

PETLJASTI ARMATURNI NAMOT SINKRONOG GENERATORA

Zloić, Domagoj

Undergraduate thesis / Završni rad

2023

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Split / Sveučilište u Splitu**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:228:465279>

Rights / Prava: [In copyright](#) / [Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2024-06-26**



Repository / Repozitorij:

[Repository of University Department of Professional Studies](#)



UNIVERSITY OF SPLIT



SVEUČILIŠTE U SPLITU

SVEUČILIŠNI ODJEL ZA STRUČNE STUDIJE

Preddiplomski stručni studij Elektroenergetika

DOMAGOJ ZLOIĆ

ZAVRŠNI RAD

**PETLJASTI ARMATURNI NAMOT SINKRONOG
GENERATORA**

Split, lipanj 2023.

SVEUČILIŠTE U SPLITU

SVEUČILIŠNI ODJEL ZA STRUČNE STUDIJE

Preddiplomski stručni studij Elektroenergetika

Predmet: Električni strojevi I

ZAVRŠNI RAD

Kandidat: Domagoj Zloić

Naslov rada: Petljasti armaturni namot sinkronog generatora

Mentor: Višnja Troškot, pred.

Split, lipanj 2023.

SADRŽAJ

SAŽETAK.....	1
1. UVOD	2
2. SINKRONI GENERATOR	3
2.1. Osnovna obilježja sinkronog generatora	4
2.2. Princip rada sinkronog generatora.....	6
2.3. Induciranje <i>ems</i> sinkronog generatora.....	10
2.4. Utorska zvijezda.....	13
2.5. Uzbudni namot sinkronog generatora	16
2.6. Jednofazni sinkroni generator	18
3. ARMATURNI NAMOT SINKRONOG GENERATORA	19
3.1. Armaturni namot	20
3.2. Izvedbe armaturnog namota	20
3.3. Zonski faktor namota	23
3.4. Faktor namota za više harmonike.....	24
3.5. Trofazni namot	28
4. PETLJASTI NAMOT SINKRONOG GENERATORA	31
4.1. Trofazni jednoslojni petljasti namot s cijelim brojem utora po polu i fazi	31
4.2. Trofazni dvoslojni namot s cijelim brojem utora po polu i fazi.....	36
4.3. Dvoslojni petljasti skraćeni namot	38
4.4. Jednofazni jednoslojni namot.....	41
5. ZAKLJUČAK	44
LITERATURA.....	45
POPIS SLIKA	46
POPIS TABLICA.....	48

SAŽETAK

Petljasti armaturni namot sinkronog generatora

U ovom radu opisat će se petljasti namot sinkronog generatora te njegove primjene, prednosti i nedostaci. U prvom dijelu rada bit će objašnjene osnove sinkronog generatora, uključujući njegovu strukturu, radni princip i važnost u proizvodnji električne energije. U drugom dijelu rada fokus će biti na petljastom namotu te njegovoj strukturi i funkciji.

Ključne riječi: električni stroj, sinkroni generator, utorska zvijezda, armaturni namot, viši harmonici, petljasti namot.

SUMMARY

Lap armature winding of a synchronous generator

This paper will describe the lap winding of the synchronous generator and its applications, advantages, and disadvantages. In the first part of the work, the basics of the synchronous generator will be explained, including its structure, working principle and importance in the production of electrical energy. In the second part of the paper the focus will be on the lap winding and its structure and function.

Keywords: electric machine, synchronous generator, vector star, armature winding, higher harmonic, lap winding.

1. UVOD

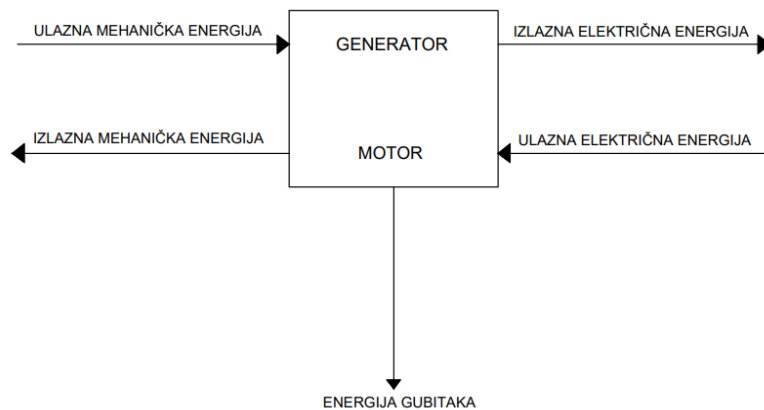
Sinkroni generatori su ključni dijelovi električne infrastrukture, a često se koriste za proizvodnju električne energije. Jedna od ključnih komponenti sinkronog generatora je namot statora, koji se sastoji od zavojnica obavijenih oko statorske jezgre. Postoje dvije vrste namota s obzirom na način namatanja, petljasti i valoviti, a fokus ovog rada je petljasti namot.

Petljasti namot je vrsta namota koji se koristi u sinkronim generatorima. U ovom namotu zavoji su raspoređeni u petlje na obodu statora, stvarajući tako skupine namota koje se protežu duž dijela statora. U drugom poglavlju opisan je sinkroni generator, njegova svojstva, princip rada i način induciranja elektromotorne sile na statorskim vodičima. U trećem poglavlju fokus je na armaturnom dijelu sinkronog generatora, odnosno na njegovoj izvedbi i načinu namatanja u svrhu poništavanja viših harmoničnih članova. U zadnjem dijelu rada objašnjen je petljasti namot sinkronog generatora.

2. SINKRONI GENERATOR

Električni strojevi pretvaraju jedan oblik energije u drugi. Svaki električni stroj može raditi kao generator i kao motor. Električni strojevi najčešće se koriste kao generatori, koji pretvaraju mehaničku energiju u električnu ili kao elektromotori, koji pretvaraju električnu energiju u mehaničku. Pri pretvorbi energije dolazi do gubitaka u okolni prostor u obliku topline, pri čemu je isporučena snaga manja od snage na izvoru. Proces pretvorbe energije može biti reverzibilan, gdje se energija može pretvoriti u oba smjera, ili ireverzibilan, gdje se pretvorba energije odvija samo u jednom smjeru.

Slika 2.1. prikazuje pretvorbu energije u električnom stroju.



Slika 2.1. Pretvorba energije

Električni strojevi su rotirajući strojevi i uključuju generatore i elektromotore, dok energetske transformatori pretvaraju električnu energiju jednih u električnu energiju drugih parametara. Transformatori i električni strojevi rade na principu elektromagnetske indukcije, pri kojoj se na zavojima vodiča inducira napon ako se mijenja magnetski tok što ga taj vodič obuhvaća ili ako se vodič kreće u odnosu na mirujuće polje magnetske indukcije, odnosno konstantni tok.

Kada se izmjenični napon narine na primarni namot transformatora, poteći će izmjenična struja, stvarajući promjenjivi magnetski tok, koji se zatvara kroz jezgru, inducirajući napon na

sekundarnom namotu. Inducirani napon ovisi o broju zavoja u primarnom i sekundarnom namotu. Rad transformatora temelji se na ovom principu. Inducirani napon naziva se napon translacije.

U rotacijskim strojevima postoje uvijek oba napona: translacijski i rotacijski. Napon se može inducirati i ako je magnetsko polje konstantno, odnosno statično, u slučaju permanentnog magneta ili istosmjerno napajanog elektromagneta, ali se vodič mora gibati u odnosu na magnetsko polje. U električnim strojevima gibanje je prvenstveno rotacijsko pa se napon izazvan takvim, kružnim, gibanjem naziva rotacijski napon.

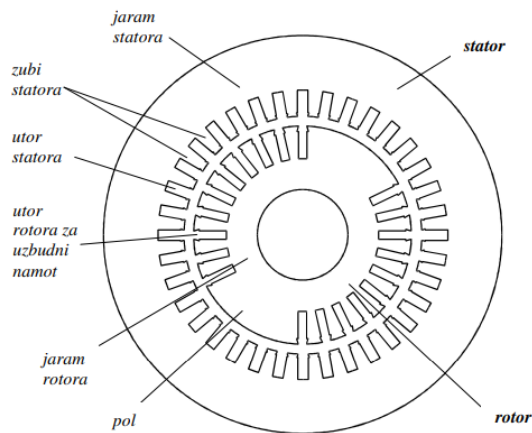
Sinkroni generatori su strojevi velikih snaga koji mogu prelaziti i 1000 [MVA]. Zbog svog značaja u elektroenergetskom sustavu i velikih snaga njegova izrada je vrlo zahtjevna te zahtijeva izgradnju elektrana. Sinkroni generatori se najčešće izvode u trofaznoj izvedbi, iako postoje i u jednofaznoj. U trofaznom generatoru tri jednofazna namota na statoru su pomaknuta za 120° , dok su u jednofaznoj izvedbi statorski vodiči spojeni u seriju, odnosno u jednu fazu. Prema pogonskom stroju sinkroni generatori se dijele na turbogeneratore, hidrogeneratore i dizelgeneratore.

2.1. Osnovna obilježja sinkronog generatora

Sinkroni generator je električni stroj čiji se rotor vrti brzinom jednako brzini okretnog magnetskog polja. Stator je nepomični dio stroja, na koji je namotan armaturni namot, ravnomjerno raspoređen po utorima stroja. Takav namot može imati jednu ili više faza, a najčešća izvedba je sa tri faze. Na njemu se inducira napon uslijed promjene magnetskog toka.

Rotor je pokretni dio stroja na koji je kod klasičnog sinkronog generatora namotan uzbudni namot.

Slika 2.2. predstavlja presjek dvopolnog sinkronog generatora.



Slika 2.2. Dvopolni sinkroni generator [1]

Vodičima uzbudnog namota teče istosmjerna struja, koja stvara statičko magnetsko polje. Vanjska mehanička sila djeluje na okretanje rotora preko pogonskog stroja, a statičko magnetsko polje postaje okretno. Silnice okretnog magnetskog polja sijeku vodiče statora i u njima induciraju elektromotornu silu (*ems*). Pri konstantnoj brzini rotora *ems* statorskog vodiča u vremenu ima isti oblik kao magnetsko polje. Rotor je, u slučaju jednog para polova, u biti magnet sa sjevernim i južnim polom. Ako rotor ima jedan par polova, elektromotorna sila će se potpuno promijeniti tijekom jednog okretaja od 360 mehaničkih stupnjeva. U elektroenergetskom sustavu treba postojati konstantna i stabilna frekvencija pa i brzina vrtnje rotora mora biti konstantna, određena izrazom za sinkronu brzinu vrtnje: [1]

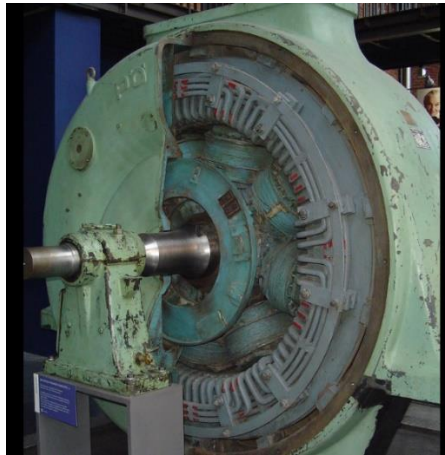
$$n = \frac{60f}{p}, \quad (2.1)$$

gdje je:

- *n* - brzina vrtnje rotora [o/min],
- *p* - broj parova polova,
- *f* - frekvencija [Hz].

Iz formule je vidljivo da je, ako stroj ima više pari polova, potrebna manja brzina okretaja da bi se dobila željena frekvencija.

Slika 2.3. prikazuje sinkroni generator sa izraženim polovima.



