

5. SNABDIJEVANJE INDUSTRIJSKIH POSTROJENJA ELEKTRIČNOM ENERGIJOM

5.1 Opšte o snabdijevanju električnom energijom

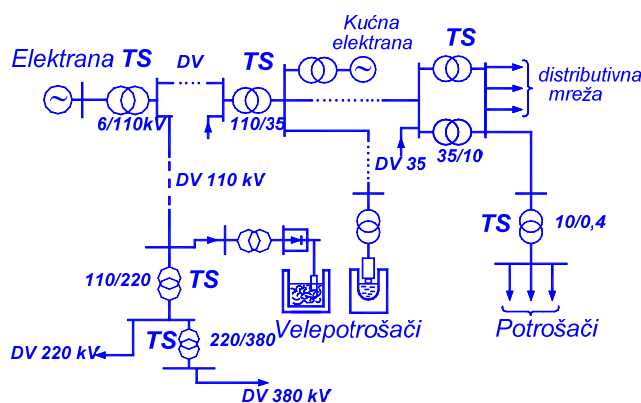
Električna energija predstavlja najplemenitiji oblik energije, jer je moguća njena efikasna konverzija u mehaničku, toplotnu, hemijsku i svjetlosnu energiju. Ni jedan drugi oblik energije ne može zadovoljiti tako raznorodne potrebe industrijskih postrojenja kao što može električna energija. Stoga, svako industrijsko postrojenje koristi električnu energiju. Snabdijevanje električnom energijom moguće je iz sopstvenog izvora ili iz **elektroenergetskog sistema**. Sopstveni izvori se koriste samo u rjeđim slučajevima.

Elektroenergetskim sistemom nazivamo skup uređaja, od postojenja za proizvodnju električne energije do uključivo potrošača električne energije.

Elektroenergetski sistem se sastoji iz sljedećih glavnih djelova:

- elektrana za proizvodnju električne energije,
- stanica za razvod i transformaciju električne energije, ili samo za razvod,
- vodova za prenos i distribuciju električne energije.

Na sl 5.1 šematski je predstavljen jedan tipičan dio elektroenergetskog sistema



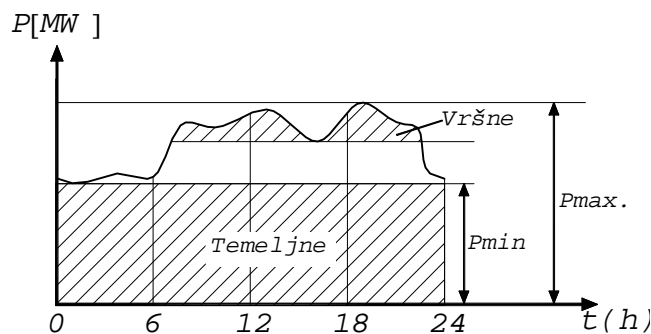
Slika 5.1 Jedan dio elektroenergetskog sistema

Svi ovi djelovi treba da budu tako građeni i dimenzionisani da omogućuju pouzdano snabdijevanje potrošača električnom energijom, određenog napona i učestanosti, na najekonomičniji način. Način gradnje, dimenzioniranja i pogona pojedinih elemenata elektroenergetskog sistema, ne može se posmatrati nezavisno jedan od drugoga, jer oni zajedno čine jednu cjelinu.

Zadatak **elektrana** je da proizvedu potrebnu električnu energiju i to u trenutku kada to potrošač zahtijeva. Pošto ne postoji mogućnost akumuliranja većih količina električne energije, to u svakom trenutku mora biti zadovoljena jednakost: **proizvodnja = potrošnja**. Postoji više vrsta elektrana; njihova klasifikacija vrši se po različitim kriterijumima.

-Po kriterijumu pogonskog sredstva razlikujemo: hidroelektrane, termoelektrane, nuklearne elektrane, elektrane na vjetar, elektrane na plimu i osjeku itd. Moguća je i detaljnija podjela elektrana. Tako, hidroelektrane možemo podijeliti na protočne i akumulacione hidroelektrane; termoelektrane: na parne, gasne i dizel elektrane i sl.

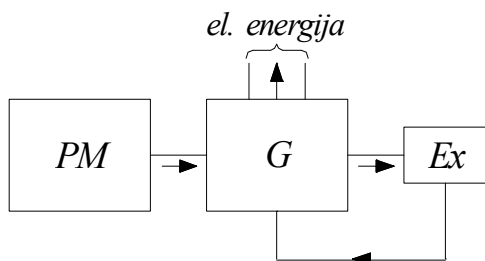
-Prema ulozi u elektroenergetskom sistemu, elektrane se mogu podijeliti na **temeljne** i **vršne**. Potrebe određenog konzumnog (potrošačkog) područja za električnom energijom različite su u pojedinim periodima dana, a takođe i u različitim periodima godine. Jedan tipičan dnevni dijagram opterećenja dat je na sl. 5.2



Slika 5.2 Tipičan dnevni dijagram opterećenja

Na osnovu tehno-ekonomskih kriterijuma određuje se koje elektrane u sistemu će raditi kao temeljne (to će sigurno biti protočne hidroelektrane), a koje kao vršne (to će biti akumulacione hidroelektrane, jer mogu brzo da startuju, a nemaju dovoljno vode u akumulaciji da bi radile neprekidno tokom cijele godine).

