti određen vrijednostima inverzne i nulte komponenta napona.

S obzirom da narušavanje simetrije napona može da ima značajne negativne efekte kako po sistem napajanja i njegovu opremu, tako i na priključene potrošače, neophodno je na svim nivoima obezbijediti simetričnost sistema napona, odnosno nivo nesimetrije napona

držati u okviru dozvoljenih, relevantnim standardima definisanih granica. Pri tome, standardizacija podrazumijeva ne samo normiranje dozvoljenih vrijednosti (granica) već i prethodno jasno definisanje normiranog indikatora, konkretno indikatora nesimetrije napona, prvenstveno kroz matematički izraz koji omogućava njegovo jasno i precizno izračunavanje u konkretnim (poznatim) uslovima nesimetrije napona.

Kao indikatori nesimetrije napona, u okviru različitih standarda, kao i u praksi koriste se različito definisani faktori nesimetrije napona. Najčešće se faktor nesimetrije izražava preko inverzne komponente napona, pri čemu je najsveobuhvatniji oblik tog indikatora faktor nesimetrije u kompleksnom obliku, definisan odnosom kompleksnih vrijednosti inverzne i direktne komponente napona, faznih (27.) ili linijskih (28.). Pri standardizaciji, kao i u praksi, najčešće se koristi faktor nesimetrije napona definisan odnosom vrijednosti inverzne i direktne komponente nesimetričnog sistema napona. Prema IEC definiciji, to je *Voltage Unbalance Factor-VUF* (35.). NEMA definicija, se odnosi na faktor nesimetrije sistema linijskih napona, dat kao *Line Voltage Unbalance Rate-LVUR* i definisan odnosom maksimalne razlike između vrijednosti linijskih napona i srednje vrijednosti tih napona, u procentima (32.). IEEE definicija se odnosi na nesimetrične sisteme faznih napona, za koje se nivo nesimetrija definiše preko faktora *Phase Voltage Unbalance Rate-PVUR1*, definisanog izrazom (33.), kao i preko *Phase Voltage Unbalance Rate-PVUR2*, definisanog izrazom (34.). Zbog jednostavnosti proračuna i mogućnosti direktne upotrebe mjernih podataka, u praksi se kao indikatori za analize nesimetrija napona često koriste približni izrazi za faktore nesimetrije napona, kao npr. "CIGRE formula" (37.) i (27.). S obzirom na prisutne različitosti u definicijama, a samim tim i moguće razlike u vrijednostima, faktora nesimetrije napona, u svim analizama nesimetrija napona kao pokazatelja kvaliteta električne energije, neophodno je jasno precizirati koji indikator, odnosno koji faktor nesimetrije napona se u konkretnim istraživanjima koristi.

Asinhroni motori se projektuju i izrađuju tako da se napajaju simetričnim sinusoidalnim naponima određene-nazivne vrijednosti. Međutim, kada su izloženi naponskoj nesimetriji ili/i distorziji, kao i pri odstupanju napona, njihove performanse se mijenjaju. Narušavanje svakog od navedenih pokazatelja kvaliteta električne energije, negativno utiče na rad i karakteristike asinhronih motora. Karakteristike i nivo negativnih posljedica zavisi od vrste i nivoa narušenog pokazatelja kvaliteta električne energije s jedne strane i s druge strane od vrste i veličine motora, kao i od karakteristika opterećenja motora. U uslovima istovremene narušenosti više pokazatelja kvaliteta električne energije, što je u praksi veoma čest slučaj, negativni efekti su još izraženiji.

U okviru ovog magistarskog rada izvršena su istraživanja uticaja nesimetrije napona, kao jednog od osnovnih parametara kvaliteta električne energije u trofaznim naizmjeničnim sistemima, na rad i karakteristike asinhronih motora. Istraživanja su sprovedena metodom simulacione analize i eksperimentalnim mjerenjima.