Slika 2.3. Sinkroni generator sa izraženim polovima [2]

Prema brzini vrtnje sinkroni generatori se dijele na brzohodne i sporohodne.

U brzohodne strojeve spadaju turbogeneratori. To su generatori koji se koriste za pogone parnim ili plinskim turbinama. Takvi generatori imaju veliku brzinu vrtnje te mali broj parova polova. Za turbogeneratore u europskoj izvedbi brzina rotora najčešće iznosi 3000 [o/min].

U sporohodne generatore najčešće spadaju hidrogeneratori, odnosno generatori koji se pogone vodenim turbinama te se koriste u hidroelektranama. Mala brzina vrtnje zahtjeva veliki broj parova polova te se brzina vrtnje najčešće kreće od 50-500 [o/min].

Postoje još i dizelski generatori koji su manjih snaga, a služe za napajanje vlastite mreže, primjerice na brodu, i kompenzatori, koji se ne koriste za pretvorbu energije, već se koriste da bi opskrbili mrežu jalovom energijom.

2.2. Princip rada sinkronog generatora

Elektromagnetska indukcija je najbitnija fizikalna veličina kod rotacijskih strojeva. Ona se može ostvariti na dva načina.

Na vodič kojim teče struja i koji se nalazi u magnetskom polju djelovat će sila, odnosno vodič se počinje gibati i na njemu se inducira *ems*.

Ako na vodič koji se nalazi u magnetskom polju djeluje vanjska sila, on se počinje gibati te se može inducirati napon na vodiču.

Sinkroni strojevi spadaju u rotacijske strojeve te mogu raditi u generatorskom ili motorskom režimu rada. Fokus će biti na sinkronom generatoru na čijem se rotoru nalazi istosmjerna uzbuđa te trofazni armaturni namot na statoru.

Svaki vodič koji se kreće brzinom v u magnetskom polju B inducirat će napon čiji je smjer određen pravilom desne ruke. Inducirani napon vodiča na rotoru električnih strojeva, s obzirom na međusobnu okomitost fizikalnih veličina, može se izraziti skalarnom jednačinom: [3]

$$E = Blv, \quad (2.2)$$

gdje je:

- E - inducirani napon [V],
- B - magnetska indukcija [T],
- v - brzina vodiča kroz magnetsko polje [m/s].

Ako je strujni krug zatvoren, struja će teći kroz vodič, u istom smjeru kao inducirani napon. Prolaskom električne struje kroz vodič javlja se sila koja je usmjerena suprotno smjeru gibanja vodiča. Smjer sile određen je pravilom lijeve ruke, odnosno, u skalarnom obliku, za vodiče u električnim strojevima:

$$F = Bil, \quad (2.3)$$

gdje je:

- F - sila koja djeluje na vodič [N],
- I - struja kroz vodič [A],
- B - magnetska indukcija [T],
- l - duljina vodiča [m].

Napon i struja djeluju u istom smjeru pa je obavljeni rad pozitivan, dok mehanička sila F , obavlja rad koji je u suprotnom smjeru od gibanja vodiča te ima negativni predznak:

$$dW_m = -F * v * dt = -B * I * l * v * dt, \quad (2.4)$$

$$dW_e = E * i * dt = v * b * I * l * dt, \quad (2.5)$$

$$dW_e = -dW_m, \quad (2.6)$$

gdje je:

- dW_e - električni rad [W],
- dW_m - mehanički rad [W].

Iz navedenih formula vidljivo je, da bi se obavio električni rad, potrebno je na vodič djelovati nekom vanjskom silom. Stoga rotacijski strojevi uvijek imaju jedan pomični dio, koji se zove rotor i nepomični dio, koji se zove stator. Dovođenje vanjske sile na vodič koji se nalazi u magnetskom polju je uvjet rada generatora.

Ako se na krajeve vodiča koji se nalazi u magnetskom polju priključi napon koji će potjerati struju stvara se sila (pravilo lijeve ruke). Zbog djelovanja sile vodič se počinje gibati određenom brzinom. Na vodič koji se giba unutar magnetskog polja inducira se napon koji je suprotnog smjera (pravilo desne ruke) od priključenog napona te je električni rad negativan, dok je mehanički rad pozitivan: [3]

$$dW_e = -E * I * dt \quad (2.7)$$

$$dW_m = F * v * dt \quad (2.8)$$

Ako se na vodič koji je dio zatvorenog strujnog kruga i koji se nalazi u magnetskom polju priključi napon, na njega će djelovati sila koja će uzrokovati gibanje vodiča. Takvo gibanje vodiča predstavlja osnovu rada elektromotora.

Iz prethodnih relacija može se odrediti bilo mehanička ili električna snaga, koje su najvažniji faktor pri izradi bilo motora ili generatora:

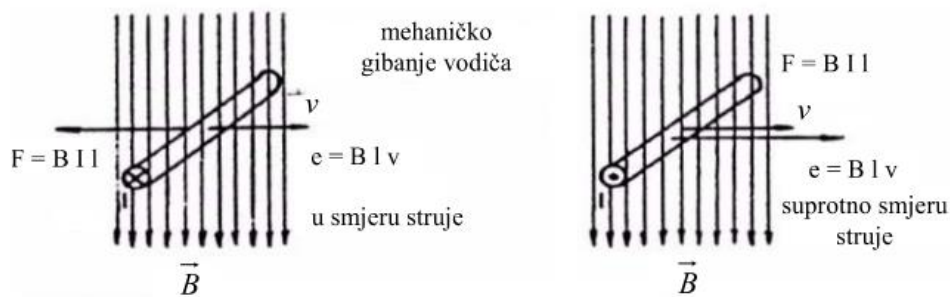
$$P_e = E * I = B * l * v * I, \quad (2.9)$$

$$P_m = F * v = B * I * l * v, \quad (2.10)$$

gdje je:

- P_e - električna snaga [W],
- P_m - mehanička snaga [W].

Slika 2.4. prikazuje gibanje vodiča unutar magnetskog polja.



Slika 2.4. Kretanje vodiča u magnetskom polju [3]

Kod rotacijskih strojeva, bilo generatora ili motora, gibanje vodiča je uvijek kružnog karaktera te postoji odnos između snage i energije:

$$P = \frac{dW}{dt} = \frac{M * d\alpha}{dt} = M * \omega, \quad (2.11)$$

gdje je:

- P - snaga [W],
- M - moment [Nm],
- α - kut zakreta,
- ω - kutna brzina [rad/s].

Vodiči u električnim strojevima se nalaze na obodu rotora koji se može slobodno kretati. Moment vrtnje može se izraziti formulom:

$$M = F * r, \quad (2.12)$$

gdje je:

- M - moment [Nm],
- F - sila na vodič [N],
- r - polumjer rotora [m].

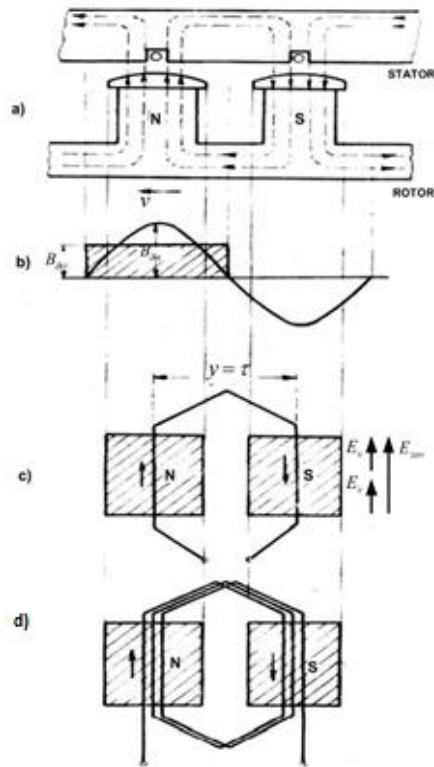
Moment je bitna fizikalna veličina kod električnih strojeva, jer razvijeni električni moment pri njihovom radu treba savladati moment tereta u motorskom režimu rada ili protumoment na osovini kod generatorskog režima rada.

Kutna brzina vrtnje mjeri se u radijanima po sekundi. Svaki puni okretaj predstavlja 2π radijana, odnosno 360° , dok je brzina vrtnje n broj punih okretaja unutar jedne minute:

$$\omega = \frac{2\pi * n}{60} \quad (2.13)$$

2.3. Induciranje *ems* sinkronog generatora

Za induciranu elektromotornu silu u jednom vodiču, zavoju i namotu promatra se slika 2.5.



Slika 2.5. Induciranje *ems* [3]

Rotor čine magnetski polovi permanentnog magneta, dok su u statoru smješteni vodiči na kojima se inducira *ems*. Rotor se sastoji od polova koji mogu biti izrađeni od željeza ili od limova. Kod sinkronog generatora uzбудni namot smješten je na rotor i napajan je istosmjernom strujom radi jače indukcije. Izvedba rotora može biti cilindrična ili sa istaknutim polovima. Crticama je prikazan magnetski tok koji prolazi od sjevernog magnetskog pola (N), kroz zračni raspor između rotora i statora pa kroz stator te ponovno kroz zračni raspor do južnog magnetskog pola (S) (slika a). Magnetsko polje u zračnom rasporu mijenja se po sinusnom zakonu (slika b). Sinusni oblik magnetskog polja dobiva se zbog oblika magnetskih polova. Magnetski tok je maksimalan gdje je zračni raspor najmanji, dok je magnetski tok najmanji gdje je zračni raspor najveći. Ako se rotor okreće, dobiva se okretno magnetsko polje, koje presijeca vodiče na mirujućem statoru i u njima se inducira *ems*.

Efektivna vrijednost *ems* u vodiču je:

$$E = l_s v B_\delta, \quad (2.14)$$

gdje je:

- E - inducirana elektromotora sila [V],
- l_s - duljina vodiča koja presijeca magnetsko polje [m],
- v - brzina magnetskog polja u odnosu na vodič [m/s],
- B_δ - efektivna vrijednost magnetske indukcije [T].

E_{ms} se izražava preko srednje vrijednosti po polu, što je prikazano kao $B_{\delta sr}$ na slici 2.5:

$$B_{\delta sr} = \frac{2}{\pi} B_{\delta m}, \quad (2.15)$$

gdje je:

- $B_{\delta sr}$ - srednja vrijednost magnetske indukcije,
- $B_{\delta m}$ - maksimalna vrijednost magnetske indukcije.

Omjer između efektivne i srednje vrijednosti magnetske indukcije naziva se faktor oblika:

$$\xi = \frac{B_\delta}{B_{\delta sr}} \quad (2.16)$$

Kod sinusnih funkcija faktor oblika iznosi:

$$\xi = \frac{\pi}{2} \sqrt{2} = 1,11 \quad (2.17)$$

Efektivna vrijednost e_{ms} u vodiču kod sinusne raspodjele magnetskog toka je:

$$E_v = 2\xi f \phi = 2,22 f \phi, \quad (2.18)$$

pri čemu ϕ predstavlja magnetski tok [Wb], a f frekvenciju u [Hz].

Za induciranu elektromotornu silu u jednom zavoju promatra se slika 2.5. pod c).

