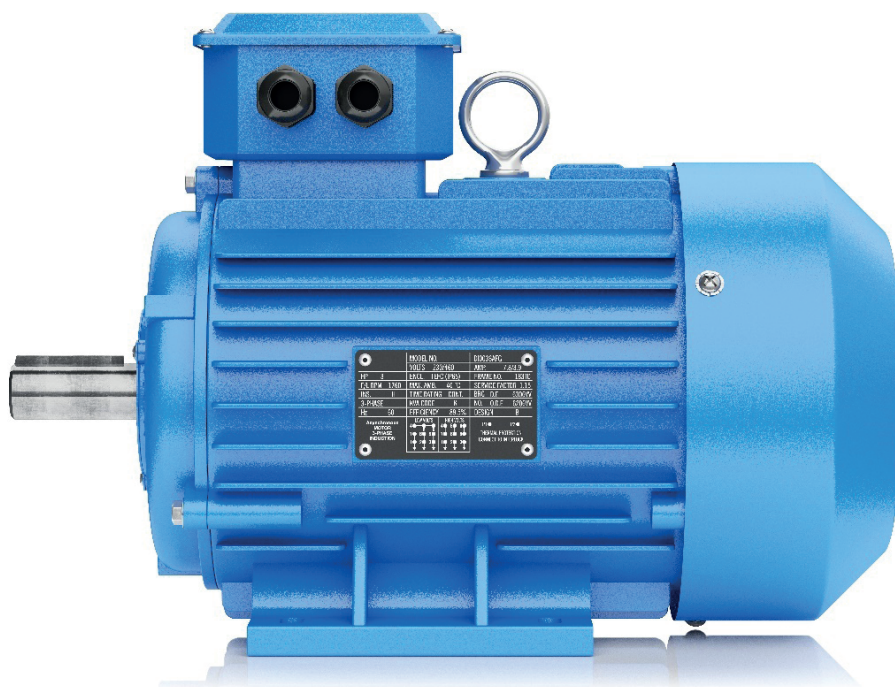




ELEKTRIČNI STROJEVI



Vjekoslav Zrno

Vjekoslav Zrno

ELEKTRIČNI STROJEVI



Projekt je sufinancirala Europska unija iz Europskog socijalnog fonda.
Sadržaj publikacije isključiva je odgovornost Obrtne tehničke škole Split



EduSplit Obrtna tehnička škola
Regionalni centar kompetentnosti Split

Vjekoslav Zrno

ELEKTRIČNI STROJEVI

Split, 2023.

Autor: Vjekoslav Zrno, mag. ing. el.
Urednik: Aleksander Radovan
Naslov: **Električni strojevi**
Recenzentica: Maja Krčum
Lektorica: Mira Barberić
Grafičko oblikovanje: ALGEBRA d.o.o.
Nakladnik: Obrtna tehnička škola Split
Odgovorna osoba: ravnatelj Milivoj Kalebić
Za nakladnika: ALGEBRA d.o.o.

Više informacija:

Obrtna tehnička škola Split
Plančićeva 21
21000 Split
e-pošta: ured@ss-obrtna-tehnicka-st.skole.hr
mrežna adresa: edusplit.eu

ISBN:978-953-8537-09-7

Regionalni centar kompetentnosti Obrtne tehničke škole

Split, 2023.

Obrtnička tehnička škola, Plančićeva 21, 21000 Split, OIB: 43651407703, nositelj je isključivog prava iskorištavanja ovog autorskog djela, prostorno, vremenski i sadržajno neograničeno, a koje pravo obuhvaća imovinska prava autora i to osobito, ali ne isključivo, pravo reproduciranja (pravo umnožavanja), pravo distribuiranja (pravo stavljanja u promet), pravo priopćavanja autorskog djela javnosti te pravo prerade. Pojedina imovinska autorska prava treća osoba može steći isključivo na temelju pisane suglasnosti Obrtničke tehničke škole.

Sadržaj

1. Uvod u električne strojeve	11
2. Transformatori	17
2.1. Osnovni elementi konstrukcije transformatora	19
2.1.1. Žejezna jezgra transformatora	19
2.1.2. Namot transformatora	21
2.2. Princip rada transformatora	23
2.2.1. Prazni hod idealnog transformatora	24
2.2.2. Opterećenje idealnog transformatora	25
2.2.3. Realni transformatori	28
2.3. Pogonska stanja realnog transformatora	29
2.3.1. Prazni hod transformatora	29
2.3.2. Kratki spoj transformatora	31
2.3.3. Opterećenje transformatora	33
2.3.4. Prijenosni omjer	36
2.4. Korisnost transformatora	37
2.5. Trofazni transformatori	38
2.5.1. Glavna obilježja pojedinih spojeva transformatora	40
2.6. Paralelni rad transformatora	43
3. Sinkroni strojevi	45
3.1. Uvod u sinkrone strojeve	46
3.2. Konstruktivni dijelovi sinkronih strojeva	47
3.2.1. Stator	48
3.2.2. Rotor	49
3.2.2.1. Strojevi s okruglim (valjkastim) rotorom	49
3.2.2.2. Rotor s istaknutim polovima	50
3.3. Načelo rada sinkronog generatora	52
3.3.1. Magnetski polovi sinkronog generatora	52
3.3.2. Oblik induciranog napona	53
3.3.3. Frekvencija induciranog napona	55
3.4. Pogonska stanja sinkronih generatora	56
3.4.1. Prazni hod sinkronog generatora	56
3.4.2. Kratki spoj sinkronog generatora	59
3.4.3. Opterećenje sinkronog generatora	62
3.5. Iskoristivost	64
3.6. Sinkroni motor	65
3.6.1. Pokretanje sinkronog motora	68
3.7. Postupak sinkronizacije sinkronog generatora	69
3.7.1. Tamni spoj	69
3.7.2. Svijetli spoj	70
4. Asinkroni strojevi	73
4.1. Uvod u asinkrone strojeve	74
4.2. Konstruktivni dijelovi trofaznog asinkronog motora	75
4.2.1. Stator asinkronog motora	75
4.2.2. Rotor asinkronog motora	76
4.2.2.1. Rotorski paket	76
4.2.2.2. Podjela asinkronih motora	77

4.2.3. Spajanje namota.....	77
4.2.3.1. Spajanje statorskog namota	77
4.2.3.2. Spajanje rotorskog namota	78
4.2.4. Klizni koluti	79
4.3. Načelo rada asinkronih strojeva.....	80
4.4. Ostale fizikalne veličine asinkronog motora.....	82
4.4.1. Relativna brzina.....	82
4.4.2. Klizanje.....	83
4.4.3. Brzina rotora.....	84
4.4.4. Frekvencija rotorske struje i napona	84
4.4.5. Brzina vrtnje rotorskog magnetskog toka	85
4.5. Pogonska stanja asinkronog motora.....	86
4.5.1. Prazni hod asinkronog motora	87
4.5.2. Kratki spoj asinkronog motora	88
4.5.3. Opterećenje na osovini asinkronog motora.....	89
4.6. Momentna karakteristika asinkronog motora	90
4.7. Jednofazni asinkroni motor	91
4.7.1. Rad jednofaznog asinkronog motora	91
4.7.2. Pokretanje jednofaznog asinkronog motora.....	92
4.8. Asinkroni generator.....	94
5. Istosmjerni strojevi.....	97
5.1. Uvod u istosmjerne strojeve	98
5.2. Konstruktivni elementi istosmjernih strojeva	99
5.2.1. Stator	100
5.2.2. Rotor istosmjernog stroja	102
5.3. Načelo rada istosmjernih strojeva.....	104
5.4. Vrste istosmjernih strojeva	106
5.4.1. Uzbuda i vrste uzbuđenja	106
5.4.2. Nezavisno uzbuđeni generator.....	108
5.4.3. Paralelno uzbuđeni generator	110
5.4.4. Serijski uzbuđeni (serijski) generator	112
5.4.5. Složeno uzbuđeni (kompaundirani) generator	113
5.4.6. Nezavisno uzbuđeni motor	116
5.4.7. Paralelno uzbuđeni motor	118
5.4.8. Serijski uzbuđeni motor.....	119
5.4.9. Složeno uzbuđeni (kompaundirani) motor	121
5.5. Gubitci istosmjernog stroja	122
5.6. Snaga istosmjernog stroja i korisnost.....	124
Popis elemenata korištenih u sadržaju.....	126



1

POGLAVLJE

UVOD U ELEKTRIČNE STROJEVE

Nakon ovog poglavlja moći ćete:

- upoznati osnovne pretvorbe električne energije u strojevima
- upoznati tri glavne skupine strojeva
- upoznati princip elektromagnetske indukcije
- odrediti smjer magnetskog polja, induciranog napona i silu na ravnom vodiču.

Električnim strojevima nazivamo električne uređaje koji nam služe za pretvaranje jednog oblika energije u drugi oblik energije na principu elektromagnetske indukcije. S obzirom na to da pričamo o električnim uređajima, možemo zaključiti da u našem slučaju barem jedna od tih energija mora biti električna. Primjenom zakona elektromagnetske indukcije rade rotacijski električni strojevi i transformatori. (Jureković, J. 2003)

Električni strojevi se mogu podijeliti u tri glavne skupine u ovisnosti na oblike pretvorbe električne energije:

- *Transformatori* – statički elektrotehnički uređaji koji električnu energiju izmjeničnog napona jedne vrijednosti transformiraju u izmjenični napon druge vrijednosti uz istu frekvenciju.
- *Električni generatori* – električni strojevi koji su pokretani nekim pogonskim strojem. Pretvaraju mehaničku energiju u električnu energiju. Navedenom pretvorbom možemo reći da generatori proizvode električnu energiju.
- *Električni motori* – električni strojevi koji su priključeni na električnu mrežu. Električnu energiju pretvaraju u mehaničku energiju (pokreću radni stroj).

Tablica 1.1: Strojevi pomoću kojih se obavlja pretvorba energije [Izvor: Autorski rad]

Električni stroj	Oblik uzete energije	Oblik dobivene energije
TRANSFORMATORI	električna	električna
GENERATORI	mehanička	električna
MOTORI	električna	mehanička

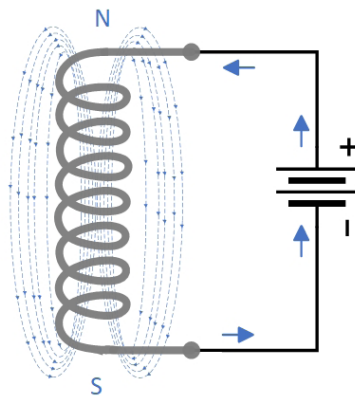
Proces pretvaranja energije iz jednog oblika u drugi kod električnih strojeva može biti reverzibilan (povratan) i ireverzibilan (nepovratan). Reverzibilan proces je onaj pri kojemu se pretvorba energije može vršiti u oba smjera. To znači da generatori mogu raditi kao motori, a motori kao generatori, ovisno o tome kako je stroj priključen na električnu mrežu. Ostali procesi pretvaranja energije su ireverzibilni. U praktičnoj primjeni stroj se koristi onako kako je već u tvornici namjenski proizveden.

Kod pretvorbe energije javljaju se i gubici u električnoj energiji. Kod idealnih strojeva gubitaka ne bi bilo zbog toga što je izveden od idealnih materijala. Kod realnih strojeva gubici mogu nastati u namotu kod prolaza struje, u željeznoj jezgri zbog vrtložnih struja i petlje histereze te u izolacijskim materijalima nastaju dielektrični gubici, a kod rotacije nastaju mehanički gubici zbog trenja i ventilacije.