Svaka elektrana, bez obzira na vrstu i ulogu u sistemu, mora da sadrži: pogonsku mašinu PM, generator G i budilicu Ex.



Slika 5.3 Osnovni elementi elektrane

Pogonska mašina (parna turbina, vodna turbina i sl.) predaje generatoru mehaničku energiju. Generator (izvor električne struje) vrši konverziju mehaničke energije u električnu. Budilica (eksitator) služi za magnetno "pobuđivanje" generatora.

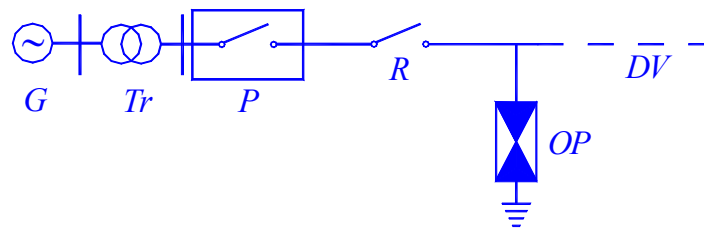
Električna snaga generatora determinisana je visinom napona i jačinom struje. Visina napona generatora limitirana je tehničkim uslovima izvedbe generatora, a jačina struje, koju diktiraju potrošači i u principu ona je promjenljiva sa vremenom, ograničena je dozvoljenim zagrijavanjem generatora. Otporni moment generatora, kojim se on suprotstavlja pogonskoj mašini, zavisi od jačine struje koju generator daje potrošačima.

Elektrane se obično grade na izvoru energije. Od izvora energije (npr. rudnik uglja) do potrošača (npr. veći gradovi) ekonomičniji je prenos električne energije od prenosa energije u ma kom drugom obliku.

Ekonomičnost prenosa električne energije od elektrane do potrošača, zahtijeva da se prenos vrši sa višim naponima i slabijim strujama. Prenešena snaga, tj. prenešena energija u jedinici vremena, jednaka je proizvodu napona i jačine struje. Gubici energije u prenosnim vodovima nastaju uslijed Džulovih gubitaka, dakle, srazmjerni su sa kvadratom struje uvodu. Očigledno, ista snaga će biti prenešena uz manje gubitke ako se prenosi sa višim naponom. Generatori, po pravilu, ne mogu da daju napon pogodan za prenos energije. Zbog toga se u neposrednoj blizini elektrane grade stanice za transformaciju i razvod (trafo-stanice -TS). Isto tako, visoki napon, koji vlada na prenosnim vodovima **-dalekovodima**, nije pogodan za direktno priključenje na potrošače. Zbog toga se u blizini potrošača takođe grade TS. Uređaji koji vrše

ove preobražaje (transformacije) napona nazivaju se transformatori. Oni koji se nalaze u postrojenju blizu elektrane nazivaju se **uzlazni transformatori** (zadatak im je da povećavaju napon), a oni koji se nalaze blizu potrošača nazivaju se **silazni transformatori** (zadatak im je da snize napon dalekovoda na niži napon, pogodan za distribuciju i potrošače).

Osim transformatora, u stanicama za transformaciju i razvod važnu ulogu igraju i **prekidači snage P** (sl.5.4), koji omogućavaju odvajanje pojedinih dijelova sistema, ili odvajanje određenog potrošačkog područja od sistema, npr. ako, zbog kvara, potrošači povuku jaču struju od dozvoljene. Na taj način, prekidači štite transformator i generator od preopterećenja.



Slika 5.4 Jednopolna šema dijela elektroenergetskog sistema

Prekidači djeluju automatski kada opterećenje (struja) pređe dozvoljenu granicu, oni dakle, služe za prekidanje strujnog kola pod opterećenjem, dok **rastavljač R** (sl.5.4) ima zadatak da vidno odvoji dva dijela elektroenergetskog sistema. Manipulacija rastavljačem dozvoljena je samo u neopterećenom stanju (kada kroz njega ne teče struja). U protivnom, zbog pojave električnog luka među kontaktima, može doći i do unesrećenja rukovaoca. Odvodnik prenapona OP služi da štiti postrojenje (prekidač, transformator, generator i ostalu opremu) od nedozvoljeno visokih napona **-prenapona**, koji mogu da se pojave u dalekovodu DV (npr. uslijed atmosferskog pražnjenja u dalekovod).

Prenosni vodovi i ekonomičan prenos električne energije omogućavaju izgradnju snažnih agregata i to na samim izvorima energije. Osim toga, prenosni vodovi (DV) imaju zadatak da međusobno povezuju elektrane, čime je omogućeno međusobno nadopunjavanje. Prenosni vodovi dalje omogućavaju stvaranje velikih elektroenergetskih sistema. Time je omogućen ekonomičniji pogon, a povećava se i sigurnost snabdijevanja potrošača. Konačno, prenosnim vodovima se povezuju veliki sistemi međusobno.

Za prenos električne snage u principu dolaze u obzir tri sistema: jednosmjerni, jednofazni naizmjenični i polifazni naizmjenični sistem.