Dva vodiča nalaze se pod suprotnim polovima te će se na njima inducirati e_{ms} jednakih iznosa i suprotnih predznaka. Vodiči koji se nalaze pod suprotnim polovima i povezani u seriju čine jedan zavoj. Razmak između dva vodiča, koji čine jedan zavoj naziva se zavojni korak (y). E_{ms} pojedinih vodiča se zbrajaju pa je e_{ms} jednog zavoja dana izrazom:

$$E_{zav} = 2E_v = 4,44f\phi \quad (2.19)$$

Sinkroni generatori proizvode vrlo visoke napone pa se namot statora sastoji od više zavoja spojenih u seriju, što je prikazano na slici 2.5. pod d). Inducirana ems za stroj s jednim parom polova i N_z zavoja vrijedi:

$$E = 2E_v N_z = 4,44N_z f \phi \quad (2.20)$$

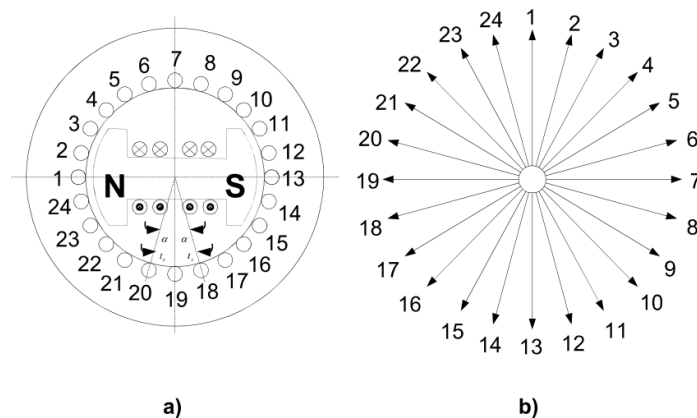
Ako stroj ima više pari polova p , izraz za induciranu ems je:

$$E = 2pE_v N_z = 4,44pN_z f \phi \quad (2.21)$$

2.4. Utorska zvijezda

U magnetskom polju indukcijskog namota, inducirana ems se može izraziti kao utorska zvijezda koja rotira kutnom brzinom $\omega=2\pi f$. Vektori utorske zvijezde fazno su pomaknuti za kut koji odgovara vremenu potrebnom da maksimalno magnetsko polje prođe kroz razmak između dva utora.

Slika 2.6. daje vektorski prikaz induciranih napona kod dvopolnog generatora.



Slika 2.6. Vektorski prikaz induciranih napona [3]

Na slici 2.6. (a) prikazan je generator s 24 utora $N=24$ i jednim parom polova $p=1$, što znači da je rotor dvopolni (jedan sjeverni i južni pol). Maksimalni napon unutar utora 1 inducirat će se kad je magnetski tok maksimalan, odnosno kad je kut između osi pola i utora $\alpha = 0$. U drugom utoru inducira se maksimalni napon kad se na njegovu mjestu pojavi maksimalna indukcija, što će se dogoditi za vrijeme Δt kasnije u odnosu na početni utor. Vrijeme Δt je vrijeme potrebno da maksimalni magnetski tok prijeđe razmak između dva utora. Kut između dva utora na statoru može se izraziti kao: [3]

$$\alpha_g = \frac{360^\circ}{N}, \quad (2.22)$$

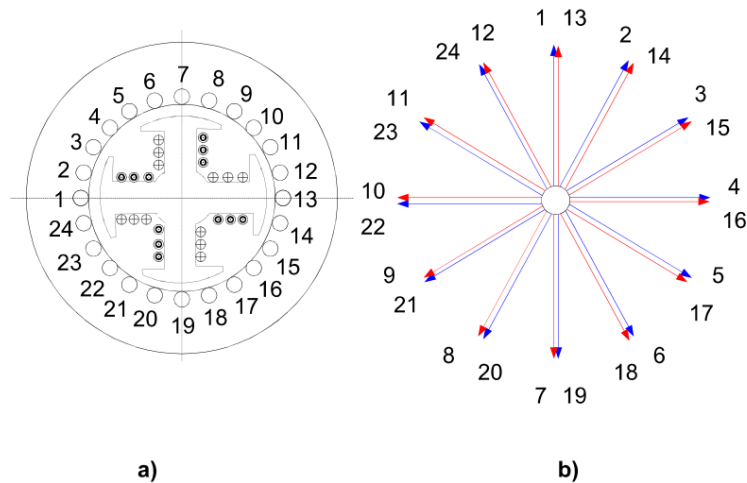
gdje je:

- α_m - geometrijski ili mehanički kut između dva utora,
- N - broj utora.

Maksimalna vrijednost indukcije (i magnetskog toka) je u osima polova, samo je suprotnih predznaka. Rotor svojim sjevernim polom zahvaća vodič unutar utora 1 te vodič koji se nalazi unutar utora 13, kad sjeverni pol zahvaća vodič u utoru 2, južni pol zahvaća vodič unutar utora 14, itd. Kako su vodiči spojeni serijski, njihove *ems* se zbrajaju te se dobije izraz za efektivnu vrijednost *ems* zavoja, primjerice 1-13, prema formuli (2.19):

$$E_{zav\ 1-13} = 2E_v = 4,44f\phi \quad (2.23)$$

Slika 2.7. daje vektorski prikaz induciranih napona kod četveropolnog generatora.



Slika 2.7. Vektorski prikaz induciranih napona kod četveropolnog generatora [3]

Kod četveropolnog generatora sa slike 2.7. ($p=2$, dva para polova) mehanički ili geometrijski kut je ostao isti kao i kod dvopolnog generatora sa slike 2.6., zbog istog broja utora. Geometrijski kut između susjednih utora ne ovisi o broju polova na rotoru sinkronog generatora, već on ovisi isključivo o broju utora, dok električni kut ovisi o broju polova. Za četveropolni generator, odnosno $p=2$, za jedan puni okret sjeverni i južni pol dva puta mogu prijeći preko dva ista vodiča. Tako se promijenio električni kut te je on za četveropolni generator dva puta veći od mehaničkog. [3]

$$\alpha_e = 2\alpha_g, \quad (2.24)$$

gdje je:

- α_e - električni kut,
- α_g - geometrijski kut i općenito vrijedi.

$$\alpha_e = p * \alpha_g \quad (2.25)$$

Broj pari polova unutar sinkronog generatora utječe na njegovu brzinu. Svaki sinkroni generator proizvodi napon i frekvenciju određene veličine za Europu 50 [Hz]. Što stroj ima veći broj parova polova, njegova brzina vrtnje je manja.

U tablici 2.1. su prikazane brzine vrtnje sinkronih generatora za 50 [Hz].

Tablica 2.1. Brzine vrtnje sinkronih strojeva za 50 [Hz]

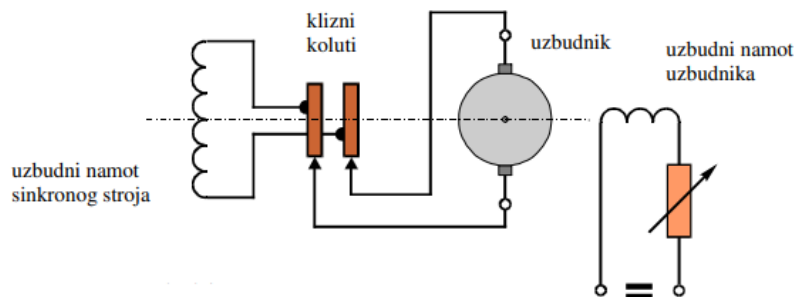
p	1	2	3	4	5	15
n [min ⁻¹]	3000	1500	1000	750	600	200

2.5. Uzbudni namot sinkronog generatora

Da bi se rotor mogao okretati, između njega i statora mora postojati zračni raspor. Kad kroz uzbudni namot protječe istosmjerna struja, ona stvara magnetski tok koji je potreban da bi se na vodičima statora inducirala *ems*. Uzbudni namot sinkronog stroja smješten je na rotoru koji može biti cilindričan ili sa istaknutim polovima. Cilindrični rotor najčešće ima jedan par polova, dok rotor sa istaknutim polovima ima više parova polova. Struja koja teče uzbudnim namotom naziva se uzbudna struja. Uzbudni namot napaja se iz izvora istosmjerne struje. Uzbudni sustavi sinkronih strojeva dijele se na dinamičke, statične i beskontaktno sustave.

U dinamičkim sustavima uzbudni namot se napaja pomoću istosmjernog generatora. Dinamički sustavi se izbjegavaju zbog kolektora na uzbudniku.

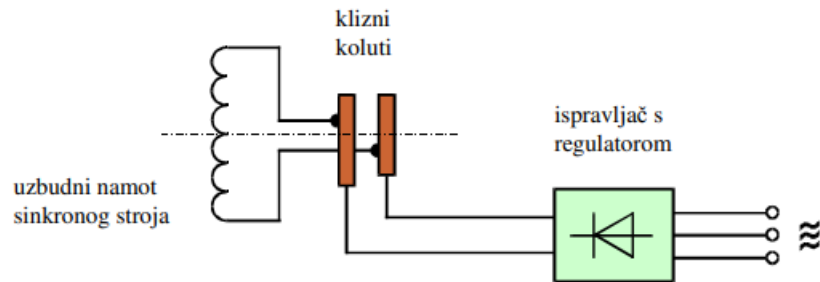
Slika 2.8. prikazuje dinamičku uzbudu.



Slika 2.8. Dinamička uzbuda [1]

Kod statičke uzbude istosmjerni generator je zamijenjen ispravljačkim uređajem. Struja iz izmjeničnog izvora se ispravlja pomoću tiristorskih ispravljača na koje djeluje regulator uzbude. Statička uzbuda je pouzdanija od dinamičke, iako i dalje ostaje problem kliznih prstena i četkica.

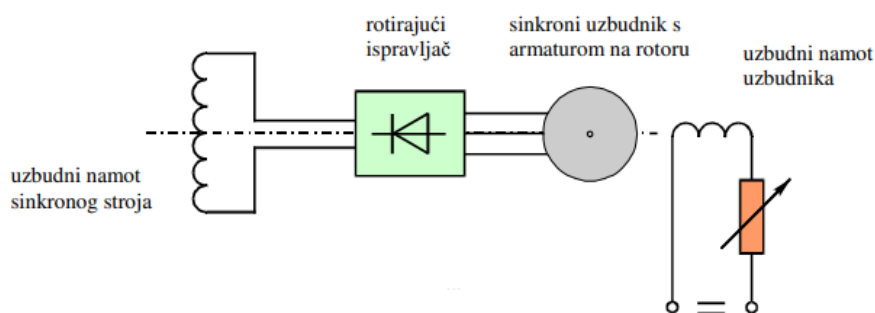
Slika 2.9. prikazuje statičku uzbuđu.



Slika 2.9. Statička uzbuđa [1]

U beskontaktnom rješenju kao uzбудnik se koristi pomoćni sinkroni generator koji ima uzbuđu na statoru, a armaturu na rotoru. Pomoćni generator, zajedno s ispravljačkim uređajem je spojen na osovinu generatora i s njim se zajedno vrti. Uzbuđna struja se regulira pomoću uzbuđe pomoćnog generatora. Ovakvo rješenje ne zahtjeve četkice i klizne prstene, stoga je jednostavnije za održavanje. [1]

Slika 2.10. prikazuje beskontaktnu uzbuđu.



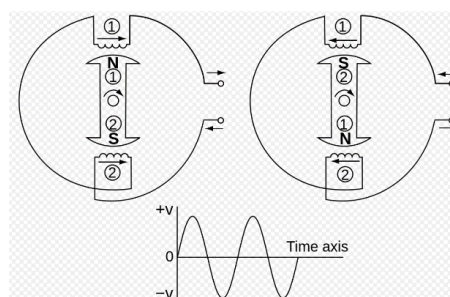
Slika 2.10. Beskontaktna uzbuđa [1]

2.6. Jednofazni sinkroni generator

Jednofazni generator je električni generator izmjenične struje koji proizvodi jednofazni izmjenični napon. Jednofazni generatori mogu se koristiti za proizvodnju struje u jednofaznim elektroenergetskim sustavima. Međutim, trofazni generatori općenito se koriste za isporuku energije u trofaznom sustavu, a struja se pretvara u jednofaznu u blizini jednofaznih opterećenja. Konstrukcija jednofaznog generatora ima dio armature na rotoru, a dio uzbude na statoru. Osnovni dizajn jednofaznog generatora prikazan je na slici 2.11. Sastoji se od dva magnetska pola, sjevernog i južnog, koji su pričvršćeni na rotor i dvije zavojnice, koje su spojene u seriju i jednako razmaknute na statoru.