Što su ukupni gubici manji, to je stroj korisniji. Korisnost stroja dobije se iz odnosa dobivene energije pretvorbom i dovedene energije stroju. Kod realnog stroja korisnost je uvijek manja od 100 %. Korisnost električnih strojeva je u praksi velika, a kod transformatora najveća snaga može postići i korisnost do 99 %. Zagrijavanje strojeva nastaje uslijed gubitaka

energije pa se s porastom snage javljaju i problemi oko hlađenja strojeva. U današnje vrijeme se uspješno rješavaju problemi oko hlađenja stroja raznim konstruktivnim rješenjima strojeva, visokokvalitetnim izolacijskim materijalima, korištenjem rashladnih sredstava kao što su ulje, zrak, voda, vodik.

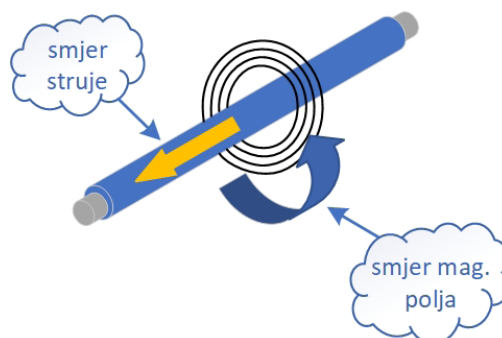
Teorija električnih strojeva zasniva se na principu elektromagnetske indukcije B . Zbog razlike potencijala koji vlada između točaka na vodiču, dolazi do nastajanja električne struje. U izolacijskom prostoru oko vodiča će se zbog razlike potencijala stvoriti električno polje. Magnetsko polje će se stvoriti prolaskom struje kroz vodič. Ta polja su dvije komponente rezultirajućeg polja koje se zove *elektromagnetsko polje*. Predodžbu o magnetskom polju u okolišu elektromagneta moguće je dobiti ispitivanjem prostora oko elektromagneta. Magnetskim silnicama se može predočiti polje, tj. prikazani su linijama koje izvire iz sjevernog pola (N), a poniru u južni magnetski pol (S). Primjer je prikazan na slici 1.1.



Slika 1.1: Magnetske silnice elektromagneta [Izvor: Autorski rad]

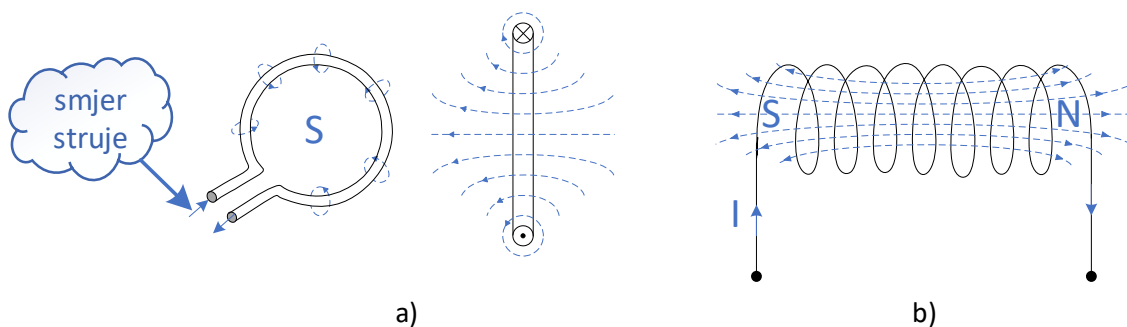
Oblik magnetskog polja, odnosno magnetskih silnica ovisi o samom obliku vodiča kojom protječe električna struja. Smjer silnica ovisi o smjeru struje koja teče te jakost struje ovisi o broju namotaja i o srednjoj dužini silnica.

Na slici 1.2 je prikazan oblik magnetskog polja jednog ravnog vodiča kojim protječe struja i način određivanja smjera polja prema pravilu *prstiju desne ruke*.



Slika 1.2: Oblik i određivanje smjera magnetskog polja ravnog vodiča [Izvor: Autorski rad]

Za stvaranje jakih magnetskih polja u praksi se ne koriste ravni vodiči zbog toga što magnetsko polje slabi što je veća udaljenost od vodiča. Ako se uzme vodič koji je savinut umjesto ravnog vodiča kojem protječe struja, prilike se bitno mijenjaju. Magnetske silnice će u tom slučaju biti prisiljene prolaziti kroz površinu S koju okružuje zavoj, jer se niti jedna silnica ne može zatvoriti izvan te površine. Tako se gustoća silnica na površini S znatno povećava pa se dobiva jače magnetsko polje. Još veće magnetsko polje dobije se tako da umjesto jednog zavoja uzmemo svitak od N zavoja. Magnetska polja u svim namotajima potpomažu se, pa je jakost ukupnog polja rezultat djelovanja svih zavoja u svitku. Ako je svitak gusto namotan, magnetske silnice su paralelne i jedino je unutar svitka homogeno polje. Izvan svitka polje je nehomogeno jer se razilaze na sve strane. Oblici i smjerovi magnetskih polja zavoja i svitka prikazani su na slici 1.3.



Slika 1.3: Oblik i smjer magnetskog polja: a) zavoja, b) svitka protjecanog električnom strujom [Izvor: Autorski rad]

Magnetska polja sa slike 1.3, kroz različito oblikovane vodiče stvarat će struju koja pruža samo kvalitativan uvid u odnosu struje i stvorenog magnetskog polja. Kako bi bolje upoznali kvantitativni odnos između struje kao uzroka i magnetskog polja kao posljedica, treba obaviti razna mjerenja.

Tri osnovna zakona koja su temelj rada električnih strojeva su:

- Elektromagnetska indukcija – pojava gdje se u zatvorenoj konturi stvara ili inducira napon e ako se mijenja magnetski tok što ga obuhvaća ta kontura. Veličina napona ovisi o brzini kojom se mijenja magnetski tok, a možemo je izraziti jednadžbom:

$$e = -\frac{d\Phi}{dt}$$

Jednadžba 1.1: Elektromagnetska indukcija

Gdje je:

e – inducirana elektromotorna sila

Φ – magnetski tok

t – vrijeme

- Elektromagnetsko protjecanje – između električnih i magnetskih pojava postoji uska povezanost, tj. nema električnih pojava bez magnetskih i obratno te su povezani zakonom protjecanja. Prolaskom struje kroz vodič stvara se magnetsko polje koje se prikazuje magnetskim silnicama i to polje ima jakost koja se označava sa H i predstavlja vektor, odnosno ima svoj smjer i iznos, računa se prema jednadžbi:

$$H = \frac{I * N}{l}$$

Jednadžba 1.2: Jakost magnetskog polja

Gdje je:

H – jakost magnetskog polja

I – struja kroz vodič

N – broj zavoja

l – dužina zavojnice

- Sile na vodiče u magnetskom polju – međusobnim djelovanjem dvaju elektromagneta stvarat će se sila F kroz svitke kroz koje prolazi struja. Magnetski tokovi svojim polovima na svitcima djeluju jedan na drugog zbog nastajanja sile prema poznatom pravilu da se istoimeni polovi odbijaju, a raznoimeni privlače. Sile F mogu biti privlačne i odbojne, ovisno o smjeru protjecanja struje kroz vodiče.

Pitanja za provjeru znanja

1. Kakve su naprave električni strojevi i na kojem principu rade?
2. Navedi glavne skupine električnih strojeva i njihove karakteristike s obzirom na oblik pretvorbe energije.
3. Je li transformator rotacijski električni stroj?
4. Što je jakost magnetskog polja?



2

POGLAVLJE

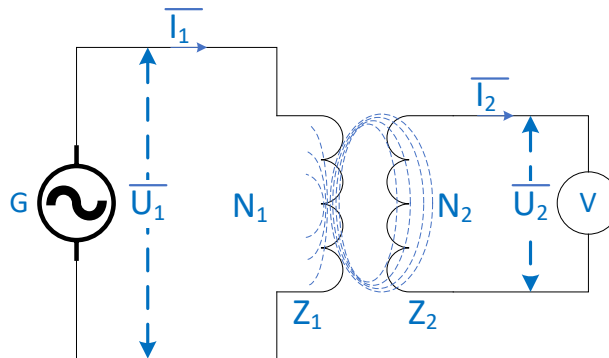
TRANSFORMATORI

Nakon ovog poglavlja moći ćete:

- upoznati princip rada i konstrukcijske dijelove transformatora
- objasniti fizikalnu sliku rada idealnog i realnog transformatora
- objasniti prazni hod, kratki spoj i opterećenje transformatora
- mjerenjem prikazati karakteristične vrijednosti u praznom hodu, kratkom spoju i opterećenju
- opisati konstrukciju i način rada trofaznog transformatora.

Transformatori su električni uređaji koji rade na osnovi elektromagnetske indukcije. Oko vodiča kroz koji prolazi električna struja stvara se magnetsko polje, kako je objašnjeno u prvom poglavlju. Strana gdje silnice magnetskog polja izlaze iz željeza naziva se sjeverni pol N (engl. *North*), a strana gdje magnetske silnice ulaze u željezo naziva se južni pol S (engl. *South*). Svaki elektromagnet, odnosno svaki magnetski svitak, uvijek ima dva magnetska pola N i S , kada struja teče kroz njegove zavojice.

Ako se vodič svine u zavojnicu Z_1 s N_1 zavojica, zavojnica se priključi na izvor izmjeničnog napona efektivne vrijednosti U_1 , kroz zavojnicu će proteći izmjenična struja efektivne vrijednosti I_1 koja će u zavojnici stvarati izmjenično magnetsko polje. Približi li se druga zavojnica Z_2 s N_2 namotaja, magnetsko polje zavojnice Z_1 inducirat će na drugoj zavojnici napon (*elektromotornu silu EMS*). Napon na zavojnici Z_2 bit će izmjeničan i iste frekvencije koju ima i napon izvora U_1 , prikazan na slici 2.1.



Slika 2.1: Magnetsko polje zavojnice [Izvor: Autorski rad]

U zavojnici Z_2 inducirat će se napon djelovanjem magnetskog polja zavojnice Z_1 . To je načelo transformacije po kojemu rade transformatori. (Krčum, M. 2009)

Dakle, može se reći:

Transformator je statički elektrotehnički uređaj, koji pomoću elektromagnetske indukcije transformira jedan sustav izmjeničnih struja u drugi sustav izmjeničnih struja iste frekvencije. Uloga transformatora u elektroenergetskom sustavu je vrlo značajna jer on omogućuje ekonomični, pouzdani i sigurni prijenos i distribuciju električne energije pri najprikladnijim naponskim nivoima. Uz iznimno male gubitke energije, rješava problem međusobne izolacije različitih naponskih razina i krugova na različitim naponskim razinama.



Slika 2.2: Energetski transformator (Izvor: <https://www.shutterstock.com/image-photo/three-phase-630-kva-corrugated-fin-1134674537>)

2.1. Osnovni elementi konstrukcije transformatora

Konstrukciju transformatora sačinjavaju dvije osnovne skupine dijelova:

- a) dijelovi koji izravno sudjeluju u transformaciji ili aktivni dijelovi
- b) dijelovi koji ne sudjeluju u transformaciji.

Aktivni dijelovi koji sudjeluju u transformaciji su:

- željezna jezgra transformatora
- namoti transformatora.

Od ostalih konstruktivnih dijelova koji ne sudjeluju izravno u transformaciji su:

- kotao za smještaj aktivnih dijelova transformatora
- ulje u kojem je zaronjen aktivni dio transformatora.