Simulacione analize izvršene su primjenom simulacionog modela formiranog u programskom paketu MATLAB/Simulink. Osnova modela je matematički model asinhronog

motora u uslovima nesimetričnog napona napajanja. Eksperiment je realizovan u laboratorijskim uslovima, Elektrotehničkog fakulteta Univerziteta „La Sapienza” u Rimu (Dipartimento di Ingegneria Astronautica, Elettrica ed Energetica), sa asinhronim motorom manje snage i realnim–mrežnim napajanjem. Sve simulacije, kao i eksperimentalna mjerenja su realizovana pri nazivnom opterećenju motora, u različitim uslovima nesimetričnog napajanja, odnosno pri različitim vrijednostima faktora nesimetrije napona *PVU* (33.).

Uparedne analize simulacionih i eksperimentalnih rezultata pokazuju, kroz praktično identičan trend promjena analiziranih karakteristika asinhronih motora pri promjeni nesimetrije napona napajanja, visok stepen „poklapanja“, sa razlikama u vrijednostima koje su odraz zavisnosti uticaja nesimetrije napona od vrste i veličine asinhronog motora. Podudarnost eksperimentalnih rezultata, koji se u granicama mjerne greške mogu smatrati tačnim rezultatima, i rezultata simulacije potvrđuje tačnost simulacionog modela i mogućnost njegove šire primjene.

Na osnovu simulacija i eksperimentalnih mjerenja rada nazivno opterećenih asinhronih motora u različitim uslovima nesimetričnog napajanja, u radu su izvedeni značajni zaključci o uticaju nesimetrije napona na rad i karakteristike asinhronih motora.

Kroz prikaz I/U i P/U karakteristika motora za sve posmatrane vrijednosti faktora nesimetrije napona, analiziran je i uticaj vrijednosti napona napajanja, odnosno odstupanja napona kao veoma uticajne komponente kvaliteta napona na rad asinhronih motora. Razmatrano je, u praksi veoma prisutno, sniženje napona, sve do vrijednosti napona pri kojem je za date uslove nesimetrije napona bio moguć rad motora pri nazivnom opterećenju. Pri sniženju napona, rastu struje faza statora, kao i električna snaga motora. Te promjene su zavisne od vrste i veličine motora. Veće su kod motora manje snage. Porast struja uzrokuje povećano zagrijavanje motora, te ubrzano starenje izolacije i skraćenje životnog vijeka motora. Takođe, raste potrošnja električne energije. Zaključuje se da je održavanje vrijednosti napona napajanja u dozvoljenim granicama ($\pm 5\%$), veoma značajno kako sa tehničkih aspekata rada motora, tako i sa aspekta opšte energetske efikasnosti, s obzirom da je optimizacija troškova električne energije jedan od njenih osnovnih parametara.

Prikazani rezultati simulacija i eksperimentalnih mjerenja pokazuju da nesimetrija napona napajanja ima značajne negativne efekte na rad i karakteristike asinhronih motora. Nesimetrično napajanje asinhronih motora uzrokuje nesimetričnu raspodjelu struja i snaga u fazama statora motora. Raspodjela i vrijednosti opterećenja po fazama zavise od tipa i nivoa nesimetrije napona napajanja, a takođe i od vrste i veličine motora.

Sa povećanjem nivoa nesimetrije napona, odnosno vrijednosti faktora nesimetrije napona (konkretno faktora *PVU*), razlike u strujnom opterećenju faza se povećavaju, kao i vrijednosti strujnih preopterećenja. Neravnomjerna raspodjela struja po fazama, sa značajnim preopterećenjima pojedinih faza, to većim sto je nivo nesimetrije napona napajanja veći, uzrokuje neravnomjerno i prekomjerno zagrijavanje motora i u motoru

stvara „slabe tačke“ koje postaju uzrok prijevremenih otkaza i kvarova motora. Neravnomjerno termičko naprezanje izolacije motora uzrokuje i prijevremeno starenje, odnosno skraćenje životnog vijeka motora.

Nesimetričnost faznih snaga u uslovima nesimetričnog napona napajanja, raste sa porastom nivoa nesimetričnosti, odnosno vrijednosti faktora nesimetrije napona napajanja. Sa povećanjem nesimetrije napona raste i ukupna električna snaga motora, odnosno snaga koju motor angažuje iz mreže, što praktično znači povećanu potrošnju električne energije, odnosno negativne finansijske efekte u radu pogona sa asinhronim motorom.