Polifazni sistem prvi je ostvario Nikola Tesla svojim patentom iz 1887. godine. Otkrićem ovih sistema napravljen je znatan korak naprijed u razvoju elektrotehnike, posebno njene primjene. Pomoću polifaznih sistema naizmjeničnih struja, Tesla je uspio da realizuje obrtno magnetno polje, pomoću koga je realizovao motor naizmjenične struje, do tada nepoznat. Ovaj motor, poznat pod nazivom indukcioni ili asinhroni motor, najčešći je tip motora koji se danas srijeće u industriji. Polifazna kola, u odnosu na jednofazna, omogućuju uštedu materijala potrebnog za prenosne vodove. Zatim, trenutna snaga simetričnog polifaznog sistema može da bude stalna. Kao što smo vidjeli, trenutna snaga jednofaznog sistema uvijek je vremenski promjenljiva. Ovo znači da je moment ($M = kP$; moment je srazmjern snazi) jednog motora polifaznog uravnoteženog sistema isti u svakom trenutku, dok moment jednofaznog motora osciluje od nule do neke maksimalne vrijednosti, sa dvostrukom učestanosti napona i struje. Polifazni motori mogu sami da se pokrenu po uključenju na električnu mrežu, dok jednofazni ne mogu i zahtijevaju posebne elemente. Zatim, proizvodnja i prenos električne energije jednostavnija je i ekonomičnija polifaznim sistemima nego jednosmjernim ili jednofaznim sistemima. Tako se i velike snage jednosmjerne struje, kada su potrebne (npr. za elektrolizu aluminijuma), ostvaruju pomoću usmjerenja (ispravljanja) polifazne struje u jednosmjernu.

Od polifaznih sistema u praksi se upotrebljavaju dvofazni, trofazni, četvorofazni i šestofazni. Od svih su najbolji, i najčešće se koriste trofazni, radi svoje ekonomičnosti i relativne jednostavnosti. Ostala polifazna kola se upotrebljavaju samo u posebnim slučajevima. Mi ćemo našu pažnju ograničiti samo na trofazni sistem.

5.2 Trofazni simetrični sistem

Trofazni sistem je skup tri faze (tri jednofazna kola). Svaka faza je okarakterisana intenzitetom napona i struje, faznim pomjerajem između struje i napona, kao i faznim pomjerajem između ovih veličina i njima odgovarajućih veličina u drugoj i trećoj fazi. Kod trofaznog simetričnog izvora, naponi sve tri faze su po intenzitetu jednaki, a fazno su pomjereni za po $2\pi/3$ radijana, odnosno 120° električnih. Ukoliko neki od ovih uslova nije ispunjen, trofazni sistem je nesimetričan. Mi ćemo zadržati pažnju samo na trofaznim simetričnim sistemima.

Neka je trenutna vrijednost ems-e u prvoj fazi data izrazom:

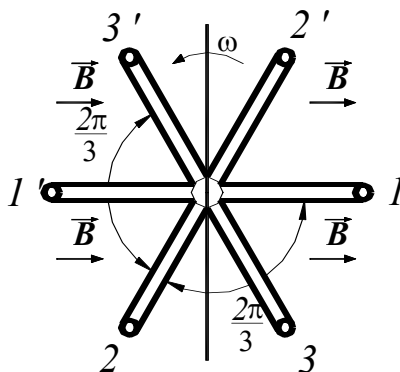
$$e_1(t) = E_m \sin \omega t,$$

tada su, prema gore datoj definiciji trofaznog simetričnog sistema, ems-e u drugoj i trećoj fazi date izrazima:

$$\begin{aligned} e_2(t) &= E_m \sin(\omega t - 2\pi/3) \\ e_3(t) &= E_m \sin(\omega t - 4\pi/3) \end{aligned} \quad (5.1)$$

koji se razlikuju samo po faznom stavu.

Ovakav sistem ems-a može se ostvariti pomoću tzv. "teorijskog generatora", koji se sastoji od tri električno izolovana, mehanički čvrsto povezana namotaja (1-1'; 2-2'; 3-3', sl.5.5), prostorno međusobno pomjereni za ugao od 120° , koji se obrću stalnom ugaonom brzinom ω oko zajedničke osovine u homogenom magnetnom polju indukcije B.



Slika 5.5 Idealni (teorijski) generator

Stvarni trofazni generator radi na istom principu, samo što se, kod njega, magnetno polje obrće, tako što se elektromagneti napajani iz budilice nalaze na pokretnom dijelu (rotoru), kojeg obrće pogonska mašina, a namotaji, međusobno pomjereni za 120 stepeni, smješteni su na nepokretnom dijelu (statoru), i u njima se indukuju elektromotorne sile, koje se opisuju izrazima kao (5.1).