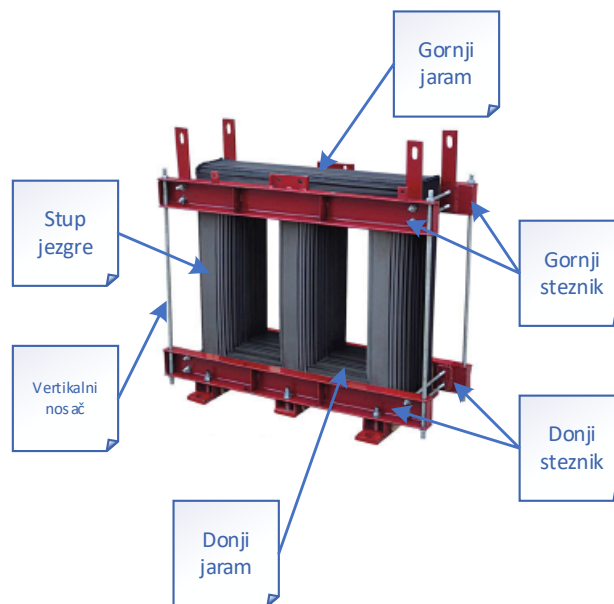
2.1.1. Željezna jezgra transformatora

Jezgra transformatora osigurava princip rada transformatora. Jezgra transformatora se mora napraviti što manja i u skladu s električnim proračunom, kako bi se smanjili gubitci.

Limovi jezgre imaju najveći udio u masi (preko 90 %), a oni su sastavljeni od transformatorskih limova koji moraju biti međusobno izolirani. Limovi se proizvode u pločama standardnih dimenzija, a u novije vrijeme u obliku trake. Upotrebljavaju se visoko legirani limovi koji su debljine $d = 0,15 \text{ mm}$, $0,27 \text{ mm}$, $0,30 \text{ mm}$ i $0,35 \text{ mm}$ za izradu željezne jezgre transformatora. Za transformatore malih snaga, iznimno se upotrebljavaju limovi debljine od $0,5 \text{ mm}$.

Limovi transformatora se izgrađuju:

- Toplim valjanjem – limovi dobiveni toplim valjanjem su jeftiniji od limova dobivenih hladnim valjanjem pa se često upotrebljavaju za izradu jezgri bez obzira na to što imaju veće specifične gubitke (P_{Fe}) i lošija magnetska svojstva od hladno-valjanih limova.
- Hladnim valjanjem – hladno-valjani orijentirani magnetski lim dobiva se hladnim valjanjem, postupkom koji je skuplji od toplo-valjanog lima. Transformatorske jezgre energetskih i najvećeg broja specijalnih transformatora, osim visokofrekvencijskih, izrađuju se danas od hladno-valjanih i obostrano izoliranih limova debljine 0,15 do 0,35 mm

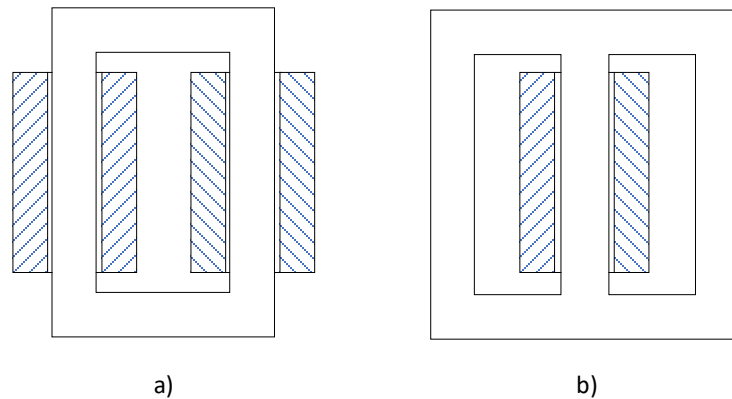


Slika 2.3: Jezgra transformatora (Izvor: <https://www.indiamart.com/proddetail/transformer-core-fixtu-re-14858240862.html> , Autorski rad)

Limovi transformatora se povezuju međusobno kako bi se maksimalno smanjila vanjska površina procesom koji nazivamo stlačivanje ili kompresija. Ovaj postupak je neophodan kako bi se onemogućilo međusobno proklizavanje limova i smanjila buka uslijed elektromagnetske indukcije koja se javlja tijekom rada. Stlačivanje limova vrši se pomoću steznog sustava jezgre koji je najčešće izveden od čeličnih ploča na donjem i gornjem jarmu jezgre koje nazivamo steznicima, kao što je prikazano na slici 2.3. Ploče su međusobno povezane vertikalnim nosačima, ovisno o izvedbi jezgre, u vertikalnom smjeru.

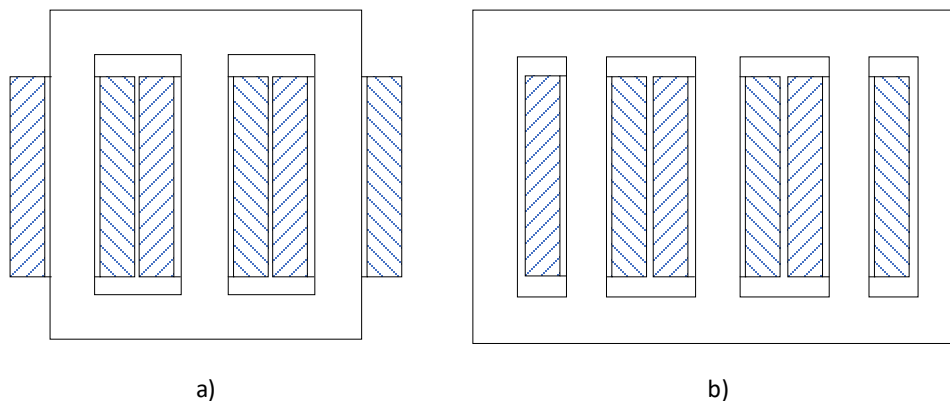
Stupovi jezgre učvršćuju se bandažiranjem pomoću traka. Trake mogu biti čelične ili od specijalnih staklenih vlakana koja se za vrijeme montaže polimeriziraju kako bismo dobili tražena svojstva.

Transformatorske jezgre se dijele na tipove za jednofazne i trofazne transformatore. Neki od tipova jezgra za jednofazne transformatore prikazani su na slici 2.4.



Slika 2.4: Tipovi jezgre jednofaznog transformatora a) jezgrasti - dvostupni, b) oklopljeni [Izvor: Autorski rad]

Na slici 2.5 prikazani su neki tipovi jezgre za trofazne transformatore.



Slika 2.5: Tipovi jezgre trofaznog transformatora a) jezgrasti - trostupni, b) oklopljeni - 5-stupni [Izvor: Autorski rad]

2.1.2. Namot transformatora

Namoti transformatora se izrađuju od električnih vodljivih i izolacijskih materijala. Električni vodljivi materijali su bakar i aluminij, a izolacijski materijali su materijali klase izolacije od A do F prema tablici toplinske klasifikacije te mineralna i sintetička ulja.

Za izvedbu namota koristi se čisti bakar specifične vodljivosti 58 Sm/mm^2 pri 20°C . Koriste se izolirani (lak ili pamuk) vodiči okruglog presjeka, standardnih promjera od 0,03 do 4 mm mekog bakra. Kod većih presjeka koriste se bakreni pravokutni profili za izradu namota izoliranih lakom ili pamukom.

Stranica pravokutnog profila, okomita na smjer rasipnog magnetskog toka, maksimalne je visine do 10 mm radi smanjenja gubitaka. Kod većih transformatora, zbog velikih sila prilikom kratkog spoja, za izradu namota se upotrebljavaju tvrdi bakar veće čvrstoće.

Aluminij se upotrebljava samo u obliku pravokutnih profila i trake specifične vodljivosti $35,7 \text{ Sm/mm}^2$. U odnosu na bakar, aluminijski vodič mora biti veći oko 30 % za transformaciju iste snage, što povećava dimenziju transformatora i njegovu cijenu. Za izolacijski materijal se koriste pamuk i papir, a elektrokemijskim postupkom može se na površini vodiča dobiti izolacijski sloj, tako da na određenoj naponskoj razini nije potrebna druga izolacija. Izrada namota s aluminijskim vodičem je složenija i skuplja, s obzirom na specifična mehanička svojstva.

Izolacijski materijali pri gradnji transformatora moraju biti postojani u transformatorskom ulju, jer bi otapanjem i kemijskim djelovanjem izolacije smanjili izolacijska svojstva ulja.

Izolacija namota i jezgre transformatora s upotrebom i zagrijavanjem stari i polako se raspada. U transformatoru se stvara talog koji djelovanjem golog bakra postaje kiseli, te tako pojačava proces raspadanja izolacije i time smanjuje izolacijska svojstva i rashladna svojstva transformatorskog ulja. Zbog toga se u uljnim transformatorima za namot ne upotrebljava goli vodič bakra. Važan faktor predstavlja i radna temperatura transformatora, s obzirom na to da su izolacijska svojstva izolacijskih materijala ovisna o temperaturi na koju se zagrijavaju. Svi izolacijski materijali svrstani su u grupe prema granično dopuštenoj temperaturi.

Granična temperatura je najviša dopuštena temperatura za neki izolacijski materijal ugrađen u transformator, koja se dosegne u pravilu kod nazivnog opterećenja i drugim definiranim uvjetima. Podjela izolacijskih materijala na toplinske klase prema graničnim temperaturama prikazana je u tablici 2.1.

Tablica 2.1: Podjela izolacijskih materijala na toplinske klase [Izvor: Jureković, J. Električni strojevi. 2003]

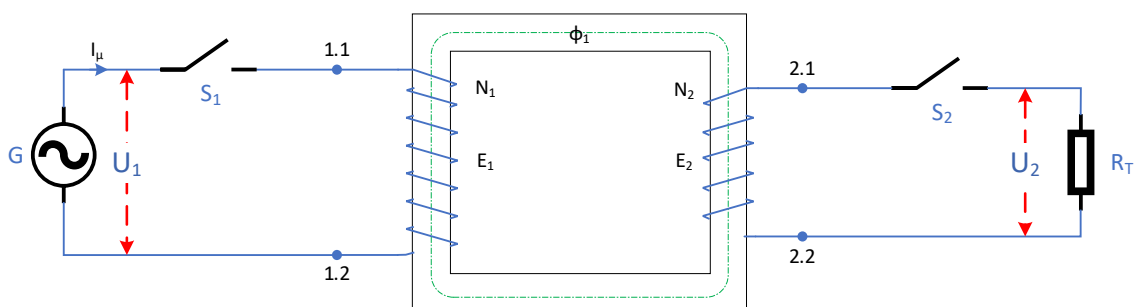
Klasa izolacije	Materijal	Granična temperatura °C	Izvedba
Y	papir, karton (prešani), drvo, pamuk, vulkan-fiber, prirodna svila	90	bez veziva
A	izolacija klase Y, slojevito drvo, emajli za žicu, uljni žični lakovi, uljno platno, papir	105	impregnacija sušivim uljnim lakovima, izolacijsko ulje, sintetični tekući dielektrici
E	sintetični žični lakovi, bakelit, tekstolit, pertinaks	120	impregnacija asfaltnim i sintetičnim uljno-modificiranim lakovima, epoksidne smole
B	staklena vlakna, mikanit, azbest	130	impregnacija asfaltnim i sintetičnim uljno-modificiranim lakovima, epoksidne smole

Klasa izolacije	Materijal	Granična temperatura °C	Izvedba
F	staklena vlakna, azbest, tinjac	155	sintetičke i epoksidne smole s povećanom termičkom postojanošću, silikonske smole
H	staklena vlakna, tinjac, silikoni	180	silikonske smole
C	tinjac, porculan, keramika	iznad 180	staklo, cement, silikonske smole s pojačanom termičkom postojanošću kao vezivo

2.2. Princip rada transformatora

Prolaskom struje kroz zavojnicu Z_1 kako je prikazano na slici 2.1, stvori se magnetsko polje čije se silnice zatvaraju kroz zrak, pa se i magnetski tok koji povezuje zavojnice zavojnice Z_2 zatvori kroz zrak. Vrlo loš vodič magnetskog toka je zrak, pa se općenito kod svih naprava gdje je potrebno da magnetski tok poveže dva odvojena strujna kruga, za provođenje magnetskog toka upotrebljava željezna jezgra.