Namoti dviju zavojnica su u suprotnom smjeru da bi struja tekla u istom smjeru, jer dvije zavojnice uvijek međusobno djeluju na suprotnim polaritetima. Budući da su polovi i zavojnice jednako razmaknute i da se položaji polova poklapaju s položajima zavojnica, naponi inducirani na namote imaju istu vrijednost u bilo kojem trenutku. Naponi iz obje zavojnice su međusobno u fazi. Stoga je ukupni izlazni napon dvostruko veći od napona inducirano u svakom namotu. Na slici 2.11. na mjestu gdje se susreću pol broj 1 i svitak broj 1, generator proizvodi najveći izlazni napon u jednom smjeru. Kako se rotor okreće za 180° , izlazni napon se izmjenjuje, kako bi proizveo najveći napon u drugom smjeru. Frekvencija na izlazu odgovara brzini okretanja rotora.

Slika 2.11. prikazuje princip rada jednofaznog sinkronog generatora.



Slika 2.11. Princip rada jednofaznog sinkronog generatora [9]

Za razliku od trofazne izvedbe, jednofazni generatori koriste se za mala jednofazna opterećenja koja ne prelaze 8 [kW]. Obično se koriste na gradilištima ili u stambenim okruženjima.

3. ARMATURNI NAMOT SINKRONOG GENERATORA

Kako bi se sinkroni stroj što bolje iskoristio, potrebno je na rotor i stator postaviti što više vodiča koji su međusobno spojeni kako bi se dobili optimalni napon i struja. Svi tako raspoređeni vodiči na rotoru i statoru čine namot statora i namot rotora. Prolaskom struje kroz namote stroja stvara se magnetsko polje. Oni namoti čija je osnovna namjena stvaranje magnetskog polja nazivaju se uzbudni namoti, dok oni kojima je svrha inducirati napon i tako sudjelovati u pretvorbi energije nazivaju se radni ili armaturni namoti.

Uzбудni namot obično je postavljen na rotor. Kroz njega prolazi istosmjerna struja, stvarajući magnetsko polje potrebno za elektromagnetsku pretvorbu. Izvedba namota, njihovo spajanje i položaj unutar stroja može biti različita. Namot kod kojeg su svi vodiči smješteni u jednom utoru, odnosno namotani oko željezne jezgre naziva se koncentrirani namot.

Da bi se stroj bolje iskoristio, odnosno da bi se postigla veća *ems*, namoti se ne postavljaju koncentrično, nego se više namotanih dijelova veže u seriju pod jednim polom.

U električnim strojevima koristi se još i prigušni namot koji se koristi u svrhu:

- prigušenja mehaničkih naprezanja sinkronog stroja zbog poremećaja u mreži,
- prigušenja inverznog okretnog polja kod nesimetričnog opterećenja po fazama,
- omogućuje zalet sinkronog motora i kompenzatora.

Metalni dijelovi i vodiči namota stroja, obično izrađeni od bakra, moraju biti međusobno izolirani. Zbog visokih napona i struja, izolacija je važan čimbenik za pouzdan rad i vijek trajanja sinkronih strojeva. Zbog toga su izolacijski materijali i tehnologija proizvodnje namota visoko cijenjeni. Kvaliteta izolacijskog materijala ogleda se u njegovim električnim, mehaničkim, kemijskim i toplinskim svojstvima. Temperatura je također važna karakteristika za produljenje vijeka trajanja izolacije. S obzirom na toplinsku postojanost izolacijski materijali se dijele u klase prema tablici 3.1.

Tablica 3.1. Klase izolacijskih materijala

Klasa	Y	A	E	B	F	H	C
Maksimalna temp. [°C]	90	105	120	130	155	180	>180

3.1. Armaturni namot

Armaturni namot sinkronog generatora je namot na kojem se inducira napon i kojim prolazi struja opterećenja. Mora biti dimenzioniran da trajno izdrži nazivni napon. Da bi se dobio odgovarajući napon, sastoji se od niza vodiča koji tvore zavoje i zavojnice. Svi međusobno povezani namoti čine fazni namot. U sinkronom generatoru tri simetrično raspoređena namota uvijek su oblikovana u tri faze, koje su međusobno pomaknute za 120 stupnjeva. Kod sinkronog generatora su namoti gotovo uvijek spojeni u zvijezdu. Vodiči su postavljeni ravnomjerno raspoređeni po cijelom obodu statora. Dimenzije poprečnog presjeka vodiča su primjerene odgovarajućoj struji, a u slučaju najvećih strojeva izvedene su iz velikog broja vodiča, tako da presjek ovih osnovnih vodiča nije prevelik te se tako smanjuju dodatni gubici zbog protjecanja struje.

3.2. Izvedbe armaturnog namota

Ako postoji samo jedna strana svitka u utoru, namot se naziva jednoslojnim, a ako su dvije strane dvaju različitih svitaka u utoru, namot se naziva dvoslojnim.

Prednosti jednoslojnog u odnosu na dvoslojni namot su manji broj svitaka i manje izolacije te su jeftiniji i jednostavniji za izradu od dvoslojnih namota.

Jednoslojni namot ima manju pouzdanost i trajnost u uvjetima visokog napona i temperature. Zbog velikog broja svitaka koji imaju različite dimenzije, mogu imati problema s preplitanjem žica i stvaranjem zagušenja u samom namotu.

Dvoslojni namot ima veću pouzdanost i trajnost od jednoslojnog namota, što znači da su pogodniji za primjene u kojima se očekuju ekstremni uvjeti rada. Mogu tolerirati veće nivoe

napona i temperature nego jednoslojni namot. Imaju veću otpornost na lomove i habanje. Zbog dvoslojne strukture imaju veću gustoću namotaja u istoj veličini, što znači da mogu imati veći kapacitet.

Dvoslojni namoti se najčešće koriste zbog svojih električnih i radnih prednosti. Veličina koraka može se skratiti za dobro poništavanje viših harmonika, a svi svici su jednaki, što je velika prednost u smislu proizvodnje.

S obzirom na način ulaganja namota u utor razlikuju se usipni, utični i uložni namot.

Usipni namot je izrađen od okruglih vodiča. Vodiči se umeću u utor jedan po jedan te se koristi u malim strojevima.

Utični namot se upotrebljava kod strojeva viših napona. Danas se praktički ne upotrebljava.

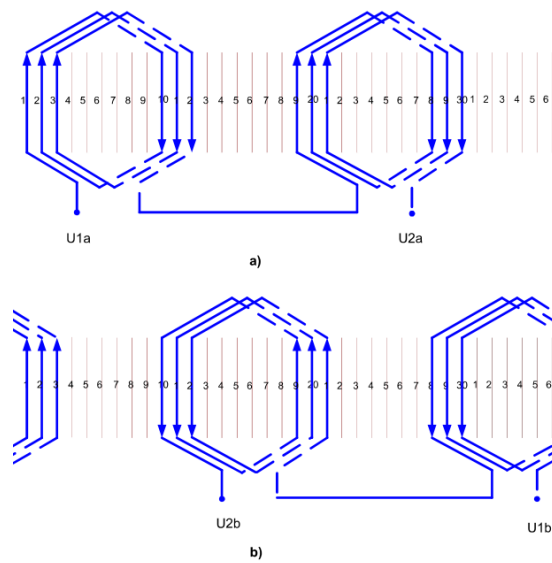
Uložni namot se ulaže u otvorene utore te se primjenjuje kod svih vrsta strojeva.

S obzirom na spoj namota razlikuju se petljasti i valoviti namot.

U petljastom namotu svici ispod jednog para polova spojeni su serijski u nizu, a zatim spojeni na skupinu svitaka ispod drugog para polova. Koristi se u strojevima sa svicima.

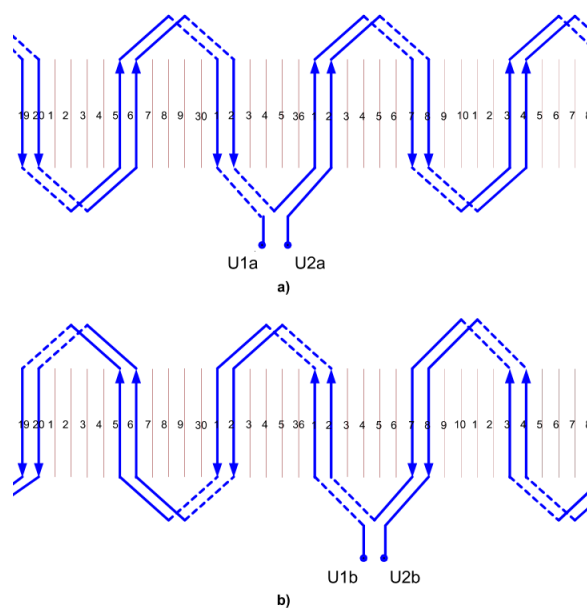
Valoviti namot je izvedba u kojoj je prva šipka povezana sa šipkom koja je pomaknuta za korak svitka. Sljedeća šipka je povezana sa šipkom koja je pomaknuta za spojni korak u istom smjeru. Koristi se kod štapnih namota.

Slika 3.1. prikazuje razvijenu shemu dvoslojnog petljastog namota faze U.



Slika 3.1. Dvoslojni petljasti namot [3]

Slika 3.2. prikazuje razvijenu shemu dvoslojnog valovitog namota faze U.

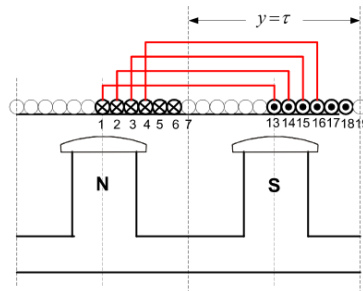


Slika 3.2. Dvoslojni valoviti namot [3]

3.3. Zonski faktor namota

Kako bi se maksimalno iskoristio stroj, armaturni namot se sastoji od nekoliko sekcija namotanih ispod jednog pola i spojenih u seriju. Ovaj namot zauzima cijelu površinu (pojas) volumena statora. Gledajući sliku 3.3. (dvopolni stroj, 24 utora), može se vidjeti da postoji dvanaest utora ispod jednog pola (sjeverni pol 19-6, južni pol 7-18), odnosno udaljenost između dva susjedna pola je dvanaest utora te je korak pola (τ) 12. Spojeni su tako da je korak namota jednak polnom koraku ($y=\tau$) te se može izraziti brojem utora. Na slici je prikazana jedna sekcija (faza) armaturnog namota, koji zauzima trećinu utora statora, odnosno utore 1-4 i 13-16. [3]

Slika 3.3. prikazuje sekciju armaturnog namota.



Slika 3.3. Sekcija armaturnog namota [3]

Ako su u seriju spojena četiri namotana dijela, to znači da cijeli namot zauzima zonu pod jednim polom od 4 utora kao što je prikazano na slici 3.3. E_{ms} namotanih dijelova je:

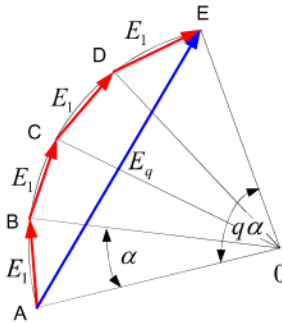
$$e_1 = E_{1m} \cos 0^\circ, \quad e_2 = E_{1m} \cos 15^\circ, \quad e_3 = E_{1m} \cos 30^\circ, \quad e_4 = E_{1m} \cos 45^\circ. \quad (3.1)$$

e_1 je namotani dio 1-13 te on leži u osima polova i u njemu će e_{ms} biti maksimalna. Ostale e_{ms} koje čine namoti 2-14, 3-15, 4-16 su pomaknute za 15° . Stroj je dvopolan pa je električni kut jednak geometrijskom kutu:

$$\alpha = \alpha_g = \frac{360^\circ}{24} = 15^\circ \quad (3.2)$$

Za određivanje zonskog faktora namota promatra se slika 3.4. Geometrijski i električni kut su jednaki i središte se nalazi u točki 0. Kut α označava navedeni kut između dva susjedna utora, dok je kut $q\alpha$ ukupni kut navedene zone (dijela pod istim polom) jedne faze namota.