Ako na krajeve svakog od namotaja generatora povežemo jednako opterećenje, koje je okarakterisano impedansom Z, tada će, pod uticajem ems-e, kroz svaki namotaj (i potrošač) teći struja i. Zavisno od vrste opterećenja, ove struje će: biti u fazi sa ems-om (čisto omsko opterećenje $Z=R$), kasniti za ugao φ (pretežno induktivno opterećenje), ili će prednjačiti za neki ugao φ (pretežno kapacitivno opterećenje). Pretpostavimo da smo priključili opterećenje sa pretežno induktivnom impedansom, tada će trenutne vrijednosti struje u pojedinim fazama biti:

$$\begin{aligned}
 i_1(t) &= I_m \sin(\omega t - \varphi) \\
 i_2(t) &= I_m \sin(\omega t - \varphi - 2\pi/3) \\
 i_3(t) &= I_m \sin(\omega t - \varphi - 4\pi/3)
 \end{aligned}
 \quad (5.2)$$

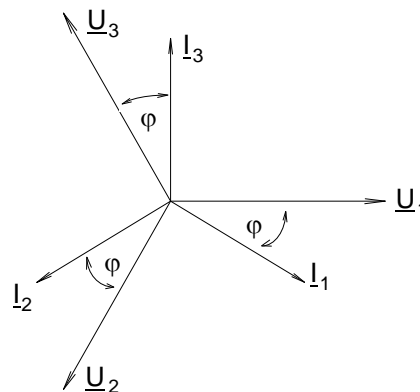
Kao što se vidi, i ems-e i struje su prostoperiodične funkcije vremena, pa ih možemo predstaviti u kompleksnom obliku:

$$\begin{aligned}
 \underline{e}_1 &= E_m e^{j(\omega t - 0)} & \underline{i}_1 &= I_m e^{j(\omega t - \varphi)} \\
 \underline{e}_2 &= E_m e^{j(\omega t - 2\pi/3)} & \underline{i}_2 &= I_m e^{j(\omega t - \varphi - 2\pi/3)} \\
 \underline{e}_3 &= E_m e^{j(\omega t - 4\pi/3)} & \underline{i}_3 &= I_m e^{j(\omega t - \varphi - 4\pi/3)}
 \end{aligned}$$

Češće se ove veličine izražavaju preko efektivnih vrijednosti i , umjesto ems-a, češće koristimo napone, pa imamo:

$$\begin{aligned}
 \underline{U}_1 &= U e^{j0} & \underline{I}_1 &= I e^{j(\omega t - \varphi)} \\
 \underline{U}_2 &= U e^{j(\omega t - 2\pi/3)} & \underline{I}_2 &= I e^{j(\omega t - \varphi - 2\pi/3)} \\
 \underline{U}_3 &= U e^{j(\omega t - 4\pi/3)} & \underline{I}_3 &= I e^{j(\omega t - \varphi - 4\pi/3)}
 \end{aligned}
 \quad (5.3)$$

Kompleksne količine napona i struja trofaznog simetričnog sistema grafički su predstavljene u kompleksnoj ravni na sl. 5.6 i odnose se na trenutno stanje za trenutak $t=0$.



Slika 5.6 Dijagram faznih napona i struja trofaznog simetričnog sistema

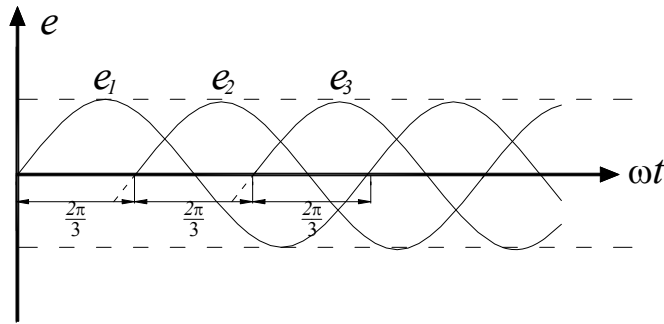
Pri predstavljanju naizmjeničnih veličina obrtnim vektorima, pozitivan smjer rotacije je smjer suprotan smjeru kazaljke na satu. Redosljed faza kod trofaznog sistema je isto tako važan kao što je kod jednosmjerne struje označavanje pozitivnih i negativnih krajeva.

Na sl. 5.6 prikazan je dijagram trenutnih vrijednosti napona trofaznog simetričnog sistema.

Projekcije fazora $\underline{U}_1; \underline{U}_2; \underline{U}_3$ na imaginarnu osu lako se porede sa trenutnim vrijednostima odgovarajućih veličina na sl. 5.7.

Pogledajmo sada čemu je jednaka trenutna vrijednost zbira napona trofaznog simetričnog sistema:

$$\begin{aligned}
 u_0(t) &= u_1(t) + u_2(t) + u_3(t) = \\
 &= U_m [\sin \omega t + \sin(\omega t - 2\pi/3) + \sin(\omega t - 4\pi/3)]
 \end{aligned}$$



Slika 5.7 Trenutne vrijedosti napona trofaznog sistema

Prisjetimo se adicione teoreme, prema kojoj je:

$$\sin \alpha + \sin \beta = 2 \sin \frac{\alpha + \beta}{2} \cos \frac{\alpha - \beta}{2}$$

pa je:

$$\begin{aligned} \sin(\omega t - 2\pi/3) + \sin(\omega t - 4\pi/3) &= \\ &= 2 \sin(\omega t - \pi) \cos(\pi/3) = -\sin \omega t \end{aligned}$$

te je:

$$u_0(t) = U_m (\sin \omega t - \sin \omega t) = 0 \quad (5.4)$$

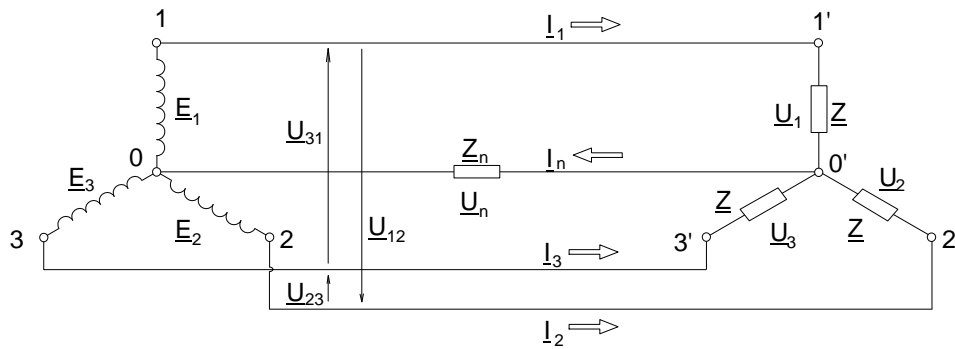
Dakle, zbir napona trofaznog simetričnog sistema u svakom trenutku jednak je nuli. U ovo se, takođe, lako može uvjeriti i iz grafičkih interpretacija na sl.5.6 i sl.5.7. Ovo je vrlo važna osobina trofaznog simetričnog sistema. Naime, ako vežemo namotaje generatora tako da kraj prvog namotaja 1' vežemo sa početkom drugog namotaja 2, kraj drugog namotaja 2' sa početkom trećeg namotaja 3 i kraj trećeg namotaja 3' sa početkom prvog namotaja 1, ukupna ems-a ovako vezanog kola će uvijek biti ravna nuli. To dalje znači da će ukupna struja u ovakvom kolu biti jednaka nuli, iako u kolu svaki namotaj ima svoju ems-u i svoju struju čija je vrijednost različita od nule. Ovakva veza namotaja naziva se **veza u trougao**. Znači, vezivanjem namotaja generatora u trougao, rad generatora, tj. rad svakog namotaja posebno, uopšte se ne mijenja, kao da imamo tri jednofazna generatora. Međutim, napajanje potrošača se ne mora obavljati sa šest provodnika, za svaku fazu po dva, kao što je slučaj sa tri jednofazna generatora, nego samo sa tri provodnika.

Kako su struje u trofaznom uravnoteženom sistemu pomjerene za isti fazni ugao ϕ u odnosu na korespondentni napon, to je fazorski dijagram za struje isti kao za napone, samo što je zaokrenut za ugao ϕ . Prema tome, i zbir struja u svakom trenutku je takođe ravan nuli. Ovaj važan podatak praktično znači da kada sva tri početka (ili kraja) namotaja povežemo u jedan čvor (kojeg nazivamo zvjezdište), tada je zbir struja u tom čvoru jednak nuli. Ovaj način vezivanja naziva se **veza u zvijezdu**.

Iz navedenih osobina trofaznog simetričnog sistema, jasno je da postoje dva specifična načina vezivanja namotaja, i to, kako kod generatora, tako i kod potrošača; veza u zvijezdu i veza u trougao.

5.3 Trofazno simetrično kolo vezano u zvijezdu

Na slici 5.8 predstavljeno je trofazno simetrično kolo kod kojeg su i izvor i prijemnik vezani u zvijezdu.



Slika 5.8 Trofazno simetrično kolo sa vezama izvora i prijemnika u zvijezdu.

Čvor 0 (0') je zvjezdište, ili nul-tačka. 1, 2 i 3 (1', 2', 3') su izlazi namotaja faza generatora (potrošača). Svaki namotaj generatora, kao nosilac jedne faze, naziva se **fazni namotaj**. Struja u svakom namotaju je fazna struja I_f . Na svakom namotaju vladaju električne sile i to fazna ems-a E_f i fazni napon U_f .

Pomoću tri provodnika, koji idu od krajeva namotaja generatora, ostvarena je veza generatora sa potrošačem - prijemnikom, koji se uvijek sastoji od tri impedanse, koje su vezane u zvijezdu (kao na slici) ili u trugao. Ovi provodnici se nazivaju **linijski vodovi**, a sva tri zajedno sačinjavaju trofazni vod kojim se prenosi električna snaga. U linijskim vodovima teku linijske struje I_l , a između linijskih vodova vladaju linijski naponi U_l . Ako su sve tri impedanse potrošača jednake, tada je struja u liniji 0-0' (nulti vod) jednaka nuli, te ovaj vod ne bi ni bio potreban, ali, vidjet ćemo kasnije, zašto se ovaj vod, ipak, nekada postavlja.

Da bismo našli vezu između vrijednosti faznih i linijskih veličina struja i napona, kao i fazni odnos među njima, potrebno je usvojiti pozitivne smjerove ems-a, struja i napona u namotajima i linijskim vodovima. Tek tada ćemo moći da upotrijebimo, bilo fazorsku bilo simboličku, metodu izračunavanja. Obično se usvaja, za generator, smjer ems-e i smjer struje ka izlazu namotaja (iz zvjezdišta), a time je određen pad napona ka zvjezdištu. Linijske struje imaju smjer ka potrošaču, a linijski naponi imaju smjer određen tako da je izlaz generatorovog namotaja prve faze pozitivan u odnosu na izlaz druge faze, izlaz druge je pozitivan u odnosu na izlaz treće i izlaz treće pozitivan u odnosu na izlaz prve faze. Da bi se izbjegla greška pri određivanju faznog stava između faznih i linijskih veličina, sugerirše se konsekventno pridržavanje navedenih oznaka, kao na sl. 5.8.