Ako oko jednog stupa namotamo jednu zavojnicu Z_1 , a drugu zavojnicu Z_2 oko drugog stupa željezne jezgre, dobit će se osnovni primjer jednofaznog transformatora, kao što je prikazano na slici 2.6.



Slika 2.6: Osnovna slika idealnog transformatora [Izvor: Autorski rad]

Osnovni primjer jednofaznog transformatora omogućuje razmatranje rada transformatora, izvođenje jednadžbi za veličinu induciranih napona te izvođenje jednadžbi transformacije. Kod toga se pretpostavlja da je transformator *idealan*.

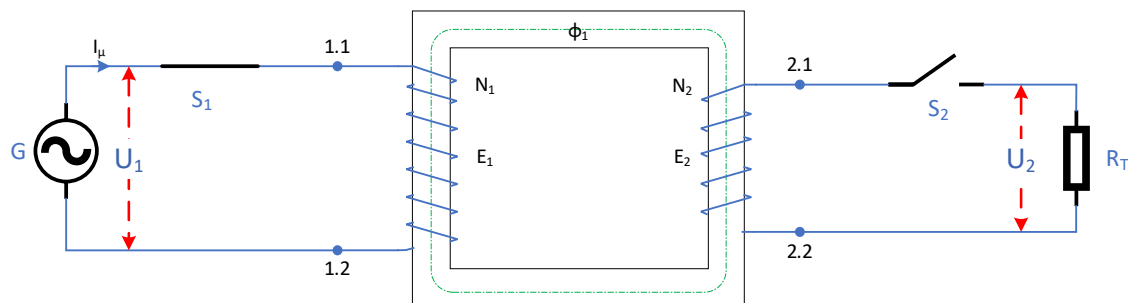
Idealan transformator je zamišljeni transformator u kojem nema gubitaka napona i snage. Kod idealnog transformatora pretpostavlja se da su oba namota izvedena od vodiča u ko-

jima nema pada napona kada struja prolazi kroz vodič, a također da se sav magnetski tok zatvara samo kroz željeznu jezgru, bez ikakvih gubitaka u jezgri. U idealnom transformatoru nema gubitaka pa se ne zagrijava.

Kako postoji samo realni transformator, kod idealnog transformatora se pretpostavlja kako bi se razmatranjem pojava u njemu moglo doći do nekih općih zaključaka koji se mogu primijeniti i na realni transformator.

2.2.1. Prazni hod idealnog transformatora

Transformator je u praznom hodu kada je sekundarni strujni krug otvoren. sklopka S_2 je otvorena, ne teče struja kako je prikazano na slici 2.7.



Slika 2.7: Prazni hod jednofaznog transformatora [Izvor: Autorski rad]

Zatvori li se sklopka S_1 , zatvorio se strujni krug primarnog namota. Sklopka S_2 otvorena je, pa u sekundarnom strujnom krugu ne može teći struja. Napon izvora U_1 potjerat će kroz primarni namot struju I_μ koja je potrebna za stvaranje magnetskog toka Φ_1 u željeznoj jezgri. Struju I_μ u željeznoj jezgri stvara magnetski tok, pa se naziva *struja magnetiziranja*.

Struja magnetiziranja je izmjenična kao i napon izvora U_1 , te će i proizvedeni magnetski tok biti izmjeničan. Struja magnetiziranja zaostaje za naponom U_1 za 90° , pa i magnetski tok Φ_1 zaostaje za naponom za 90° .

Struja I_μ i magnetski tok Φ_1 su s fazi. Struju I_μ ne može izvršiti nikakvu radnju pa se naziva još i jalova induktivna struja. Struja, napon i magnetski tok su sinusnog oblika. Magnetski tok Φ_1 koji nastaje unutar primarnog namota zatvara se preko željezne jezgre i ulančuje primarni i sekundarni namot. Magnetski tok u željeznoj jezgri čini zatvoreni magnetski krug. On raste od minimalnih vrijednosti i u fazi je sa strujom magnetiziranja. Ako struja ima frekvenciju od 50 Hz, magnetski tok imat će 50 puta u sekundi maksimalnu vrijednost, 50 puta minimalnu vrijednost, a 100 puta u sekundi vrijednost toka jednakom nuli, tj. njegova frekvencija će biti 50 Hz.

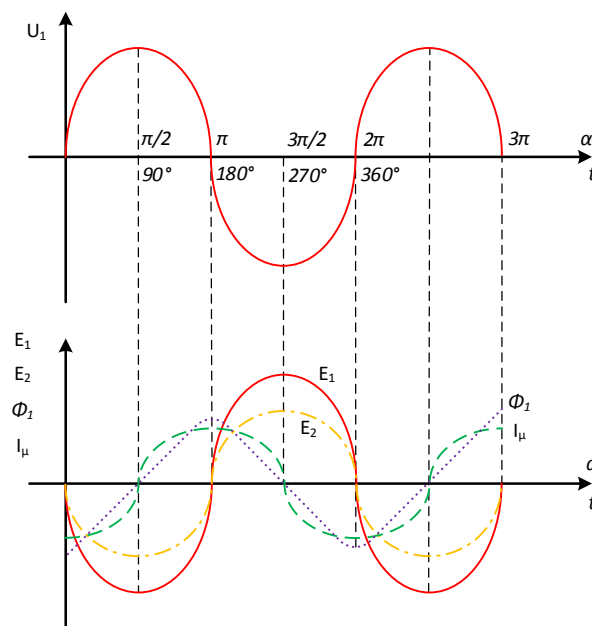
Prema zakonu elektromagnetske indukcije, u svakom zavoju koji je obuhvaćen izmjeničnim magnetskim tokom, inducira se izmjenični napon E . Ukupni inducirani napon u primarnom namotu E_1 je N_1 puta veći od napona jednog zavoja, gdje je N_1 broj zavoja namota.

$$E_1 = E * N_1$$

Jednadžba 2.1: Zakon elektromagnetske indukcije

Inducirani napon E_1 usmjeren je suprotno od naponu na izvoru U_1 i drži mu ravnotežu.

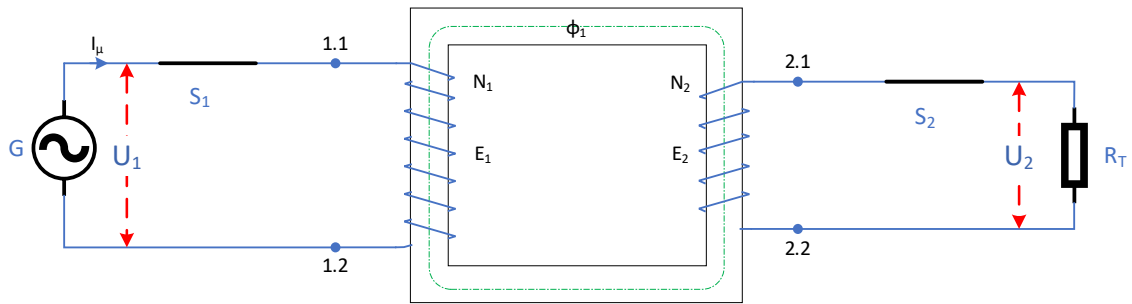
Napon induciran u zavojima bilo kojeg svitka naziva se često i elektromotorna sila (EMS). U svitku inducirani napon uvijek je suprotan narinutom naponu na svitak, pa se inducirani napon naziva protunapon, odnosno protuelektromotorna sila, kako je prikazano na slici 2.8.



Slika 2.8: Vremenski dijagrami sinusoidnih veličina idealnog transformatora [Izvor: Autorski rad]

2.2.2. Opterećenje idealnog transformatora

Uključi li se sklopka S_2 kako je prikazano na slici 2.9, zatvorio se strujni krug transformatora. Inducirani napon E_2 potjerat će sekundarnom strujnom krugu struju I_2 . Veličina struja I_2 ovisi o snazi trošila. Struja prolazi kroz trošilo i preko svitka se zatvara u zatvoreni strujni krug. Struja I_2 prolazi kroz sekundarni svitak i inducira magnetski tok Φ_2 . Magnetski tok Φ_2 mijenja iznos prvobitnog magnetskog toka Φ_1 , a time ujedno i vrijednost protunapona E_1 u primarnom namotu, čime je narušena ravnoteža između narinutog napona U_1 i protunapona E_1 . Kako bi se održala ravnoteža u primarnom strujnom krugu, transformator mora sam poništiti djelovanje sekundarnog magnetskog toka Φ_2 . Stoga se iz izvora napajanja dodaje dodatna struja I_p u primarni namot kako bi se stvorio takav magnetski tok koji bi poništio djelovanje sekundarnog magnetskog toka Φ_2 . Tako su opet stvoreni uvjeti kakvi su vladali prije stvaranja magnetskog toka Φ_2 , a time je ujedno uspostavljena ravnoteža između U_1 i E_1 .

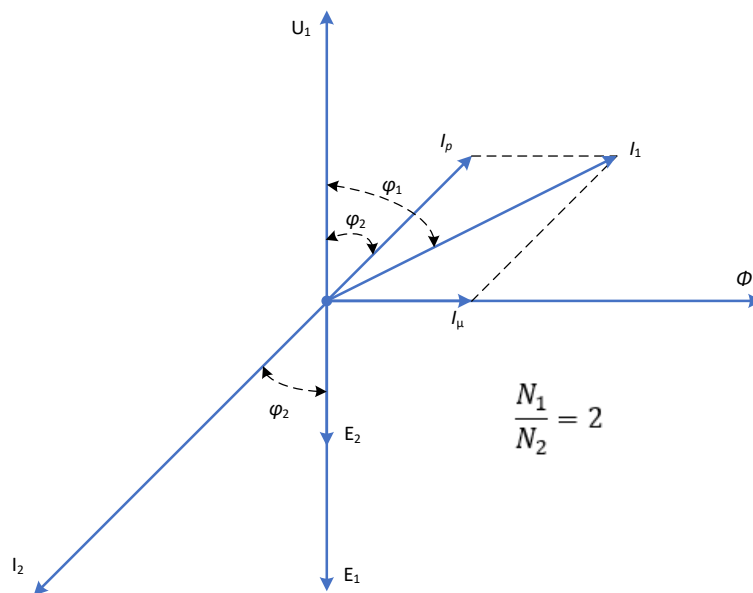


Slika 2.9: Opterećenje idealnog transformatora [Izvor: Autorski rad]

Sve ove pojave događaju se u transformatoru trenutno. Trošilo u sekundaru ne može utrošiti određenu energiju ako se elektromagnetskim putem ne prenese s izvora, tj. s primarne strane.

Uspostavom magnetske ravnoteže, u opterećenom idealnom transformatoru ostaju dakle magnetska uzbuda i magnetski tok jednaki onima u praznom hod. Struja I_p naziva se primarnom strujom opterećenja, a u upotrebi je i naziv paralizirajuća struja, tj. struja koja je poništila djelovanje struje I_2 .