Slika 3.4. prikazuje određivanje zonskog faktora.



Slika 3.4. Određivanje zonskog faktora namota [3]

Zonski faktor namota za prvi harmonik dan je izrazom:

$$f_z = \frac{E_q}{qE_1} = \frac{\sin \frac{q\alpha}{2}}{q \sin \frac{\alpha}{2}}, \quad (3.3)$$

gdje je:

- f_z - zonski faktor namota,
- q - broj utora po polu i fazi,
- α - kut između dva utora.

3.4. Faktor namota za više harmonike

Kada se stvori magnetsko polje, ono teži biti sinusno, što je samo teoretski moguće jer u praksi uvijek postoji odstupanje. U sinkronim generatorima, viši harmonici su električni signali koji nastaju uslijed rotacije magnetskog polja statora generatora. Generatori općenito proizvode

čiste sinusoidne valne oblike, međutim, viši harmonici mogu biti prisutni kada generator nije savršeno simetričan ili kada se na generator primjenjuje nesimetrično opterećenje.

U slučaju sinkronih strojeva, posebnu pozornost treba posvetiti uklanjanju viših harmoničkih članova (treći, peti i sedmi), budući da propisi nalažu da krivulja napona praznog hoda sinkronog generatora ne smije odstupati od sinusoidnog oblika za više od $\pm 5\%$ najveće vrijednosti osnovnog (prvog) harmoničkog člana.

Treći harmonik se eliminira spajanjem armaturnih namota u trokut, odnosno u zvijezdu bez neutralnog vodiča.

Peti i sedmi harmonik obično se uklanjaju ili smanjuju pomoću faktora skraćivanja koraka ili faktora raspodjele namota.

Pojedini vodiči mogu se spajati u zavoje tako da im korak namota (svitka) bude manji od polnog koraka, u tom se slučaju govori o namotu sa skraćenim korakom.

Napon jednog zavoja bit će manji od algebarskog zbroja napona pojedinih vodiča, a omjer između tih veličina zove se faktor skraćivanja koraka ili tetivni faktor namota:

$$f_t = \sin\left(\frac{y}{\tau} * \frac{\pi}{2}\right), \quad (3.4)$$

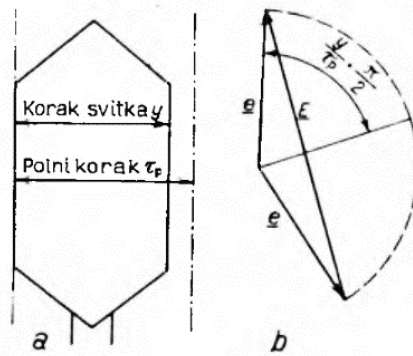
gdje je:

- f_t - tetivni faktor ili faktor skraćivanja koraka,
- y - širina svitka,
- τ - polni korak.

Ukupni faktor namota je umnožak zonskog i tetivnog faktora namota:

$$f_n = f_t * f_z \quad (3.5)$$

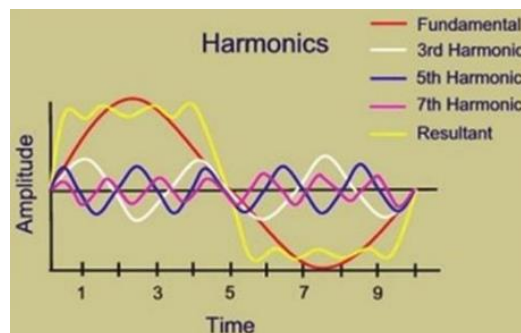
Slika 3.5. prikazuje određivanje tetivnog faktora namota.



Slika 3.5. Tetivni faktor namota [4]

Amplituda svakog harmonika višeg reda je manja onoliko puta koliki je red harmonika, dok je frekvencija toliko puta veća.

Slika 3.6. prikazuje osnovni i harmonike višeg reda.



Slika 3.6. Harmonici višeg reda [5]

Tetivni faktor za harmonike višeg (ν) reda definiran je izrazom:

$$f_{tv} = \sin \left(\nu * \frac{y}{\tau} * \frac{\pi}{2} \right) \quad (3.6)$$

Zonski faktor namota za harmonike višeg (ν) reda definiran je izrazom:

$$f_{zv} = \frac{E_q}{qE_1} = \frac{\sin \frac{qv\alpha}{2}}{q \sin \frac{v\alpha}{2}} \quad (3.7)$$

Uvažavajući formule 3.6 i 3.7, ukupni faktor namota za harmonike višeg reda umnožak je zonskog i tetivnog faktora namota:

$$f_{nv} = f_{tv} * f_{zv} \quad (3.8)$$

Izjednačavanjem zonskog ili tetivnog faktora namota s nulom harmonici višeg reda bit će poništeni.

Tablica 3.2. Prikazuje iznose tetivnih faktora prvog i viših neparnih harmonika u ovisnosti o omjeru koraka svitka i širine polnog koraka.

Tablica 3.2 Tetivni faktor namota [4]

ν $y_{\tau p}$	1	3	5	7	9	11
2/3	0,866	0	-0,866	0,866	0	-0,866
4/5	0,951	-0,589	0	0,589	-0,951	0,951
6/7	0,975	-0,766	0,423	0	0,455	0,799
8/9	0,985	-0,866	0,643	-0,342	0	0,342
10/11	0,988	-0,193	0,743	-0,545	0,292	0

Izraz za tetivni faktor namota pokazuje da se skraćivanjem namota potpuno poništava harmonički član višeg napona, dok se osnovni član malo smanjuje. Skraćivanje namota se obično odabire da bi se što više potisnuli članovi 5. i 7. harmonika, budući da se treći harmonik i njegovi višekratnici poništavaju spajanjem trofaznog sustava (sustava bez neutralnog vodiča).

Viši harmonici mogu se smanjiti spajanjem namota statora, tj. odabirom broja potrebnih utora po polu i po fazi.

Tablica 3.3. prikazuje broj utora po polu i fazi za viši red harmonika.

Tablica 3.3. Broj utora po polu i fazi za viši red harmonika [4]

$q \backslash \nu$	1	3	5	7	9	11
1	1	1	1	1	1	1
2	0,966	0,707	0,259	-0,259	-0,707	-0,966
3	0,960	0,667	0,217	-0,177	-0,333	-0,177
4	0,958	0,654	0,205	-0,180	-0,270	-0,126
6	0,957	0,644	0,197	-0,145	-0,236	-0,102
8	0,955	0,637	0,191	-0,136	-0,212	-0,087

Za jedan utor po polu po fazi zonski faktor namota za sve harmonike jednak je 1, što znači da nema odstupanja te oblik polja točno prati krivulju napona. Za veliki broja utora po polu i fazi faktor namota osnovnog harmonika je 4,5% niži od 1, dok je faktor namota viših harmonika znatno manji. Iz tablice 3.3. može se zaključiti da čak i sa tri utora po polu i fazi viši harmonici su dovoljno prigušeni. Ako geometrija stroja ne dopušta toliko utora po polu i fazi, koristi se razlomljeni namot. U generatoru s velikim brojem polova razmak polova je relativno mali, tako da je broj mogućih utora po polu ograničen. Ako je q manji od tri, koristi se takozvani razlomljeni namot, gdje q nije cijeli broj.

Elektromotorna sila inducirana u faznom namotu za viši harmonik (ν).

$$E_{f\nu} = E_{fn} * f_{n\nu}, \quad (3.9)$$

gdje je:

- $E_{f\nu}$ - inducirana elektromotorna sila,
- E_{fn} - *ems* inducirana u faznom namotu bez utjecaja raspodjele namota,
- $f_{n\nu}$ - ukupni faktor namota za viši harmonik.

3.5. Trofazni namot

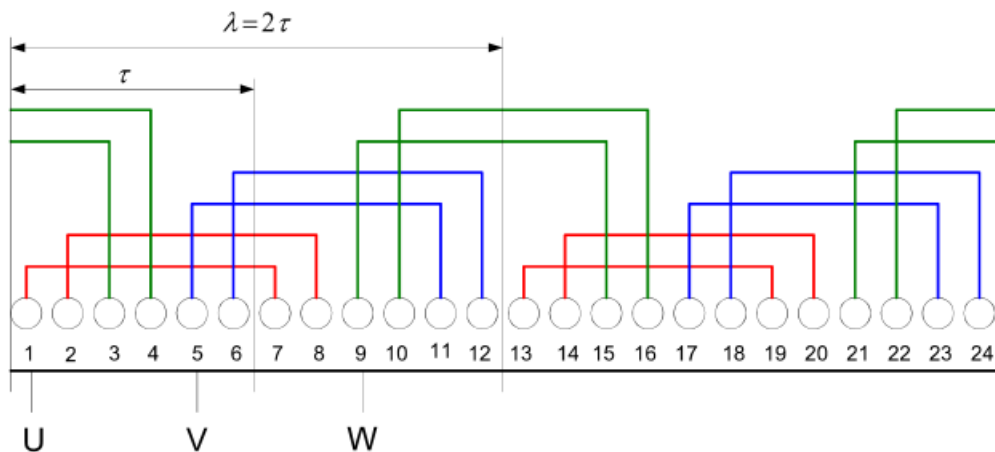
Kod izrade trofaznog namota mora se voditi računa da je zadana vrijednost *ems* jednaka za sve tri faze i da su međusobno pomaknute za 120° . To se postiže simetrijom namota, što znači da su namoti prostorno pomaknuti za trećinu koraka. Kod izrade trofaznog namota ($m=3$), stator

se najprije podijeli na potreban broj zona s pripadajućim razmakom polova τ . Da bi se svaki fazni namot postavio ispod svakog pola, polni korak je podijeljen na tri dijela ili tri područja. Na slici je prikazana shema statora koji ima 24 utora ($N=24$) i 2 para polova ($p=2$). To znači da svaki pol ima 6 utora.

$$\tau = \frac{24}{2 * 2} = 6 \text{ utora} \quad (3.10)$$

Unutar polnog koraka koji obuhvaća 6 utora smještene su 3 faze te svakoj fazi pripada po 2 utora. Budući da je korak namota jednak polnom koraku $y=\tau$, vodič se prvo spaja na utor 1 i utor 7, a zatim u utor 2 i utor 8, čime se završava faza ispod para polova. Isto vrijedi i ispod sljedećeg para polova (13, 19, 14, 20). Tako se završava namot prve faze.[3]

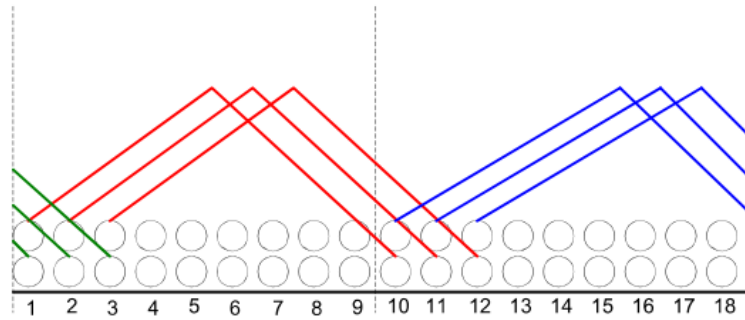
Slika 3.9. prikazuje trofazni namot.