Kroz uporednu analizu rezultata simulacija i eksperimentalnih rezultata u radu su analizirane i druge karakteristike asinhronih motora u uslovima nesimetričnog napajanja motora, kao i uticaj vrste i veličine motora na njihovu promjenu u tim uslovima.

Pri nesimetričnom napajanju asinhronih motora smanjuje se maksimalni i polazni moment motora, jer se pored direktne javlja i inverzna komponenta momenta. Nesimetrija napona napajanja izaziva povećanje gubitaka u statoru. Povećava se klizanje. U uslovima nesimetričnog napona napajanja, kao posljedica inverzne komponente napona, odnosno inverznog obrtnog magnetnog polja u kolu rotora se pojavljuje struja drugog harmonika, povećava se efektivna vrijednost struja rotora kao i gubici (u bakru i gvožđu) kola rotora. Praktično ovo znači dodatno povećanje ukupnih gubitaka i zagrijavanja motora, kao i povećanje potrošnje električne energije.

Negativni efekti nesimetrije napona napajanja ilustrovani su i kroz uticaj nesimetrije napona na stepen iskorišćenja asinhronog motora. Pri nesimetričnom napajanju smanjuje se stepen iskorišćenja asinhronih motora. To praktično znači nepotrebno povećanje potrošnje električne energije, pa održavanje niske nesimetrije napona ($\leq 2\%$) predstavlja jednu od mjera za efikasno korišćenje električne energije.

Prema izvršenim analizama zaključuje se da su svi navedeni negativni uticaji nesimetrije napona napajanja izraženiji što je nivo nesimetrije, odnosno vrijednost faktora nesimetrije napona veća. Zato je opravdano da se u tačkama priključka asinhronih motora dozvoljeni nivo nesimetrije napona ograniči na vrijednosti $\leq 2\%$, kako je to definisano u većini nacionalnih i međunarodnih standarda. Istovremeno, asinhroni motori moraju adekvatnim sistemom zaštite biti zaštićeni od prevelikih nesimetrija napona napajanja.

Mogući pravci daljih istraživanja u oblasti uticaja kvaliteta električne energije na rad i karakteristike asinhronih motora su višestruki, sa prioritetima analize uticaja viših harmonika i analize rada asinhronih motora u uslovima istovremene pojave naponske nesimetrije i distorzije napona.

POPIS OSNOVNE LITERATURE

- [1] A. Tokić, V. Milardić, "Kvalitet električne energije", Tuzla, 2015.
- [2] Williams, J.W., "Operation of 3 phase induction motors on unbalanced voltages", AIEE Trans. Power App. Syst., vol. PAS-73, pp. 125–133, Apr. 1954.
- [3] A. von Jouanne and B. B. Banerjee, "Voltage unbalance: Power quality issues, related standards and mitigation techniques," Electric Power Research Institute, Palo Alto, CA, May 2000.
- [4] Miloš Petrović, "Ispitivanje električnih mašina", Naučna knjiga, Beograd 1988.
- [5] R. P. Broadwater, A. H. Khan, H. E. Shaalan, and R. E. Lee: "Time varying load analysis to reduce distribution losses through reconfiguration", IEEE Trans. Power Delivery, vol. 8, no. 1, pp. 294–300, Jan. 1993.
- [6] Gojko Joksimović, "Asinhrona mašina", predavanja, Podgorica, 2015.
- [7] F. Avčin, P. Jereb, "Ispitivanje električnih strojeva", Tehniška založba Slovenije, Ljubljana 1968.
- [8] Dr Zoran Milićević, "Električna vuča", Beograd 2001.
- [9] I. Boldea, S. A. Nasar, "The induction machine handbook", Washington D.C., 2002.
- [10] EPRI Power Electronics Applications Center, "Input performance of an ASD with AC and DC reactors during supply voltage unbalance", Power quality testing network PQTN Brief no. 29, 1996.
- [11] M. H. Bollen, "Understanding Power Quality Problems: Voltage Sags and Interruptions" (1 ed.). (P. M. Anderson, Ed.) Gothenburg, Sweden: IEEE Press, 2000.
- [12] V. Hajro, J. Danon, "Električne mašine", 5. izdanje, Tehnička knjiga, Beograd, 1984.
- [13] N. L. Schmitz and M. M. Berndt, "Derating polyphase induction motors operated with unbalanced line voltages", IEEE Trans. Power App. Syst., pp. 680–686, Feb. 1963.
- [14] R. C. Dugan, "Electrical Power System Quality", Mc Graw Hill, 1996.
- [15] D. O. Koval, "Distribution Customer Power Quality Experience," IEEE Trans. Ind. Applicat., Vol. 29, No.6, November/December 1997