Navedeno objašnjenje pojava u idealnom transformatoru pod opterećenjem prikazano je na fazorskom dijagramu na slici 2.10.



Slika 2.10: Fazorski dijagram opterećenja idealnog transformatora [Izvor: Autorski rad]

Uspostavljanje magnetske ravnoteže može se izraziti matematički jednadžbom.

$$I_p * N_1 + I_2 * N_2 = 0$$

Jednadžba 2.2

Iz koje proizlazi da je

$$I_p * N_1 = -I_2 * N_2$$

Jednadžba 2.3

što znači da magnetski struja I_p djeluje suprotno od struje I_2 te da je efektivna vrijednost struje I_p jednaka:

$$I_p = I_2 * \frac{N_2}{N_1}$$

Jednadžba 2.4

Veličina struje opterećenja I_2 u sekundarnom namotu ovisi o induciranom naponu u sekundaru E_2 i impedanciji trošila Z_t .

$$I_2 = \frac{E_2}{Z_t}$$

Jednadžba 2.5

Trošilo ima svoj radni otpor R_t i induktivni X_t .

Kod idealnog transformatora uzima se da je $U_2 = E_2$, pa se može pisati:

$$I_2 = \frac{U_2}{Z_t} = \frac{U_2}{\sqrt{R_t^2 + X_t^2}}$$

Jednadžba 2.6

Fazni pomak između struje I_2 i napona U_2 dobije se iz relacije:

$$\cos \varphi_2 = \frac{R_t}{Z_t}$$

Jednadžba 2.7

Ukupna struja u primarnom namotu sastoji se od struje magnetiziranja i struje opterećenja prema relaciji:

$$I_1 = I_p + I_\mu$$

Jednadžba 2.8

Kod idealnog transformatora struja magnetiziranja teži k nuli, pa se struja opterećenja može smatrati strujom primara $I_p = I_1$.

Može se napisati jednadžba transformacije struje kao:

$$I_1 = I_2 * \frac{N_2}{N_1} \quad \text{odnosno} \quad I_1 : I_2 = N_2 : N_1$$

Jednadžba 2.9

2.2.3. Realni transformatori

Nemoguće je postići da u transformatoru nema gubitaka. Gubitci u omskom otporu u namotu i vrtložne struje u feromagnetskoj jezgri su najvažniji gubitci. Ove gubitke možemo opisati uvođenjem omskog otpora u seriju s primarnim strujnim krugom. Zbog njihove prisutnosti, struja praznog hoda će imati komponentu koja će biti u fazi s naponom na primaru. Snaga koja se troši naziva se jalova snaga. Dodatnu složenost proučavanju realnog transformatora unosi činjenica da feromagnetski materijali pokazuju histerezu. Kao posljedica toga, magnetska indukcija B (gustoća magnetskog toka) u jezgri kasni u fazi za magnetskim poljem H koje je pak u fazi sa strujom I_1 . Stoga je fazni kut između struje I_1 i napona U_2 veći od $\pi/2$. (Krčum, M. 2009)

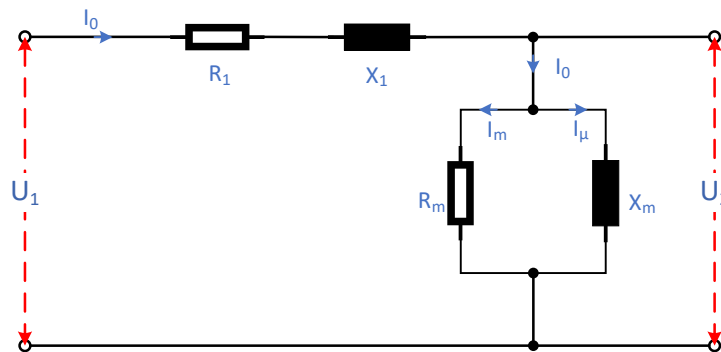
Pri izradi transformatora uvijek se nastoji minimizirati gubitke. To se postiže korištenjem tankih limova za jezgru, koji su međusobno izolirani kako bi se smanjila pojava vrtložnih strujanja. Također se odabire žica odgovarajućeg presjeka na namot, kako bi se omski otpor žice smanjio na zanemarivu razinu. Zbog toga se često mogu primijeniti relacije koje su izvedene za idealni transformator s velikom točnošću.

2.3. Pogonska stanja realnog transformatora

2.3.1. Prazni hod transformatora

Nadomjesna shema transformatora je zapravo električna shema gdje su namoti međusobno povezani električki, a pojave u njima su nadomjesne stvarnom transformatoru.

Nadomjesna shema transformatora u praznom hodu prikazana je na slici 2.11.



Slika 2.11: Nadomjesna shema transformatora u praznom hodu [Izvor: Autorski rad]

Otpor Z_1 je impedancija primarnog namota koji se sastoji od djelatnog otpora R_1 i induktivnog otpora X_1 koji su spojeni serijski, a otpor Z_m je impedancija magnetiziranja koji se sastoji od paralelnog spoja djelatnog otpora R_m i induktivnog otpora X_m . To je nadomjesni otpor kojim se zapravo prikazuju gubitci u željeznoj jezgri kao gubitci u djelatnom otporu R_m te gubitci napona zbog rasipanja magnetskog toka u induktivnom otporu X_m .

U strujnom krugu priključen napon U_1 potjera struju praznog hoda I_0 kojoj se suprotstavljaju otpori $Z_1 + Z_m = Z_0$. Osnovne relacije za strujni krug nadomjesne sheme su:

$$U_1 = I_0 * Z_0 = I_0 * (Z_1 + Z_m) = I_0 * Z_1 + I_0 * Z_m$$

Jednadžba 2.10

$$U_1 = I_0 * Z_0 \quad \Rightarrow \quad Z_0 = \frac{U_1}{I_0}$$

Jednadžba 2.11

$$E_1 = I_0 * Z_m \quad \Rightarrow \quad Z_m = \frac{E_1}{I_0}$$

Jednadžba 2.12

Gubitci praznog hoda su:

$$R_m * I_0^2 = P_0 \quad \Rightarrow \quad R_m = \frac{P_0}{I_0^2}$$

Jednadžba 2.13

$$Z_m = \sqrt{R_m^2 + X_m^2} \quad Z_1 = \sqrt{R_1^2 + X_1^2}$$

Jednadžba 2.14

R_1 – radni otpor primarnog namota

X_1 – induktivni otpor primarnog namota

Kako se pad napona $I_0 * Z_1$ zbog male struje I_0 može zanemariti, ostaje da je:

$$U_1 = I_0 * Z_m \quad \Rightarrow \quad Z_m = \frac{U_1}{I_0}$$

Jednadžba 2.15

Osim glavnog magnetskog toka koji obuhvaća oba namota, oko primarnog namota se zatvara i rasipni tok Φ_{sl} , koji iznosi oko 10 % ukupnog magnetskog toka. Glavni izmjenični magnetski tok Φ_{gl} inducira u namotima napone koje možemo izračunati pomoću poznatih relacija:

$$E_1 = 4,44 * \Phi_{gl} * f * N_1 \quad - \text{ u primaru}$$

Jednadžba 2.16

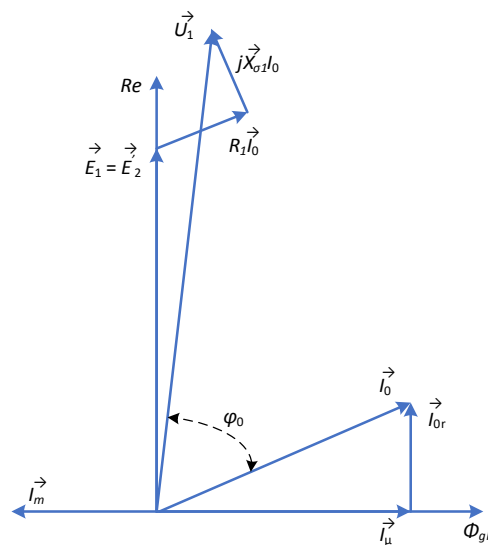
$$E_1 = 4,44 * \Phi_{gl} * f * N_1 \quad - \text{ u sekundaru}$$

Jednadžba 2.17

Iz fazorskog dijagrama koji je prikazan na slici 2.12 može se očitati da je:

$$I_0 = I_\mu + I_{0R}$$

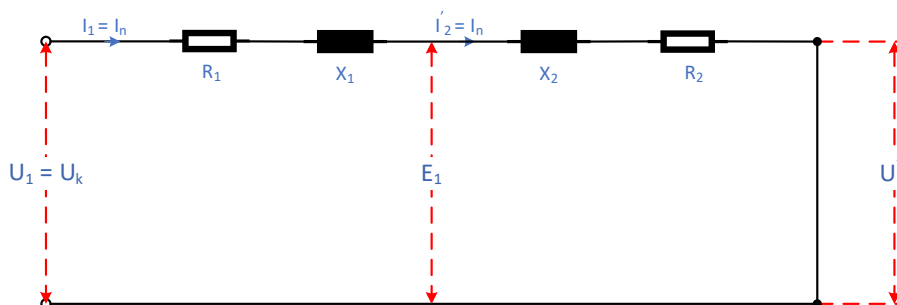
Jednadžba 2.18



Slika 2.12: Fazorski dijagram transformatora u praznom hodu [Izvor: Autorski rad]

2.3.2. Kratki spoj transformatora

Karakteristike kratkog spoja su kratko spojene stezaljke sekundara transformatora (napon sekundara jednak je nuli), kako je i prikazano na slici 2.13. Narinuti napon se troši na padove napona u transformatoru. Kod kratkog spoja, pri nazivnom naponu transformatora, struja je veća za 10 do 20 puta od nazivne.



Slika 2.13: Nadomjesna shema transformatora u kratkom spoju [Izvor: Autorski rad]

Osnovni ciljevi izvođenja pokusa kratkog spoja su određivanje:

- gubitaka zbog opterećenja
- napon kratkog spoja
- parametara ekvivalentne sheme.

Pokus se izvodi tako da jedan od namota (obično višeg napona) priključimo na napon koji postepeno povećavamo od nule do vrijednosti pri kojoj se uspostavlja naznačena vrijednost struje i tu vrijednost napona nazivamo naponom kratkog spoja, s tim da su na drugom namotu (sekundaru) stezaljke spojene uklatko. Za vrijeme pokusa mjeri se: (Jureković, J. 2003)

- napon napajanja, koji se naziva napon kratkog spoja U_k
- struja napajanja I_k (približno ili točna vrijednost nazivne struje I_n)
- snaga uzeta iz mreže P_k (snaga kratkog spoja).

Zbog malog napona gubitci u željezu se zanemaruju, pa se snaga iz mreže troši na gubitke u namotu. Izmjerena snaga gubitaka, svedena na naznačenu struju, predstavljaju približno naznačene gubitke u namotima transformatora P_{cu} .

$$P_{kn} = \frac{I_n^2}{I_k^2} * P_k \cong \frac{I_n^2}{I_k^2} * P_{cu} = \left(\frac{I_n}{I_k}\right)^2 * (P_{cu1} + P_{cu2})$$

Jednadžba 2.19

Napon kratkog spoja služi za određivanje promjene (pada) napona u transformatoru zbog opterećenja, veličine stvarne struje kratkog spoja i mogućnosti paralelnog rada dva ili više transformatora.