Slika 3.7. Trofazni namot $N=24, p=2$ [3]

U trofaznim sustavima razmak između faza je 120° pa druga faza počinje 4 mjesta dalje od prve faze. Početak treće faze je na istoj udaljenosti kao i druga faza. To rezultira jednorednim ili jednoslojnim namotom s odvojenim faznim zonama i odvojenim vodičima. Osim jednoslojnih namota, proizvode se i dvoslojni namoti. To je slučaj kada su vodiči razdvojeni u dva sloja u jednom utoru. [3]

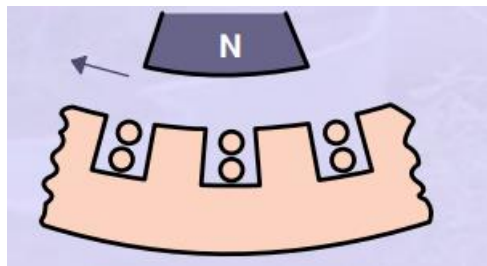
Na slici 3.10. prikazan je princip dvoslojnog namota



Slika 3.8. Dvoslojni namot [3]

Dvoslojni namoti obično koriste kraće korake (na primjer: $N=9$ utora, $y=9-1=8$).

Slika 3.11. prikazuje dvoslojnu strukturu armature.



Slika 3.9. Dvoslojna struktura armature [8]

4. PETLJASTI NAMOT SINKRONOG GENERATORA

Petljasti namot sastoji se od zavoja čiji se vodiči nalaze ispod dva susjedna pola. Spojen je u obliku petlje, po čemu je i dobio ime. Petljasti namot je namot s jednakim svicima, odnosno svicima jednakog oblika. Zbog jednakih dimenzija svitaka, njihovi otpori su jednaki, što omogućuje izvedbu s paralelnim granama. Petljasti namoti izrađuju se kao jednoslojni ili dvoslojni, skraćeni ili neskrraćeni.

Dobra svojstva petljastog namota su:

- svi dijelovi namota su jednaki,
- mogućnost stvaranja više paralelnih grana,
- koraci namota mogu se skratiti za namatanje,
- kraći koraci štede bakar.

Nedostatci petljastog namota su:

- ako je donji dio namota oštećen u utoru, mora se izvući cijeli namot,
- rastavljanje statora nije moguće bez uklanjanja namotanih dijelova iz utora.

4.1. Trofazni jednoslojni petljasti namot s cijelim brojem utora po polu i fazi

Prema utorskoj zvijezdi crta se shema namota. Polazna strana namota i povratna strana namota uvijek su pomaknute za 180 električnih stupnjeva, odnosno nalaze se pod različitim polovima. U trofaznom namotu razmak između faza uvijek je pomaknut za 120 el. stupnjeva pa je i inducirani napon fazno pomaknut.

Na slici 4.1. dan je primjer stroja koji ima 24 utora, 2 para polova i 3 faze ($N=24$, $p=2$, $m=3$) i može se odrediti geometrijski kut između utora:

$$\alpha_g = \frac{360^\circ}{24} = 15^\circ \quad (4.1)$$

Za stroj koji ima 2 para polova i 24 utora polni korak je:

$$\tau = \frac{N}{2p} = \frac{24}{2 \cdot 2} = 6 \quad (4.2)$$

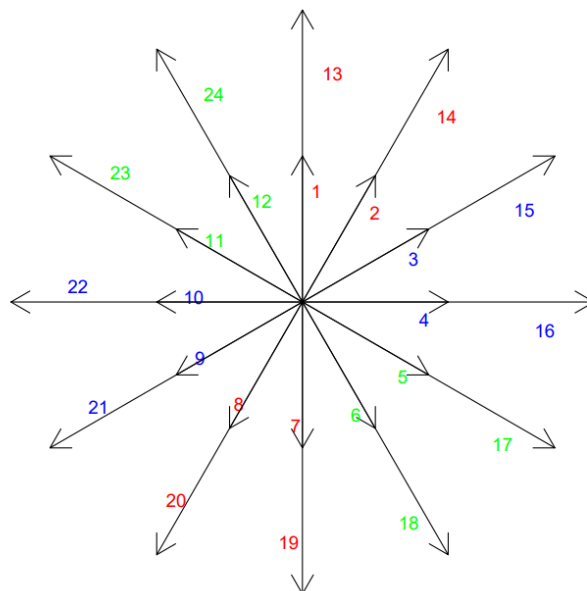
Prema slici 4.1. i 4.2. vidi se da su duž jednog polnog koraka smještene sve tri faze. Polni korak je razmak između dva pola (četveropolni stroj) pa svakom polu pripada 180 električnih stupnjeva, odnosno 6 utora te električni kut između susjednih utora iznosi 30°.

$$\alpha_e = \frac{180^\circ}{6} = 30^\circ \quad (4.3)$$

Za trofazni četveropolni stroj s 24 utora, početak faze U prikazan je vektorom 1, tada vektor 7 mora djelovati na suprotnoj strani, odnosno mora biti pomaknut za 180°. Vektor 2 mora djelovati na istoj strani namota kao i vektor 1, zato se iz utora 2 ulazi u utor 8 koji se nalazi na razmaku od 180 el. stupnjeva.

Kao je stroj četveropolan, utorska zvijezda se ponavlja 2 puta, odnosno u jednom okretu od 360 geometrijskih stupnjeva dva puta se inducira napon. Vektori 13, 14, 19 i 20 poklapaju se s vektorima 1, 2, 7 i 8. Opisani vektori se odnose na fazu U. Vektori 5, 6, 11 i 12 poklapaju se sa vektorima 17, 18, 23 i 24 te pripadaju fazi V, dok se vektori 3, 4, 9 i 10 te 15, 16, 21 i 22 odnose na fazu W.

Slika 4.1. prikazuje utorsku zvijezdu.



Slika 4.1. Utorska zvijezda [6]

Pod jednim polom, na primjer sjevernim, nalazi se 6 utora ($\tau=6$) što uvijek iznosi 180 električnih stupnjeva, to znači da se pod južnim polom također nalazi 6 utora koji zauzimaju 180°. Razmak između susjednih utora je 30 električnih stupnjeva pa broj krakova utorske zvijezde iznosi 12. Pod jednim parom polova nalazi se 12 utora što predstavlja 12 krakova utorske zvijezde.

$$N_k = \frac{360^\circ}{30^\circ} = 12, \quad (4.4)$$

gdje je:

- N_k - broj krakova utorske zvijezde.

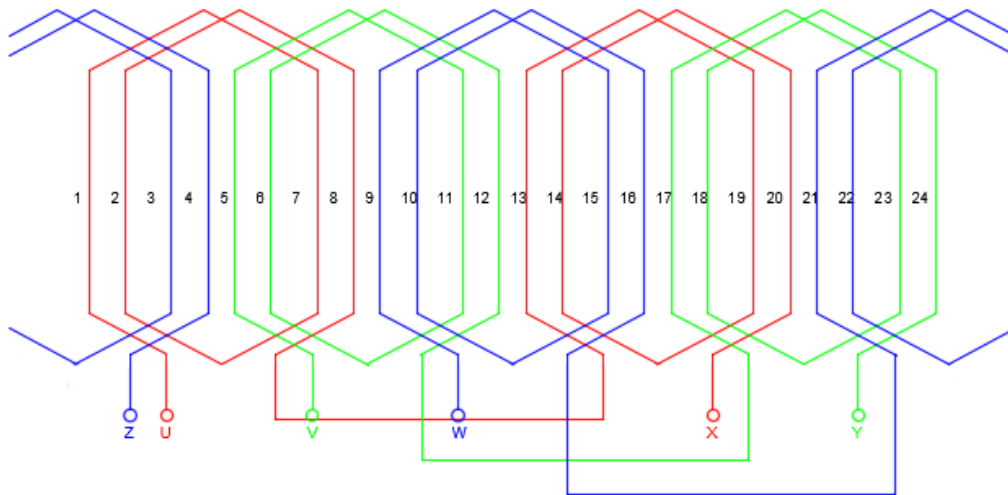
Ako se nacrtaju polovi jedan ispod drugog i upišu namoti onim redom koji su raspoređeni po utorima može se nacrtati tablica namota. U tablici se vidi elektromagnetski položaj utora. Utori faze U dolaze u prvoj trećini tablice, a utori faze W i V u drugoj i trećoj trećini tablice. Ako su polazne strane namota faze U i V postavljene pod sjevernim polom, onda je polazna strana namota faze W pod južnim polom. Iz tablice se vidi da se pojedini utori (1-13, 7-19...) u elektromagnetskom smislu nalaze na istom mjestu te preko tih utora uvijek prolazi bilo sjeverni ili južni pol.

Tablica 4.1. prikazuje namote koji se polažu u utore.

Tablica 4.1. Tablica namota [6]

	faza U		faza W		faza V	
N	1	2	3	4	5	6
S	7	8	9	10	11	12
N	13	14	15	16	17	18
S	19	20	21	22	23	24

Slika 4.2. prikazuje razvijenu shemu jednoslojnog petljastog namota.



Slika 4.2. Kompletna razvijena shema jednoslojnog petljastog namota [6]

Unutar polnog koraka koji ima 6 utora, što iznosi 180 el. stupnjeva smještene su sve tri faze. Svakoj fazi pripada 60 el. stupnjeva, a razmak između dva utora iznosi 30 el. stupnjeva.

$$q = \frac{60^\circ}{30^\circ} = 2 \text{ utora}, \quad (4.5)$$

$$q = \frac{N}{m} = \frac{6 \text{ utora}}{3 \text{ faze}} = 2 \text{ utora}, \quad (4.6)$$

gdje je:

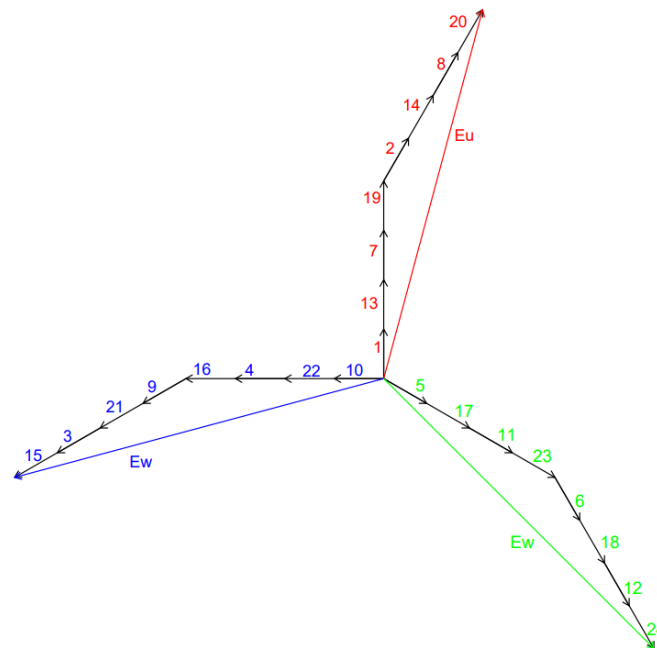
- N - broj utora po polu
- q - broj utora po polu i fazi.

Polazne strane namota faze U leže u utorima 1 i 2. Tada će povratne strane namota biti postavljene u utorima 7 i 8, što je duljina polnog koraka ($\tau=6$). Zato se namot postavlja 1-7 i 2-8. Budući da faza V mora biti fazno pomaknuta za 120 el. stupnjeva prema fazi U, polazne

strane svitka faze V su utori 5 i 6, a povratna strana namota je u utorima 11 i 12. Faza W mora fazno biti pomaknuta u odnosu na fazu V 120 el. stupnjeva, odnosno 240 el. stupnjeva u odnosu na fazu U. Polazna strana namota je u utorima 9 i 10, a povratna u utorima 15 i 16. Budući da je faza W pomaknuta za 240 el. stupnjeva u odnosu na fazu U, početak faze W mora biti postavljen pod suprotnim polom od početka faze U i faze V. Pod sljedećim polovima namot se spaja sljedeći prethodno navedena pravila.