Po svojoj konstrukciji, veza u zvijezdu jasno ukazuje da su linijska i fazna struja jednake

$$I_l = I_f.$$

Iz usvojenih smjerova na sl.5.7, lako formiramo jednačinu dinamičke ravnoteže električnih sila za zatvorenu konturu (po drugom Kirhofovom pravilu):

$$\underline{U}_{112} = \underline{U}_{f1} - \underline{U}_{f2};$$

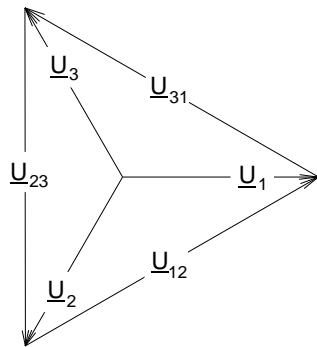
$$\underline{U}_{123} = \underline{U}_{f2} - \underline{U}_{f3};$$

$$\underline{U}_{131} = \underline{U}_{f3} - \underline{U}_{f1}$$

Koristeći kompleksne izraze za fazne napone, linijski napon između vodova 1 i 2 je:

$$\begin{aligned} \underline{U}_{112} &= U_f (e^{j0} - e^{-j2\pi/3}) = \\ &= U_f (1 - \cos(2\pi/3) + j \sin(2\pi/3)) = \\ &= U_f \left(\frac{3}{2} + j \frac{\sqrt{3}}{2} \right) \end{aligned}$$

Primjenjujući isti postupak, možemo odrediti i ostala dva linijska napona, što je fazorski predstavljeno na sl.5.9



Slika 5.9 Dijagram linijskih i faznih napona trofaznog simetričnog sistema

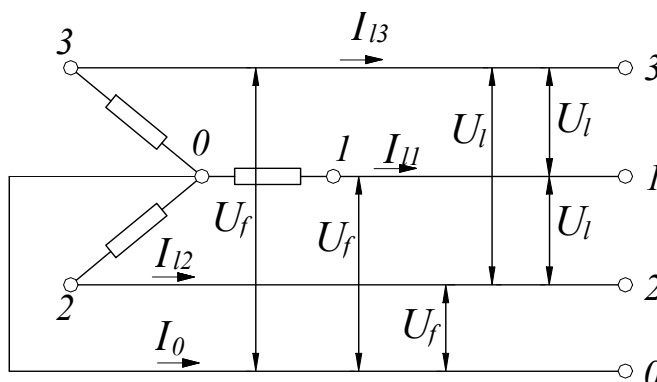
Očigledno, linijski napon fazno prednjači korespondentnom faznom naponu za ugao 30 stepeni. Po vrijednosti, linijski napon je moduo kompleksne količine:

$$U_{l12} = U_f \sqrt{\left(\frac{3}{2}\right)^2 + \left(\frac{\sqrt{3}}{2}\right)^2} = U_f \sqrt{3}.$$

Pošto je sistem simetričan, isto važi i za druga dva linijska napona. Dakle, veza između efektivnih vrijednosti linijskih i faznih veličina kod veze u zvijezdu važi:

$$I_l = I_f; \quad U_l = \sqrt{3}U_f. \quad (5.5)$$

Rekli smo da se kod veze u zvijezdu ponekad koristi i četvrti (nulti) provodnik -ili jednostavno nula. To je naročito čest slučaj kod gradskih niskonaponskih mreža. Napon između nultog i bilo kojeg faznog provodnika je fazni napon U_f , a napon između bilo koja dva fazna provodnika je međufazni ili linijski napon U_l .



Slika 5.10 Veza u zvijezdu sa nultim provodnikom

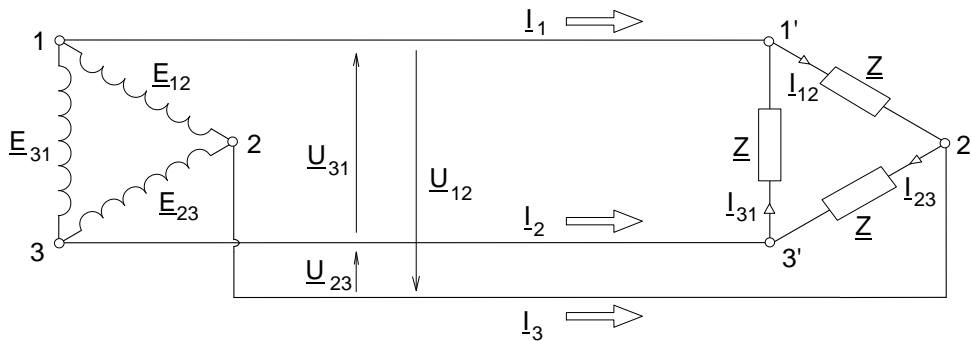
Ovakva mreža, dakle, raspolaže sa dva napona -faznim i linijskim. Oni su standardizovani i u niskonaponskim mrežama iznose $U_f = 220V$ i $U_l = 380V$. Na fazni napon priključuju se potrošači manje snage: sijalice, razne mašine alatke, frižideri, televizori i razni drugi kućanski aparati, a na linijski jači potrošači; šporeti, motori i ostali trofazni potrošači. Trofazni potrošači su simetrični potrošači (imaju iste impedanse po fazama), pa da bi struja u nultom vodu bila jednaka nuli, mora biti jednaka raspodjela opterećenja po pojedinim fazama, tj. morali bi biti priključeni jednaki jednofazni potrošači između svakog faznog provodnika i nule. Kako to obično nije slučaj, i kroz nulti provodnik će teći izvjesna struja, koja je obično znatno manja od linijskih struja, pa poprečni presjek nultog provodnika može biti manji od presjeka linijskih provodnika.