Pod nazivnim naponom kratkog spoja podrazumijevamo onu vrijednost napona koja točno odgovara naznačenoj struji, odnosno onu koja se, u općem slučaju, određuje prema:

$$U_{kn} = \frac{I_n}{I_k} * U_k$$

Jednadžba 2.20

Prilikom određivanja parametara ekvivalentne sheme obično je poprečna grana sheme zanemariva, budući da je struja praznog hoda puno manja od naznačene struje. Parametri uzdužne grane ekvivalentne sheme jednofaznog transformatora tada se određuje na sljedeći način:

- Impedancija kratkog spoja

$$Z_k = \frac{U_k}{I_k}$$

Jednadžba 2.21

- Aktivna otpornost kratkog spoja

$$R_k = R_1 + R_2' = \frac{P_k}{I_k^2}$$

Jednadžba 2.22

- Reaktancija kratkog spoja

$$X_k = X_{\sigma 1} + X'_{\sigma 2} = \sqrt{Z_k^2 - R_k^2}$$

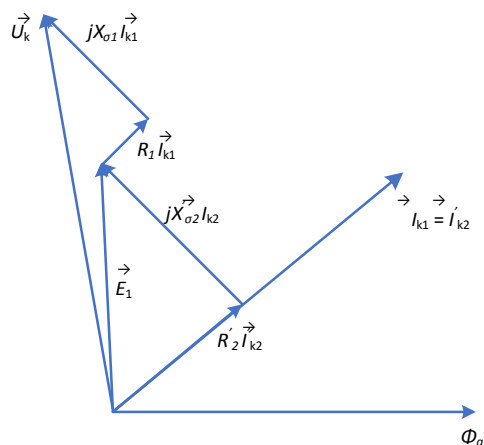
Jednadžba 2.23

Približno se može uzeti da su aktivni i reaktivni otpor primara jednake svedenim aktivnim i reaktivnim otporima sekundara, tj.:

$$R_1 \cong R'_2 \quad ; \quad X_{\sigma 1} \cong X'_{\sigma 2}$$

Jednadžba 2.24

Fazorski dijagram se crta s reduciranim sekundarnim veličinama na primarnu stranu i za transformator u kratkom spoju, prikazan na slici 2.14.



Slika 2.14: Fazorski dijagram transformatora u kratkom spoju [Izvor: Autorski rad]

2.3.3. Opterećenje transformatora

Pretpostavlja se da trošilo opterećuje transformator s približno nazivnim opterećenjima te da ima omski i induktivni karakter. Trošila u širokoj potrošnji i industriji uglavnom su takvog karaktera.

Struja opterećenja I_1 i I_2 u primarnom i sekundarnom namotu transformatora izazivaju radne padove napona $E_{R1} = I_1 * R_1$ i $E_{R2} = I_2 * R_2$. Osim toga, u namotima se javljaju gubitci.

$$P_{cu} = E_{R1} * I_1 + E_{R2} * I_2$$

Jednadžba 2.25

Struja opterećenja I_1 stvara u primarnom namotu primarni rasipni tok $\Phi_{s1'}$, koji u namotu inducira napon $E_{s1'}$. To je napon rasipanja ili induktivni pad napona u primarnom namotu.

Struja opterećenja I_2 stvara u sekundarnom namotu sekundarni rasipni tok $\Phi_{s2'}$, koji inducira napon $E_{s2'}$ kao induktivni pad napona u sekundarnom namotu.

Kao što je poznato, glavni magnetski tok Φ_{gl} inducira u primaru napon $E1$, a u sekundaru napon $E2$.

Sada se mogu napisati jednačbe ravnoteže napona u primarnom i sekundarnom namotu. Naponska jednačba primarne strane opterećenog realnog transformatora:

$$U_1 = -E_1 + E_{R1} + E_{s2}$$

Jednačba 2.26

Za sekundarnu stranu naponska jednačba glasi:

$$U_2 = E_2 - E_{R2} - E_{s2}$$

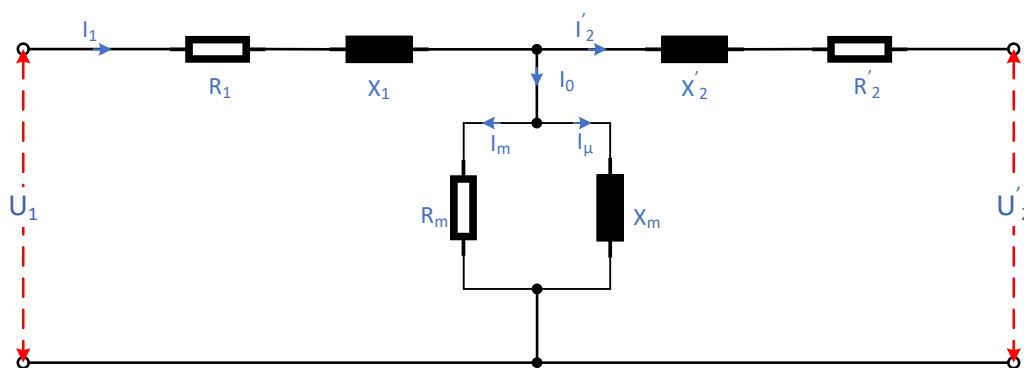
Jednačba 2.27

Strujna jednačba za realni transformator glasi:

$$I_1 = I_0 + I_p$$

Jednačba 2.28

Na temelju provedenih razmatranja o opterećenju realnog transformatora, uzimajući u obzir jednačbe naponske ravnoteže na primarnoj i sekundarnoj strani, može se nacrtati fazorski dijagram opterećenja realnog transformatora, kao što je prikazano na slici 2.15.

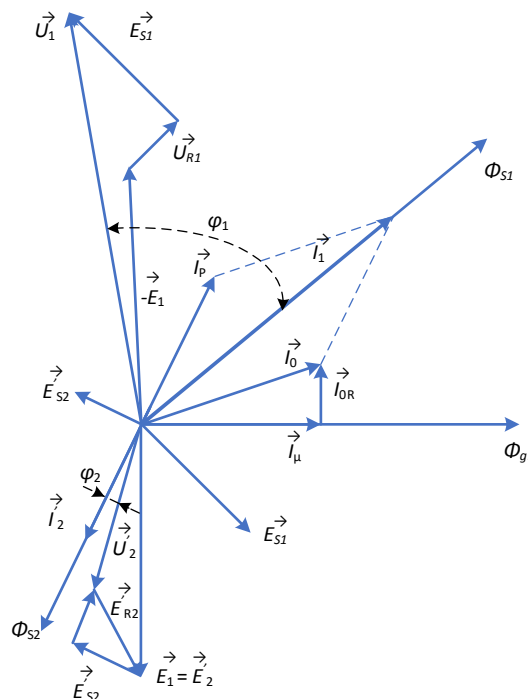


Slika 2.15: Nadomjesna shema pri realnom opterećenju [Izvor: Autorski rad]

Fazorski dijagram sa sekundarnim veličinama reduciranim na primarnu stranu prikazan je na slici 2.16. Kod izrade fazorskog dijagrama glavni magnetski tok postavlja se kao referentni pravac na os apscisa, s njim je u fazi struja magnetiziranja I_μ , a zaostaju za 90° elektromotorne sile (EMS) E_1 i E_2 . Omski padovi napona u fazi su s pripadajućim strujama, a induktivni padovi su okomiti na fazne struje.

Fazorski dijagram realnog transformatora obuhvaća sve veličine koje su razmatrane kod realnog transformatora. Pri crtanju dijagrama treba paziti na smjer pojedinih fazora uzimajući u obzir i to kakav je teret priključen na sekundarne stezaljke transformatora. Teret može biti kapacitivan, induktivan i radan ili kombinacija između njih.

U fazorskom dijagramu sekundarno priključeni teret sastoji se od radnog i induktivnog trošila.



Slika 2.16: Fazorski dijagram opterećenja realnog transformatora [Izvor: Autorski rad]

Pojedine veličine u dijagramu znače:

- Φ_{gl} - glavni magnetski tok
- I_μ - struja magnetiziranja
- I_{OR} - struja gubitaka u željezu transformatora (djelatna komponenta struje praznog hoda)
- I_0 - struja praznog hoda
- E_1 - napon (EMS) induciran od glavnog magnetskog toka u primarnom namotu
- E_2 - napon induciran od glavnog magnetskog toka u sekundarnom namotu, reduciran na primarnu stranu

- U_1 – napon izvora
- U'_2 – napon stezaljki sekundara, reduciran na primarnu stranu
- I'_2 – sekundarna struja, reducirana na primarnu stranu
- I_p – paralizirajuća struja
- I_1 – primarna struja ($I_1 = I_p + I_0$)
- E_{R1} – radni napon u primarnom namotu
- E'_{R2} – radni napon u sekundarnom namotu, reduciran na primar
- E_{s1} – napon rasipanja primara induciran od rasipnog toka primara
- E'_{s2} – napon rasipanja sekundara induciran od rasipnog toka sekundara, reduciran na primarnu stranu
- Φ_{s1} – rasipni tok primara
- Φ_{s2} – rasipni tok sekundara
- Φ_1 – fazni pomak između napona stezaljki primara U_1 i primarne struje I_1
- Φ_2 – fazni pomak između napona stezaljki sekundarne U_2 i sekundarne struje I_2 .

Izvornom naponu U_1 drži ravnotežu fazorski zbroj induciranog napona E_1 , napona rasipanja E_{s1} i radnog pada napona u primarnom namotu E_{R1} . Ovisno o karakteru opterećenja, inducirani napon E_1 može se manje ili više razlikovati od napona U_1 , dok kod idealnog transformatora ta bi dva napona uvijek bila međusobno jednaka. Sekundarnom induciranom naponu E_2 drži ravnotežu fazorski zbroj napona na trošilu U_2 , napon rasipanja E_{s2} i radnog pada napona E_{R2} . Napon U_2 , ovisno o karakteru opterećenja, može biti manji, jednak ili veći od induciranog napona E_2 (karakter opterećenja: radno, kapacitivno, induktivno). Inducirani naponi E_{s1} i E_{s2} u praksi se često nazivaju *induktivni padovi napona* u primarnom i sekundarnom namotu.