- [16] Jawad Faiz, H. Ebrahimpour and P. Pillay, "Influence of unbalanced voltage supply on efficiency of three phase squirrel cage induction motor and economic analysis", *Elsevier Energy Conversion and Management*, Vol. 47, No. 3, 2006, pp. 289-302.
- [17] Chen, T.H., "Criteria to estimate the voltage unbalances due to high speed railway demands", *IEEE Trans. Power Systems*, 9(3): 1672-1678, 1994.
- [18] Seematter, S. C. and E. F. Richards, "Computer analysis of 3-phase induction motor operation of rural open delta distribution systems", *IEEE Trans. Ind. Appl.*, 12(2): 479-486. 1976.
- [19] Muljadi E., R. Schiferl and T.A. Lipo, "Induction machine phase balancing by unsymmetrical thyristor voltage control", *IEEE Trans. Industry Applications*, 21(4): 669-678., 1985.
- [20] Lee, C.-Y., "Effects of unbalanced voltage on the operation performance of a three-phase induction motor", *IEEE Trans. Energy Conversion*, 14(2): 202-208., 1999.
- [21] Bhavaraju, V. B. and P. N. Enjeti, "An active line conditioner to balance voltages in a three-phase system", *IEEE Trans. Industry Applications*, 32(2): 287-292., 1996.
- [22] C. J. Melhorn and M. F. McGranaghan, "Interpretation and analysis of power quality measurements", *IEEE Trans. Industry Application*, vol. 31, no. 6, pp. 1363-1370, Nov./Dec. 1995.
- [23] *Motors and Generators*, NEMA Standards Publication no. MG 1-1993.
- [24] Gafford, W. C. Duesterhoeft, and C. C. Mosher, "Heating of induction motors on unbalanced voltages", *AIEE Trans. Power App. Syst.*, vol. PAS-78, pp. 282-297, June 1959.
- [25] W. H. Kersting and W. H. Phillips, "Phase frame analysis of the effects of voltage unbalance on induction machines", *IEEE Trans. Industry Applications*, vol. 33, no. 2, pp. 415-420, Mar./Apr. 1997.
- [26] D. Rendusara, A. von Jouanne, P. Enjeti, and D. A. Paice, "Design considerations for 12 pulse diode rectifier systems operating under voltage unbalance and pre-existing voltage distortion with some corrective measures", *IEEE Trans. Industry Applications*, vol. 32, no. 6, pp. 1293-1303, Nov./Dec. 1996.
- [27] P. B. Cummins, J. R. Dunki-Jacobs, and R. H. Kerr, "Protection of induction motors against unbalanced voltage operation", *IEEE Trans. Industry Applications*, vol. IA-21, no. 4, pp. 778-792, May/June 1985.
- [28] M. E. Galey, "Benefits of performing unbalanced voltage calculations", *IEEE Trans. Industry Applications*, vol. 24, no. 1, pp. 15-24, Jan./Feb. 1988.