5.4 Trofazno simetrično kolo vezano u trougao

Trofazno električno kolo sa sistemom prijemnika jednakih impedansi napajanih sistemom simetričnih napona, prikazano na slici 5.11, predstavlja trofazno simetrično kolo vezano u trougao. Ovom vezom namotaji sve tri faze obrazuju zatvoreno električno kolo kroz koje, ako je sistem simetričan, ne teče struja, iako kroz svaki namotaj protiče njegova fazna struja, a na njegovim krajevima vlada njegov fazni napon.

Sa slike 5.11 jasno je da je sistem faznih napona jednak sistemu linijskih napona

$$\underline{U}_1 = \underline{U}_{12}; \quad \underline{U}_2 = \underline{U}_{23}; \quad \underline{U}_3 = \underline{U}_{31},$$



Slika 5.11 Trofazno simetrično kolo sa vezama izvora i prijemnika u trougao.

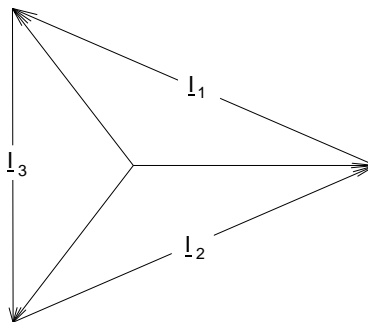
Linijske struje (\underline{I}_{l1} , \underline{I}_{l2} i \underline{I}_{l3}) moguće je izraziti preko faznih struja (\underline{I}_{f1} , \underline{I}_{f2} i \underline{I}_{f3}) korišćenjem I Kirhofovog zakona

$$\text{-za čvor 1: } \underline{I}_{l1} = \underline{I}_{f1} - \underline{I}_{f3}$$

$$\text{-za čvor 2: } \underline{I}_{l2} = \underline{I}_{f2} - \underline{I}_{f1}$$

$$\text{-za čvor 3: } \underline{I}_{l3} = \underline{I}_{f3} - \underline{I}_{f2}$$

Primjenjujući istu proceduru kao za linijske napone kod veze u zvijezdu, dobije se za vezu namotaja u trougao $I_l = \sqrt{3}I_f$.



Slika 5.12 Dijagram linijskih i faznih struja simetričnog trofaznog kola

Dakle, kod trofaznog simetričnog kola spregnutog u trougao, linijski i fazni naponi su među sobom jednaki, a linijske struje su $\sqrt{3}$ puta veće od faznih struja.

$$U_l = U_f; \quad I_l = \sqrt{3}I_f. \quad (5.6)$$

Sa dijagrama (sl.5.12), takođe se vidi da linijska struja zaostaje za 30^0 za odgovarajućom faznom strujom.

5.5 Snage trofaznog sistema

Trenutna vrijednost snage trofaznog sistema jednaka je zbiru trenutnih vrijednosti snaga svake faze posebno; tj.

$$p(t) = p_1(t) + p_2(t) + p_3(t)$$

U slučaju trofaznog simetričnog sistema snage pojedinih faza su:

$$\begin{aligned} p_1(t) &= u_1 i_1 = \sqrt{2} U_f \sin \omega t \cdot \sqrt{2} I_f \sin(\omega t - \varphi) = \\ &= U_f I_f (\cos \varphi - \cos(2\omega t - \varphi)) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} p_2(t) &= u_2 i_2 = \sqrt{2} U_f \sin(\omega t - 2\pi/3) \cdot \sqrt{2} I_f \sin(\omega t - \varphi - 2\pi/3) = \\ &= U_f I_f (\cos \varphi - \cos(2\omega t - \varphi - 4\pi/3)) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} p_3(t) &= u_3 i_3 = \sqrt{2} U_f \sin(\omega t - 4\pi/3) \cdot \sqrt{2} I_f \sin(\omega t - \varphi - 4\pi/3) = \\ &= U_f I_f (\cos \varphi - \cos(2\omega t - \varphi - 8\pi/3)) \end{aligned}$$

Zbir drugih članova u izrazima snaga pojedinih faza, u svakom trenutku je jednak nuli. Prema tome, trenutna snaga trofaznog sistema, tj sve tri faze zajedno, data je:

$$p(t) = 3U_f I_f \cos \varphi . \quad (5.7)$$

Očigledno, trenutna vrijednost snage trofaznog simetričnog sistema je konstantna i nezavisna od vremena, dok se trenutna vrijednost snage svake faze mijenja u vremenu i to dvostrukom učestanošću 2ω . Takođe, trenutna snaga trofaznog simetričnog sistema ujedno je i njegova srednja, odnosno aktivna snaga P, pošto je srednja vrijednost konstante sama ta konstanta, tj.:

$$p(t) = P = 3U_f I_f \cos \varphi . \quad (5.8)$$

Izraz (5.17) je izveden, a da se pri tome nije vodilo računa kako je vezan trofazni generator (ili potrošač), u zvijezdu ili u trougao. Prema tome, izraz (5.17) važi i za vezu u zvijezdu i trougao.