2.3.4. Prijenosni omjer

Prijenosni omjer je omjer napona na namotaju s većim brojem zavoja i napona na namotaju s manjim brojem zavoja u praznom hodu transformatora. Prijenosni omjer mjerimo u praksi zato da bismo ustanovili odgovara li ispitivani transformator podacima o naponima navedenim na natpisnoj pločici. Obično se prienosni omjer transformatora utvrđuje napajanjem na primarnoj strani, jer napon na slobodnim stezaljkama sekundarne strane ne može biti veći od naznačenog napona. (Krčum, M. 2009)

Ako nazivni napon primarne strane ne prelazi 1000 V, a želimo izbjeći utjecaj struje magnetiziranja, preporučuje se transformator priključiti na napon $U = 0,75 * U_n$. Voltmetrom treba izmjeriti napon na primarnoj strani (U_{GN}) i sekundarnoj strani (U_{DN}) transformatora. Prijenosni omjer se izražava omjerom ta dva napona preko relacije:

$$k_{12} = \frac{U_{GN}}{U_{DN}}$$

Jednadžba 2.29

Opisano mjerenje pruža dovoljno precizne rezultate u praksi, ali važno je napomenuti da omjer zavoja samo približno odgovara omjeru napona na primarnoj i sekundarnoj strani transformatora:

$$\frac{N_1}{N_2} = \frac{U_{GN}}{U_{DN}} = \frac{U_1}{U_2}$$

Jednadžba 2.30

2.4. Korisnost transformatora

Na osnovi poznavanja gubitaka praznoga hoda i gubitaka zbog opterećenja određuje se stupanj korisnosti transformatora:

$$\eta_n = \frac{\text{izlazna snaga}}{\text{ulazna snaga}} = \frac{P_{2n}}{P_{1n}} = \frac{P_{2n}}{P_{2n} + P_{gn}} = \frac{S_n \cos \varphi}{S_n \cos \varphi + P_{0n} + P_{Tn}}$$

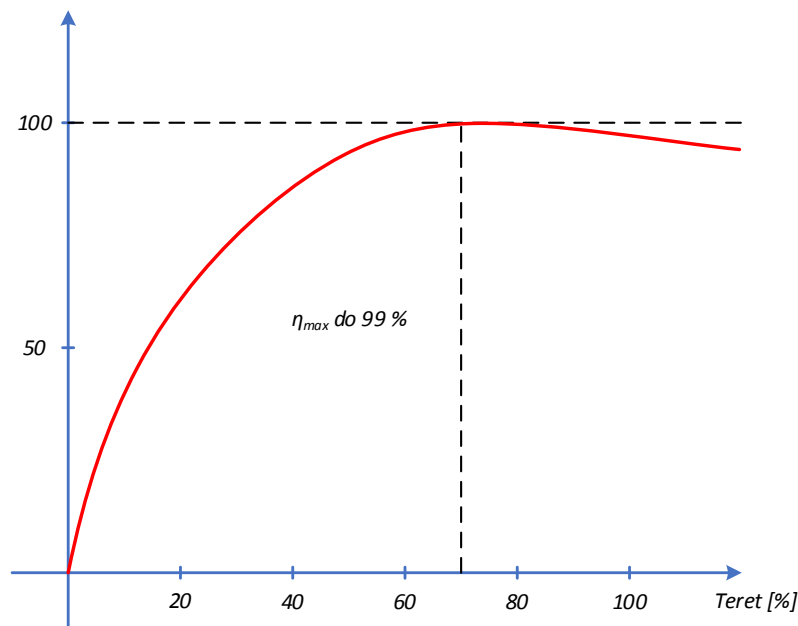
Jednadžba 2.31

gdje je S privedna snaga sekundara transformatora, indeks n označava naznačenu vrijednost:

$$\eta_n = \frac{\text{izlazna snaga}}{\text{ulazna snaga}} = \frac{P_n * \cos \varphi}{P_n * \cos \varphi + P_{Fe} + P_{Cu}}$$

Jednadžba 2.32

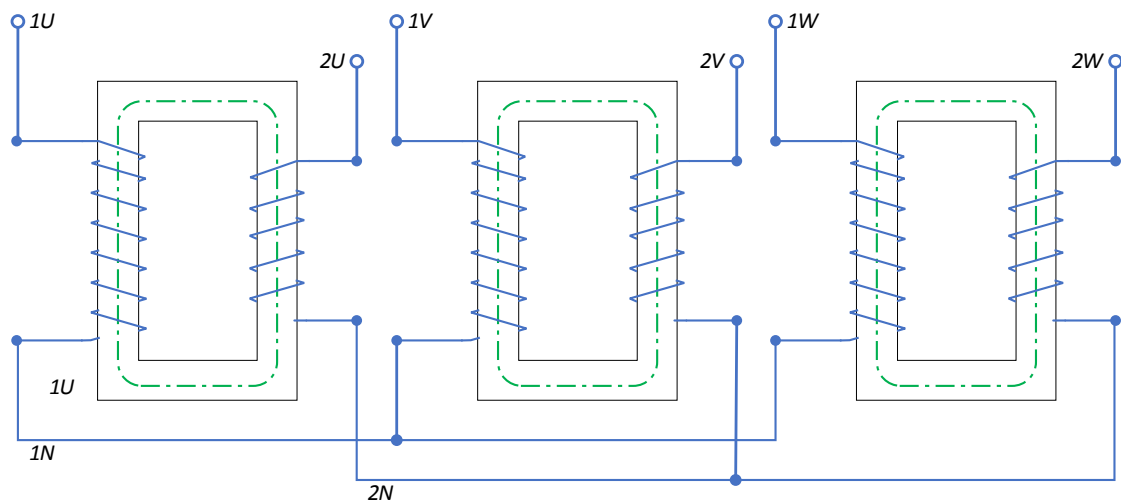
Grafički prikaz ovisnosti η o opterećenju prikazan je na slici 2.17.



Slika 2.17: Krivulja korisnosti [Izvor: Autorski rad]

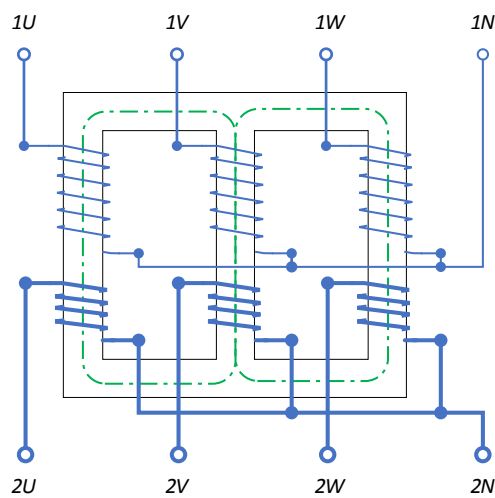
2.5. Trofazni transformatori

Kod trofaznih transformatora moguća su dva rješenja. Prvo rješenje je spajanje tri jednofazna transformatora s odvojenim magnetskim tokovima, a drugo rješenje je jedan trofazni transformator sa zajedničkim magnetskim tokom. Grupa jednofaznih transformatora se obično primjenjuje za velike jedinice u Americi pa ih zovemo *američka transformacija* i ima prednost vezanu za transport, održavanje i sigurnost rezerve jer su kvarovi transformatora na jednoj fazi. Međutim, američka izvedba je oko 15 % skuplja jer se ne koristi činjenica da je zbroj trenutnih vrijednosti uravnoteženih magnetskih tokova u sve tri faze jednak nuli i zahtijevaju više prostora. Američka izvedba trofaznih transformatora prikazana je na slici 2.18.



Slika 2.18: Američka izvedba transformatora [Izvor: Autorski rad]

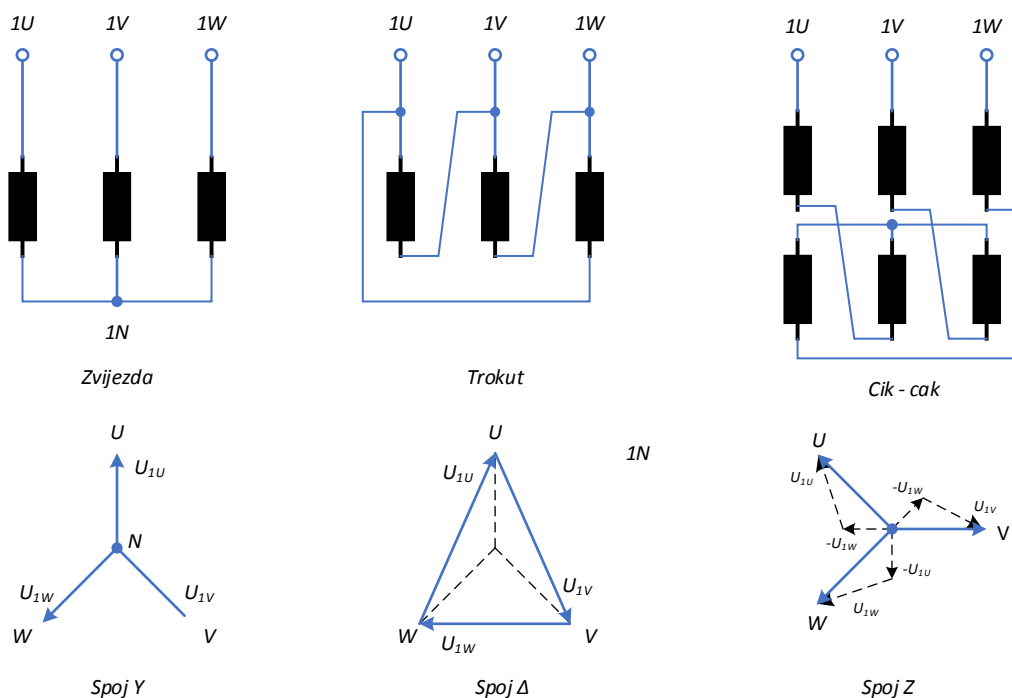
Trofazni transformatori sa zajedničkim magnetskim tokom se često primjenjuju u Europi te iz zovemo europska izvedba transformatora, prikazana na slici 2.19.



Slika 2.19: Europska izvedba transformatora [Izvor: Autorski rad]

Namoti trofaznih transformatora mogu se spajati na tri načina koja su prikazana na slici 2.20:

- trokut
- zvijezdu
- cik-cak, odnosno slomljena zvijezda.



Slika 2.20: Osnovni spojevi trofaznih transformatora [Izvor: Autorski rad]

Prema važećim standardima priključne stezaljke označavaju se slovnim oznakama U, V, W, N . Ispred slovnih oznaka za pojedinu fazu za označavanje razine napona namota stavlja se: broj „1” za visokonaponski namot (VN), a broj „2” za niskonaponski namot (NN). Krajevi namota označavaju se brojevima „1” za početak namota, a broj „2” za kraj namota i to poslije slovne oznake, npr. $1U_2$ za završetak VN namota prve faze. Uz krajeve je potrebno definirati i smjer namatanja namota oko stupa (desno ili lijevo).

2.5.1. Glavna obilježja pojedinih spojeva transformatora

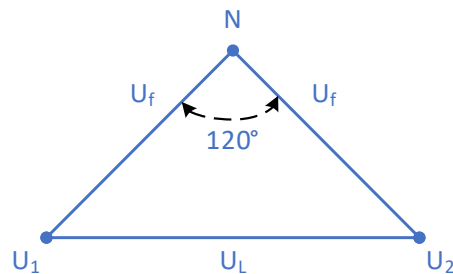
- Trokut (oznaka **D** za VN, odnosno **d** za NN) – kako su linijski i fazni naponi jednaki, ovaj spoj, u odnosu na spoj zvijezdu, zahtijeva veći broj namotaja manjeg presjeka zbog struje koje je 3 puta manja uz veći udio izolacije.
- Zvijezda (oznaka **Y** za VN, odnosno **y** za NN) – fazni napon je 3 puta manji od linijskog napona.
- Cik – cak (slomljena zvijezda oznaka **z**) – ovaj spoj se isključivo primjenjuje za NN namote. Namot pojedine faze sačinjavaju dva serijski povezana polunamota koji nisu na istom stupu. U odnosu na zvijezdu, ovaj spoj zahtijeva 15,5 % više bakra, ali lako podnosi nesimetrično opterećenje pa se unatoč tome što je skuplji, primjenjuje kod distributivnih transformatora manjih snaga.

Kada je izveden priključak na zvijezdišta ili neutralnu točku, oznaci spoja doda se slovo **N** ako je izveden na VN stranu, a **n** ako je izveden na NN stranu. (Krčum, M. 2009)

Spoj u zvijezdu dobiva se tako da se krajevi namotaja međusobno spoje u zajedničku točku. Spojna točka naziva se nultom točkom.