- [29] B. Mitraković, N. Nikolić: "Asinhronne mašine", 6. izdanje, Naučna knjiga, Beograd, 1991.
- [30] B. Skalicki, J. Grilec., "Električni strojevi i pogoni", Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2005.
- [31] L. Refoufi, H. Bentarzi and F. Z. Dekhandji, "Voltage Unbalance Effects on Induction Motor Performance", *WSEAS*, 2006, pp. 112 - 117.
- [32] 'Power Quality' Working Group WG2: "Guide to Quality of Electrical Supply for Industrial Installations", Part 5, Flicker and Voltage Fluctuations, 2000.
- [33] K. Srinivasan: "Harmonics and Symmetrical Components", Power Quality Assurance, Jan/Feb.1997.
- [34] D. Reljic, V. Katic, V. Vasic: "Power Quality in Adjustable Elevator AC Drives - A Case Study", International PCIM Conference 2004 - Power Electronics, Intelligent Motion, Power Quality, May 2004, Nürnberg (Germany), pp. 836-841.
- [35] EN 50160:1999, "Voltage characteristics of electricity supplied by public distribution systems", CENELEC, 1999.
- [36] Ž. Novinc, "Kvaliteta električne energije-priručnik", Elektrotehnički fakultet Osijek, 2003.
- [37] M. Lasić, "Kvaliteta električne energije i negativno povratno djelovanje trošila na mrežu", Končar-Institut za elektrotehniku d.d, FER zagreb, Hrvatska, 2006.
- [38] S. Acevedo, "Short Circuit Studies", Mexico City, 2000.
- [39] <https://www.google.com/patents>
- [40] <https://patentimages.storage.googleapis.com>
- [41] <https://www.eti.kit.edu>
- [42] <http://www.teslauniverse.com>
- [43] <https://en.wikipedia.org>
- [44] Hussein A. Kazem, B. Zahawi, D. Giaouris, "Modeling of six-pulse rectifier operating under unbalanced supply conditions", Department of Electrical, Electronics and Computer Engineering, Newcastle University, Newcastle upon Tyne, UK, 2009.
- [45] Dr Željko Novinc, "KVALITETA ELEKTRIČNE ENERGIJE", Sveučilište J. J. Strossmayera, Osijek, Elektrotehnički fakultet Osijek, Osijek, 2006.

- [46] Ilija Derikučka, "ANALIZA UTICAJA STRUKTURE POTROŠNJE NA KVALITET ELEKTRIČNE ENERGIJE U DISTRIBUTIVNIM MREŽAMA", Magistarski rad, Elektrotehnički fakultet u Podgorici, Podgorica, 2016.
- [47] Dr Johan Driesen, Dr Thierry Van Craenenbroeck, "Voltage Disturbances", Power Quality Application Guide, Katholieke Universiteit Leuven, May 2002.
- [48] <https://ieeexplore.ieee.org>
- [49] <http://www.iec.ch>
- [50] <https://standards.ieee.org>
- [51] American National Standard for Electrical Power Systems and Equipment – Voltage Ratings (60 Hertz), ANSI C84.1-1995
- [52] National Electrical Manufacturers Association (NEMA) Publication No. MG 1-1998 Motors and Generators.
- [53] IEEE Standard Test Procedure for Polyphase Induction Motors and Generators, IEEE Standard 112, 1991.
- [54] IEEE 936-1987, Guide for Self-Commutated Converters, Publisher IEEE, 1987, ISBN: 0-7381-4265-4
- [55] Standard: IEC 60034-26, ROTATING ELECTRICAL MACHINES - PART 26: EFFECTS OF UNBALANCED VOLTAGES ON THE PERFORMANCE OF THREE-PHASE CAGE INDUCTION MOTORS
- [56] Zbigniew Olczykowski, Andrzej Wasowski, "Methods of Voltage Unbalance Estimation in Electric Power Networks", Electrical Power Quality and Utilisation, Journal Vol. XII, Technical University of Radom, Poland, 2006.
- [57] Seung-Gi Jeon, "Representing line voltage unbalance", Conference Record of the 2002 IEEE Industry Applications Conference. 37th IAS Annual Meeting (Cat. No. 02CH37344)
- [58] A. Robert and J. Marquet, "Assessing Voltage Quality with to Harmonics, Flicker and Unbalance", WG 36.05, Paper 36-203, CIGRE 92
- [59] P. Giridhar Kini, R. C. Bansal, R. S. Aithal, "Impact of voltage unbalance on the performance of three-phase induction motor", Dept. Of Electrical and Electronics, Manipal Institute of Technology, Manipal, Karnataka, India