Uobičajeno je da se srednja snaga izražava preko linijskih struja i napona, jer se njihove veličine lakše mogu mjeriti. Da bismo ovo učinili, pretpostavimo prvo slučaj veze u zvijezdu. Tada važi:

$$U_l = \sqrt{3} U_f \quad ; \quad I_l = I_f ,$$

pa izraz za srednju snagu postaje:

$$P = 3 \frac{U_l}{\sqrt{3}} I_l \cos \varphi = \sqrt{3} U_l I_l \cos \varphi . \quad (5.9)$$

Za vezu u trougao važi:

$$U_l = U_f \quad ; \quad I_l = \sqrt{3} I_f$$

pa je izraz za srednju snagu:

$$P = 3U_l \frac{I_l}{\sqrt{3}} \cos \varphi = \sqrt{3} U_l I_l \cos \varphi . \quad (5.10)$$

Dakle, izraz za srednju snagu je isti i za vezu u zvijezdu i za vezu u trougao, bez obzira da li se ona izražava preko faznih ili linijskih veličina. To, međutim, ne znači da je snaga jednog te istog potrošača ista, bez obzira da li je on vezan u zvijezdu ili trougao. Naprotiv, snaga nekog potrošača tri puta je veća ako je on vezan u trougao, nego kada je vezan u zvijezdu. Pokažimo ovo. Treba uvijek poći od toga da je struja kroz određeni fazni namotaj jednaka odnosu napona koji vlada na tom namotaju tj. faznog napona, i impedanse Z tog namotaja. Kod veze u trougao fazni napon jednak je linijskom i on je za $\sqrt{3}$ puta veći od faznog napona kada bi ta impedansa bila vezana u zvijezdu. Dakle, i fazna struja (struja kroz impedansu Z) je za $\sqrt{3}$ puta veća kod veze u trougao. I dalje, kod veze u trougao, linijska struja je za $\sqrt{3}$ puta veća od fazne, dakle, tri puta veća od one koja bi tekla da je impedansa vezana u zvijezdu, tako da je i snaga, koju potrošač uzima iz mreže pri vezi u trougao, tri puta veća nego pri vezi u zvijezdu, jer je napon mreže konstantan.

Ukupna prividna snaga trofaznog simetričnog sistema može se dobiti kao zbir kompleksnih snaga pojedinih faza, što daje:

$$\underline{S} = 3U_f I_f \cos\varphi + j3U_f I_f \sin\varphi = P + jQ \quad [\text{VA}] \quad (5.11)$$

gdje je:

$$P = 3U_f I_f \cos\varphi = \sqrt{3}U_l I_l \cos\varphi \quad [\text{W}] \quad (5.12)$$

aktivna snaga, a

$$Q = 3U_f I_f \sin\varphi = \sqrt{3}U_l I_l \sin\varphi \quad [\text{VAr}] \quad (5.13)$$

reaktivna snaga trofaznog simetričnog sistema.

Napomenimo da se prednja razmatranja odnose na trofazni **simetrični** sistem, dakle kada su impedanse sve tri faze iste, pa, shodno tome, intenziteti struja sve tri faze su isti i fazni pomjeraji između korespondentnih faznih napona i faznih struja φ su isti.

Kod trofaznih **nesimetričnih** sistema impedanse pojedinih faza mogu biti nejednake:

$$\underline{Z}_1 \neq \underline{Z}_2 \neq \underline{Z}_3$$

$$\cos\varphi_1 = \frac{R_1}{Z_1}; \quad \cos\varphi_2 = \frac{R_2}{Z_2}; \quad \cos\varphi_3 = \frac{R_3}{Z_3}$$

Aktivna snaga trofaznog sistema jednaka je zbiru aktivnih snaga pojedinih faza:

$$P = U_{f_1} I_{f_1} \cos\varphi_1 + U_{f_2} I_{f_2} \cos\varphi_2 + U_{f_3} I_{f_3} \cos\varphi_3 \quad (5.14)$$

Analogno, reaktivna i prividna snaga kod nesimetričnog sistema, moraju se odrediti za svaku fazu posebno, a ukupna snaga jednaka je zbiru snaga sve tri faze.

5.6 Neke napomene

Česti su primjeri kada se u kolima za naizmjeničnu struju javljaju veličine koje nisu oblika prostoperiodičnih harmoničkih funkcija vremena. Analiza takvih kola znatno je složenija nego u posljednja dva razmatrana poglavlja. Naime, tada je nužno razložiti složenoperiodične veličine u harmonike, koji imaju prostoperiodični oblik, pa koristiti algoritme koji su već izloženi. Superponiranje efekata pojedinih harmonika zahtijeva dosta složenu proceduru, koja izlazi iz okvira našeg interesovanja.

Takođe, potpuna analiza nesimetričnih trofaznih kola, zahtijeva razlaganje veličina koje karakterišu takva kola na simetrične komponente (unifaznu ili nultu, direktnu i inverznu), pa zatim analizu vršiti postupcima i sredstvima koji su izučavani. Ovaj metod se naziva metod simetričnih komponenti, i, takođe, izlazi iz okvira ovog kursa.