Na slici 4.3. prikazan je način kako se induciraju fazni naponi.

Slika 4.3. prikazuje zvijezdu induciranih napona za $N=24$, $p=2$.



Slika 4.3. Zvijezda induciranih napona [6]

Kod četveropolnog stroja, istovremeno se inducira napon na namotima 1-7 i 13-19. Prvi par polova nalazi se iznad utora 1 i utora 7, dok se drugi par nalazi iznad utora 13 i 19. Prilikom vrtnje rotora magnetski tok istovremeno prožima navedene namote, koji su prikazani vektorima te se oni zbrajaju. Namoti 2-8 i 14-20 pomaknuti su za 5 utora u odnosu na utore 1-7, 13-19. Električni razmak između susjednih utora iznosi 30 el. stupnjeva te je razmak između navedenih utora 150 el. stupnjeva. Početak faze V pomaknut je za 4 utora u odnosu na početak faze U,

odnosno za 120 el. stupnjeva te se namoti koji su prikazani vektorima zbrajaju kao i kod faze U. Početak faze W nalazi se pod utorom 9, koji se nalazi pod južnim polom i pomaknut je za 120 el. stupnjeva u odnosu na fazu V.

Iz zvijezde induciranih napona vidljivo je da je svaka faza pomaknuta za 120 el. stupnjeva.

4.2. Trofazni dvoslojni namot s cijelim brojem utora po polu i fazi

U dvoslojnom namotu polazna strana svitka nalazi se u jednom sloju, bilo gornjem ili donjem, dok se druga strana svitka nalazi u suprotnom sloju. U svakom utoru postavljene su dvije strane različitih svitaka pa dvoslojni namot ima onoliko svitaka koliko ima utora. U dvoslojnom petljastom namotu svi su svici međusobno jednaki, zbog čega je svaka strana svitka jednako fazno pomaknuta prema polaznoj strani. Zato je potrebno promatrati utorsku zvijezdu jedne strane svitka.

Kod dvoslojnog namota utorska zvijezda i tablica namota iste su kao kod jednoslojnog namota u prethodnom poglavlju.

Na slici 4.5. prikazan je stroj koji ima 36 utora i 2 para polova.

Kako stroj ima 2 para polova i 36 utora, polni korak je 9.

$$\tau = \frac{N}{2p} = \frac{36}{2 \cdot 2} = 9 \quad (4.7)$$

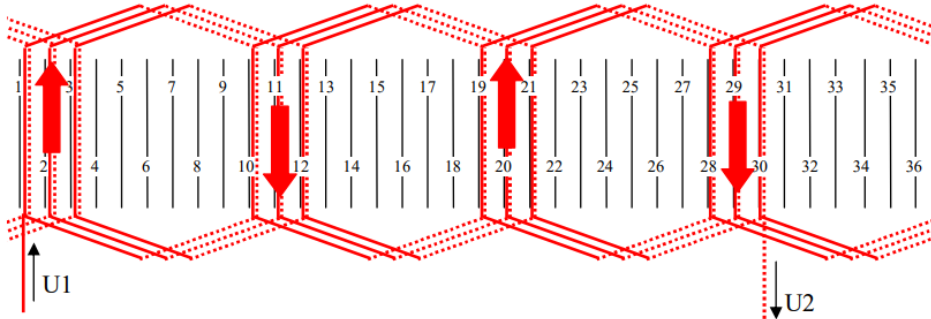
Broj utora po polu i fazi iznosi:

$$q = \frac{N}{m} = \frac{9 \text{ utora}}{3 \text{ faze}} = 3 \text{ utora} \quad (4.8)$$

Pod prvim polom nalaze se utori od 1-9 te svaka faza zauzima 3 utora. Svici faze U smješteni su u utore 1-10, 2-11, 3-12. Pod drugim polom nalaze se utori 10-18, pa su svici faze U smješteni u utore 10-19, 11-20, 12-21. Pod trećim polom nalaze se utori 19-27 te su svici faze U smješteni u utore 19-28, 20-29, 21-30, a pod četvrtim polom su utori 28-36 te su svici u utorima 28-1, 29-2 i 30-3.

Na slici 4.4. polazna strana namota označena je punim linijama i nalazi se u vrhu utora, dok je povratna strana označena crtkanim linijama i nalazi se u dnu utora sinkronog stroja.

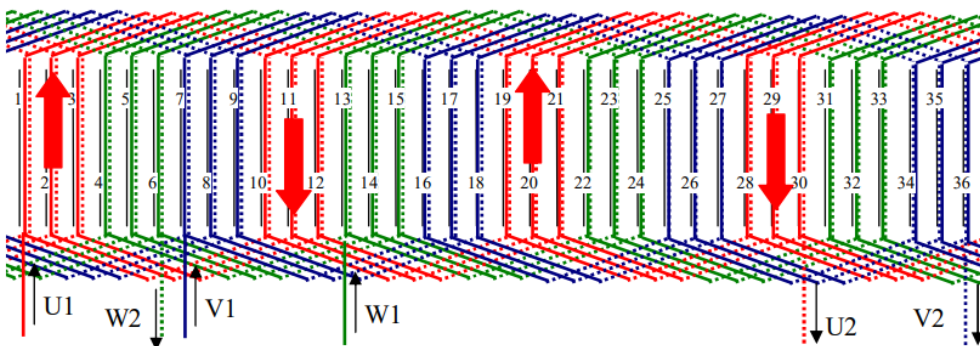
Slika 4.4. prikazuje fazu U dvoslojnog petljastog namota.



Slika 4.4. Razvijena shema faze U dvoslojnog petljastog namota [7]

Druga faza V prostorno je pomaknuta za 120 el. stupnjeva u odnosu na fazu U, dok je treća faza W pomaknuta 120 el. stupnjeva u odnosu na fazu V, odnosno 240 el. stupnjeva na fazu U

Slika 4.5. prikazuje razvijenu shemu dvoslojnog petljastog namota s tri faze.



Slika 4.5. Razvijena shema faze U, V i W dvoslojnog petljastog namota [7]

Kod sinkronih strojeva koji imaju više polova i dvoslojni namotaj, svaka faza sastoji se od više dijelova. Broj dijelova svake faze ovisi o broju polova te će faza imati onoliko dijelova koliko

ima polova. Dijelovi svake faze mogu biti međusobno povezani: serijski, paralelno i serijski-paralelno, formirajući paralelne grane namota jedne faze. Najveći mogući broj paralelnih grana jedne faze iznosi onoliko od koliko je dijelova sastavljena faza, odnosno onoliko koliko ima polova.

Za četveropolni stroj dijelovi faze mogu biti spojeni na način:

- svi dijelovi faze spojeni serijski, pa je broj pari paralelnih grana $a=1$,
- dva dijela faze spojeno serijski pa u paralelu, pa je broj pari paralelnih grana $a=2$,
- sva četiri dijela spojena u paralelu $a=4$.

Spajanje dijelova faze koristi se da bi se dobila određena vrijednost inducirane *ems*, kod većih strojeva koristi se paralelno spajanje da bi se dobio namotaj za veću struju.

4.3. Dvoslojni petljasti skraćeni namot

Dvoslojni petljasti namot se redovito izvodi i kao skraćeni. U skraćenom namotu korak svitka je manji od polnog koraka $y < \tau$. Skraćeni namot se koristi da bi se eliminirali peti i sedmi harmonik koji imaju negativne utjecaje na stroj i rad mreže. Korak svitka za dvoslojne namote se najčešće uzima:

$$y = \frac{4}{5} \tau, \quad (4.9)$$

gdje je:

- y - korak namota,
- τ - polni korak (cijeli broj).

Dvoslojni skraćeni namot može se promatrati kao dva međusobno pomaknuta jednoslojna namota. Utjecaj prostornog rasporeda vodiča jednog sloja obuhvaća se zonskim faktorom namota, a utjecaj skraćanja namota, tj. pomak među slojevima obuhvaća se tetivnim faktorom namota. Budući da su svi svici u petljastom namotu jednaki, pomak među slojevima ovisi o skraćanju svitka. Tetivni faktor namota jednak je tetivnom faktoru jednog svitka.

$$f_{tv} = \sin \left(v * \frac{y}{\tau} * \frac{\pi}{2} \right), \quad (4.10)$$

Za trofazni sinkroni stroj ($N=36, p=2$) polni korak iznosi:

$$\tau = \frac{36}{2p} = \frac{36}{4} = 9 \quad (4.11)$$

Geometrijski i električni kut je:

$$\alpha_g = \frac{360^\circ}{36} = 10^\circ \quad (4.12)$$

$$\alpha = p * \alpha_g = 2 * 10^\circ = 20^\circ \quad (4.13)$$

Broj utora po polu i fazi:

$$q = \frac{36}{2p * m} = \frac{36}{2 * 2 * 3} = 3 \quad (4.14)$$

Korak svitka:

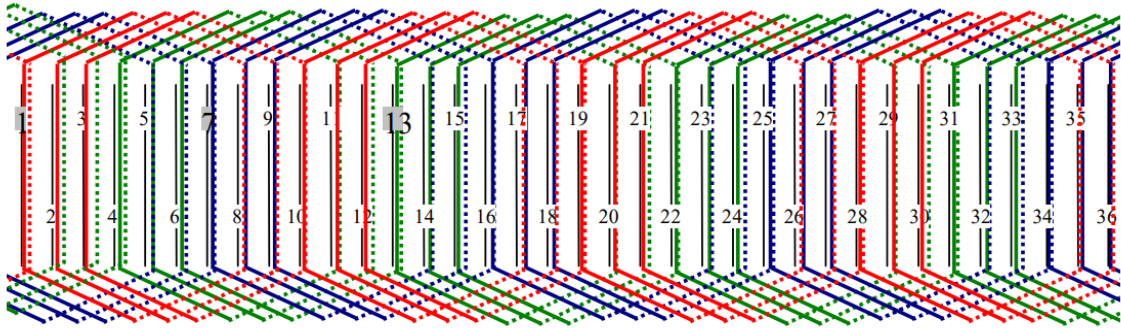
$$y = \frac{4}{5} * 9 = 7,2 \quad (4.15)$$

Korak svitka je 7,2 te se uzima zaokružena vrijednost 7. Iz gornjih rezultata vidi se da je korak svitka kraći od polnog koraka te je tako namot skraćen. Princip namatanja skraćenog namota je isti kao i kod neskraćenog namota.

Kod četveropolnog stroja svaka faza se sastoji od više dijelova. Početak faze U nalazi se u utoru broj 1 dok je povratna strana svitka u utoru 8, koji se nalazi pod istim polom kao i utor 1. Svakoj fazi pripadaju po tri utora pa je svitak faze U smješten i u utor 2-9 pod istim polom i 3-10 pod različitim polovima. Drugi dio faze U čine svitci u utorima 10-17,11-18 pod istim polom i 12-19, koji se nalaze pod različitim polom. Treći i četvrti dio faze U nalazi se u utorima 19-26, 20-27 i 21-28 te u utorima 28-35, 29-36 i 30-1. Početak faze V nalazi se u utoru 7 koji je pomaknut

za 120 el. stupnjeva u odnosu na početak faze U, a faza W ima početak u utoru 13 koji se nalazi na razmaku od 120 el. stupnjeva u odnosu na fazu V. Faze V i W imaju isti postupak namatanja. Vidljivo je da se pojedini dijelovi namota nalaze pod istim polom te se jedan utor može podijeliti na dvije različite faze.

Slika 4.6. prikazuje dvoslojni trofazni skraćeni namot.



Slika 4.6. Dvoslojni trofazni petljasti skraćeni namot [7]

U namotima gdje nema skraćenja ($y=\pi$) tetivni faktor za sve harmonike jednak je jedinici.

Tetivni faktor namota za osnovni, peti i sedmi harmonik iznose:

$$f_t = \sin\left(\frac{y}{\tau} * \frac{\pi}{2}\right) = \sin\left(\frac{7}{9} * \frac{\pi}{2}\right) = 0,939 \quad (4.16)$$

$$f_{t5} = \sin\left(v * \frac{y}{\tau} * \frac{\pi}{2}\right) = \sin\left(5 * \frac{7}{9} * \frac{\pi}{2}\right) = -0,173 \quad (4.17)$$

$$f_{t7} = \sin\left(7 * \frac{7}{9} * \frac{\pi}{2}\right) = 0,766 \quad (4.18)$$

Faktor namota dvoslojnog petljastog namota može se izračunati na isti način kao i kod jednoslojnog namota.

Zonski faktor namota jednog sloja:

$$f_n = f_z = \frac{\sin \frac{q\alpha}{2}}{q \sin \frac{\alpha}{2}} = \frac{\sin (3 \frac{20^\circ}{2})}{3 \sin (\frac{20^\circ}{2})} = 0,959 \quad (4.19)$$

Zonski faktor namota za harmonike 5 i 7 reda:

$$f_n = f_{z5} = \frac{\sin v \frac{q\alpha}{2}}{q \sin v \frac{\alpha}{2}} = \frac{\sin (5 * 3 \frac{20^\circ}{2})}{3 \sin (5 * \frac{20^\circ}{2})} = 0,217 \quad (4.20)$$

$$f_n = f_{z7} = \frac{\sin v \frac{q\alpha}{2}}{q \sin v \frac{\alpha}{2}} = \frac{\sin (7 * 3 \frac{20^\circ}{2})}{3 \sin (7 * \frac{20^\circ}{2})} = -0,177 \quad (4.21)$$

Ukupni faktor namota jednak je produktu zonskog i tetivnog faktora namota:

$$f_n = f_z * f_t = 0,959 * 0,939 = 0,901 \quad (4.22)$$

$$f_{n5} = f_{z5} * f_{t5} = -0,293 * -0,173 = 0,038 \quad (4.23)$$

$$f_{n7} = f_{z7} * f_{t7} = -0,177 * 0,766 = -0,136 \quad (4.24)$$

Faktor namota za osnovni harmonik nije jednak jednici, odnosno malo je smanjen, dok je 5 i 7 harmonik prigušen.

4.4. Jednofazni jednoslojni namot

Namot statora kod jednofaznih strojeva zauzima 2/3 utora. Neiskorištenost jednog dijela utora smanjuje snagu stroja, ali to se radi iz ekonomskih razloga (potrošnja u bakru). Ako bi namot zauzimao sve utore, tada bi se *ems* malo povećala, dok bi se gubici snage u bakru i potrošnja bakra znatno povećali. U slučaju da su svi utori ispunjeni bakrom onda je $\alpha=\pi$, pa je faktor namota: [3]

$$f = \frac{\sin \frac{\pi}{2}}{\frac{\pi}{2}} = \frac{2}{\pi} = 0,636 \quad (4.25)$$

Ako namot zauzima $\frac{2}{3}$ utora, kut $\alpha = \frac{2}{3}\pi$, po formuli 4.24 faktor namota iznosi 0,827.

U slučaju da su svi utori ispunjeni potroši se 1.5 puta više bakra nego kad je ispunjeno $\frac{2}{3}$ utora, a zbog toga i gubici u bakru porastu za 1.5 puta.

$$\frac{1}{\frac{2}{3}} = 1,5 \quad (4.26)$$

Ems u zavojima stroja će u slučaju kad su svi utori ispunjeni bakrom i kad je $\frac{2}{3}$ ispunjeno bakrom pa je ukupna *ems* iznositi:

$$E_{\frac{1}{1}} = f_{\frac{1}{1}} * N_{\frac{1}{1}} * E_1 = f_{\frac{1}{1}} * 1,5 * N_{\frac{2}{3}} * E_1 \quad (4.27)$$

$$E_{\frac{2}{3}} = f_{\frac{2}{3}} * N_{\frac{2}{3}} * E_1 \quad (4.28)$$

Omjer *ems* sila i faktora namota je:

$$\frac{E_{\frac{1}{1}}}{E_{\frac{2}{3}}} = \frac{f_{\frac{1}{1}} * 1,5 * N_{\frac{2}{3}} * E_1}{f_{\frac{2}{3}} * N_{\frac{2}{3}} * E_1} = \frac{f_{\frac{1}{1}} * 1,5}{f_{\frac{2}{3}}} = \frac{0,636 * 1,5}{0,827} = 1,15 \quad (4.29)$$

Očito da nije isplativo ispuniti sve utore bakrom, jer je tad povećanje potrošnje bakra 50 % veće, dok je *ems* veća za 15%.

Polazeći npr. od trofaznog namota ($N=24, p=2$), dovoljno bi bilo izostaviti vodiče jedne faze.

Stroj ima 24 utora i dva para polova pa je polni korak:

$$\tau = \frac{24}{2p} = \frac{24}{4} = 6 \quad (4.30)$$

Unutar polnog koraka koji ima koji iznosi 180 električnih stupnjeva smještene su četiri vodiča koji su pomaknuti za električni kut:

$$\alpha = \frac{180^\circ}{4} = 45^\circ \quad (4.31)$$

Namoti koji se nalaze u utorima 1, 2, 5 i 6 nalaze se na razmaku polnog koraka te preko njih prelazi bilo sjeverni (N) ili južni pol (S) rotora. U utorima 7, 8, 11 i 12 postavlja se povratna strana namota, oni se također nalaze unutar polnog koraka. Jednofazni namot se također postavlja u utore 13, 14, 17 i 18 koji se nalaze unutar polnog koraka i predstavljaju polaznu stranu namota te u utore 19, 20, 23 i 24 koji su povratna strana namota.

5. ZAKLJUČAK

U završnom radu opisan je petljasti namot sinkronog generatora. Uz opis petljastog namota, navedena je i objašnjena teorijska podloga o radu rotacijskih strojeva, osobito sinkronog generatora. U radu je istaknuto da postoji nekoliko vrsta petljastih namota, među kojima su dvoslojni petljasti namot, jednoslojni petljasti namot i skraćeni namot.

U prvom dijelu rada objašnjen je princip rada električnih strojeva i način induciranja elektromotorne sile na vodiče statora, odnosno armature. U drugom dijelu rada objašnjen je petljasti namot, način namatanja na generator kao i način na koji utječe na više harmonike koji se pojavljuju u mreži.

Osnovni dijelovi sinkronog generatora su rotor i stator. Petljasti namot se nalazi u utorima statora te se na njemu inducira *ems*. Prilikom izrade generatora najveća pažnja se pridaje namatanju armaturnog namota jer kroz njega prelazi ukupna snaga stroja. Petljasti namot mora biti dimenzioniran da izdrži struju opterećenja.

Kod jednofaznih namota nisu svi utori ispunjeni vodičima, zbog toga izrada stroja je jeftinija te je znatna ušteda u bakru. Takva izrada stroja je prihvatljiva, zbog toga što se ne gubi na funkcionalnosti stroja, dok je ekonomski isplativije.

Petljasti namot može se izrađivati od različitih materijala, broj zavoja se može prilagoditi potrebama stroja. Svi dijelovi petljastog namota su jednaki, što omogućuje stvaranje više paralelnih grana, također je moguće skraćivanje koraka u svrhu poništavanja viših harmoničnih članova. Postupak namatanja petljastog namota je vrlo složen proces te se kod greške ili kvara na jednom dijelu namota mora zamijeniti cijeli namot.

LITERATURA

- [1] Mandić I., Tomljenović V., Pužar M. Sinkroni i asinkroni električni strojevi, Tehničko veleučilište u Zagrebu, Zagreb, 2012. (posjećeno 15.2.2023)
- [2] https://hr.wikipedia.org/wiki/Sinkroni_stroj (posjećeno 15.2.2023)
- [3] Krčum, M. Električni strojevi I, skripta, Sveučilište u Splitu, Studijski centar za stručne studije, Split, 2009. (posjećeno 20.2.2023)
- [4] Dolenc, A., Frančić, B., Jurković, B., Sirotić, Z., Wolf, R. Električni sklopni aparati - električni strojevi (posjećeno 15.2.2023)
- [5] Jakopović, Ž., Kezić, D. Energetska ili Učinska elektronika. Energetska elektronika, Odjel stručnog studija sveučilišta u Splitu. (posjećeno 20.2.2023)
- [6] Troskot, V. SINKRONI STROJEVI AUDITORNE VJEŽBE, Interna skripta. Električni strojevi 1, Odjel za stručne studije Sveučilišta u Splitu, ak. god. 2021./2022. (posjećeno 15.4.2023)
- [7] <http://www.ftn.uns.ac.rs/1747930824/zadaci-sa-3--vezbi---namotaji> (posjećeno 15.3.2023)
- [8] Vasudevan, K., Rao, S., Rao, S. Synchronous Machine Armature Windings. Indian Institute of Technology Madras (posjećeno 5.4.2023)
- [9] https://en.wikipedia.org/wiki/Single-phase_generator (posjećeno 8.5.2023)

POPIS SLIKA

Slika 2.1. Pretvorba energije	3
Slika 2.2. Dvopolni sinkroni generator [1].....	5
Slika 2.3. Sinkroni generator sa izraženim polovima [2].....	6
Slika 2.4. Kretanje vodiča u magnetskom polju [3].....	9
Slika 2.5. Induciranje <i>ems</i> [3].....	11
Slika 2.6. Vektorski prikaz induciranih napona [3]	13
Slika 2.7. Vektorski prikaz induciranih napona kod četveropolnog generatora [3].....	15
Slika 2.8. Dinamička uzbuda [1].....	16
Slika 2.9. Statička uzbuda [1].....	17
Slika 2.10. Beskontaktna uzbuda [1].....	17
Slika 2.11. Princip rada jednofaznog sinkronog generatora [9].....	18
Slika 3.1. Dvoslojni petljasti namot [3].....	22
Slika 3.2. Dvoslojni valoviti namot [3]	22
Slika 3.3. Sekcija armaturnog namota [3]	23
Slika 3.4. Određivanje zonskog faktora namota [3].....	24
Slika 3.5. Tetivni faktor namota [4]	26
Slika 3.6. Harmonici višeg reda [5].....	26
Slika 3.7. Trofazni namot $N=24, p=2$ [3].....	29
Slika 3.8. Dvoslojni namot [3]	30
Slika 3.9. Dvoslojna struktura armature [8]	30
Slika 4.1. Utorska zvijezda [6]	32
Slika 4.2. Kompletna razvijena shema jednoslojnog petljastog namota [6]	34
Slika 4.3. Zvijezda induciranih napona [6]	35
Slika 4.4. Razvijena shema faze U dvoslojnog petljastog namota [7]	37

Slika 4.5. Razvijena shema faze U, V i W dvoslojnog petljastog namota [7]	37
Slika 4.6. Dvoslojni trofazni petljasti skraćeni namot [7].....	40

POPIS TABLICA

Tablica 2.1. Brzine vrtnje sinkronih strojeva za 50 [Hz]	16
Tablica 3.1. Klase izolacijskih materijala	20
Tablica 3.2 Tetivni faktor namota [4]	27
Tablica 3.3. Broj utora po polu i fazi za viši red harmonika [4]	28
Tablica 4.1. Tablica namota [6].....	33