Fazni napon je napon između jednog linijskog voda i nultog voda. Fazne napone s obzirom na izlazne točke označavamo sa $U_{L1,N} = U_1$, $U_{L2,N} = U_2$, $U_{L3,N} = U_3$. Ako se zanemare padovi napona na samim zavojima generatora, možemo smatrati da su fazni naponi jednaki faznim elektromotornim silama (EMS): E_1 , E_2 i E_3 . Fazni naponi su jednaki po iznosu i fazno su pomjereni za 120° . Zbroj faznih napona jednak je nuli. Linijski naponi su naponi između bilo koja dva linijska voda. Zbroj linijskih napona je, kao i kod faznih napona, jednak nuli.

Linijski naponi su jednaki po iznosu i svaki je pomjeren prema svom referentnom naponu za 30° . Odnos efektivnih vrijednosti linijskih i faznih napona možemo odrediti ako se izdvojeno promatraju, kako je prikazano na slici 2.21.



Slika 2.21: Određivanje odnosa faznih i linijskih napona [Izvor: Autorski rad]

Temeljem kosinusova poučka dobije se:

$$\frac{U_L}{2} = U_f * \cos 30^\circ \quad \rightarrow \quad U_L = \sqrt{3} * U_f$$

Jednadžba 2.33

Za spoj u zvijezdu linijski naponi su za 1,73 puta veći od faznih napona, dok su kod spoja u trokut linijski naponi jednaki faznim naponima $U_L = U_f$. Niskonaponske električne mreže obično se rade s linijskim naponima od 380 V za koje su fazni naponi 220 V.

Fazne struje u namotajima I_{f1} , I_{f2} i I_{f3} su, kao i kod napona, jednaki po iznosu i fazno su okrenute za 120° . Odnos faznih i linijskih struja za spoj u trokut je analogno razmatranju odnosa napona u spoju u zvijezdu:

$$I_L = \sqrt{3} * I_f$$

Jednadžba 2.34

U spoju trokut linijske struje su za 1,73 puta veće od faznih struja.

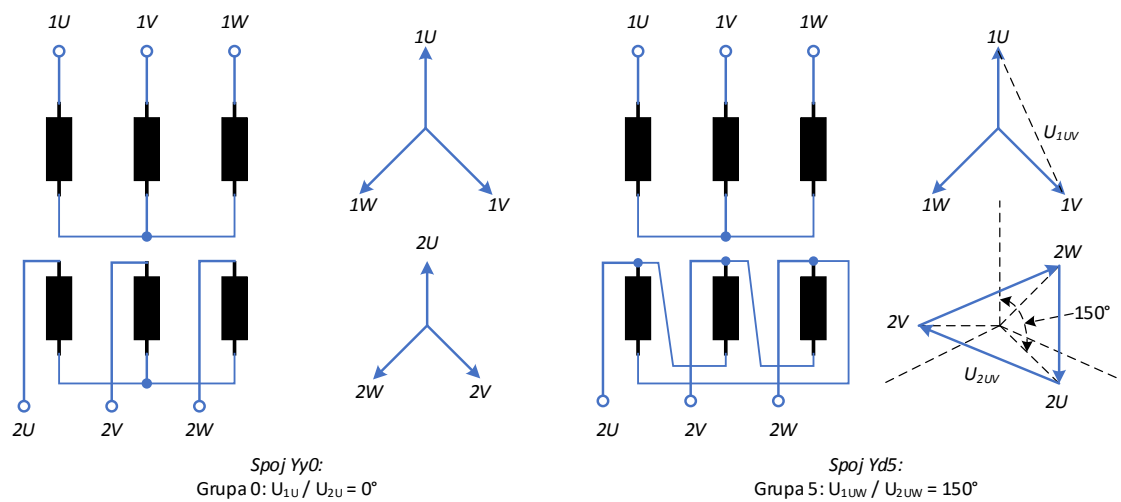
Usporedi li se spoj zvijezda i spoj trokut dolazimo do sljedećeg zaključka:

- U spoju zvijezda povećava se napon između linijskih vodova za 1,73 puta u odnosu na napone pojedinih faza. Prednost ovog spoja je što postoji nul-vod. Ako je i trošilo spojeno u zvijezdu, mogu se povezati nultočke generatora i trošila na zajedničku točku odnosno na nul-vodič. Time izbjegavamo poteškoće koje mogu nastati radi nesimetrije sustava.
- U trokut spoju nema mogućnosti izvođenja nul-voda, što može uzrokovati znatne poteškoće pri neravnomjernom opterećenju faza. Zato se u razvodima niskonaponskih mreža sekundarni namotaji mrežnih transformatora u pravilu spajaju u zvijezdu.

Najčešća grupa spoja kod transformatora su:

- Spoj **Yyn** primjenjuje se kod distributivnih transformatora manjih snaga. Prednosti uporabe ovog spoja je manja potrošnja bakra i izolacije u odnosu na z-spoj, mogućnost raspolaganja s dva naponska nivoa – linijski napon za elektromotore, a fazni napon za osvjjetljenje i jednofazne priključke potrošača. Nedostatak ovog spoja je znatno odstupanje od normalnih vrijednosti kad je opterećenje nesimetrično, što je naročito izraženo kad se primjenjuje grupa od tri jednofazna transformatora (američki tip). Zato se ovaj spoj isključivo koristi kod trofaznog trostupnog transformatora (europski tip).
- Spoj **Yd** se također upotrebljava na distributivnim mrežama kada su snage i naponi veći nego u spoju **Yyn**. Ovakvi transformatori se uglavnom koriste za napajanje trofaznih potrošača.
- Spoj **Dyn** se primjenjuje često, u širokom spektru snaga i u mnogim primjenama. Primjenjuje se u elektranama (za povišenje napona) i kod prijamnika (za sniženje napona).
- Spoj **Yzn** ima sve dobre osobine spoja **Yyn** u pogledu raspoloživosti linijskih i faznih napona, a utjecaj nesimetrije je zanemarivo mali. To zahtijeva oko 15 % veći trošak bakra na namote u odnosu na spoj zvijezda. Ovaj spoj je specijalno pogodan za napajanje tiristorskih i diodnih ispravljača, jer doprinosi redukciji viših harmonika koji se iz ispravljača prenose u mrežu na koju je priključen primar i koji izaziva izobličenje napona.

Uz spojeve, potrebno je definirati grupu spoja, odnosno satni broj ili fazni pomak između primarnih i sekundarnih napona istoimenih faza. Termin satni broj je uveden zbog analogije sa satom, dok fazni pomak o kome je riječ iznosi $n * 30^\circ$, gdje je n cijeli broj od 0 do 11. Kod nas su standardizirane sljedeći spojevi: grupa „0” – primjenjuju se spojevi **Yy0**, grupa „5” – primjenjuje se spojevi **Yd5**, **Dy5** i **Yz5**. Prikaz spojeva je prikazan na slici 2.22.

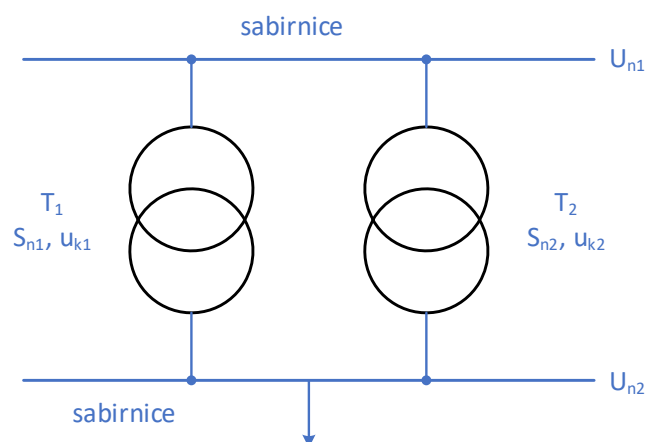


Slika 2.22: Prikaz istovrsnih i raznovrsnih spojeva transformatora [Izvor: Autorski rad]

2.6. Paralelni rad transformatora

Paralelni rad transformatora može se ostvariti spajanjem istoimenih priključaka primarne strane svih transformatora na odgovarajuće faze visokonaponske mreže. Isto tako postiže se i spajanjem istoimenih priključaka sekundarne strane svih transformatora na odgovarajuće faze niskonaponske mreže.

Preko sabirnice ili preko mreže može se vršiti paralelni rad. U osnovi ovo rješenje je skuplje nego izbor jednog transformatora veće snage te se izbjegava u slučajevima za naknadno podmirivanje korisnika, za podmirivanja povremenih dodatnih opterećenja, izgradnjama trafostanica u vremenskim razmacima ili za potrebama za većom pogonskom sigurnošću koja se ogleda u držanju rezervnog transformatora za slučaj kvara jednog transformatora.



Slika 2.23: Paralelni rad dva transformatora [Izvor: Autorski rad]

Za paralelni rad transformatori trebaju ispuniti sljedeće uvjete:

- Primarni namoti moraju biti predviđeni za isti napon i prijenosni omjeri moraju biti jednaki da bi sekundarni naponi u praznom hodu bili jednaki. Prijenosni omjer, prema standardu, podrazumijeva odnos naznačenih napona prikazanih na natpisnoj pločici.
- Da bi sekundarni naponi bili u fazi, transformatori moraju imati istu grupu spoja.
- Da bismo izbjegli struje izjednačenja koje uzrokuju preopterećenje jednog, odnosno podopterećenje drugog transformatora, relativni naponi kratkog spoja moraju biti jednaki. Dozvoljena tolerancija je $\pm 10\%$ u odnosu na aritmetičku srednju vrijednost relativnih napona kratkog spoja svih transformatora.
- Snaga transformatora treba biti približno jednaka u oba transformatora, odnos snaga ne smije biti veći od 1:3.

Pitanja za provjeru znanja

1. Što je transformator?
2. Navedi sastavne dijelove transformatora.
3. Što je idealni transformator i zašto ga proučavamo?
4. Koje pojave čine transformator realnim?
5. Što su specifični gubitci u željeznoj jezgri i kako se mjere?
6. Koje se vrste izolacije koriste za izolaciju limova?
7. Koji su osnovni oblici jezgre jednofaznih i trofaznih transformatora?
8. Koji se materijali koriste za izradu namota?
9. Koje su prednosti, a koji nedostaci američke izvedbe trofaznih transformatora u usporedbi s europskom izvedbom?
10. Nacrtaj trofazni namot u spoju trokut i označi krajeve i stezaljke za oba namota.
11. Nacrtaj trofazni namot u spoju zvijezda i označi krajeve i stezaljke za oba namota.
12. Kakav je odnos između faznih i linijskih napona te faznih i linijskih struja u spoju zvijezda i spoju trokut?

3

POGLAVLJE

SINKRONI STROJEVI

Nakon ovog poglavlja moći ćete:

- upoznati princip rada i konstrukcijske dijelove sinkronih strojeva
- objasniti prazni hod, kratki spoj i opterećenje sinkronih strojeva
- mjerenjem prikazati karakteristične vrijednosti u praznom hodu, kratkom spoju i opterećenju

3.1. Uvod u sinkrone strojeve

Sinkroni stroj je dobio ime zato što se elektromagnetske pojave i promjene u statoru vremenski podudaraju s promjenama na rotoru. Sinkroni strojevi su rotacijski električni strojevi i dijelimo ih na (Krčum, M. 2009):

- sinkrone generatore
- sinkrone motore.

Proces pretvaranja mehaničke energije u električnu ostvaruju se sinkronim generatorima, dok sinkroni motori pretvaraju električnu energiju u mehaničku energiju. Kategorizacija sinkronih strojeva temelji se na njihovoj praktičnoj primjeni, iako su generatori i motori konstrukcijski jednaki. Hoće li sinkroni stroj funkcionirati kao generator ili motor ovisi o tome kako se stroj priključi i kako se upotrijebi. Ako se na osovinu rotora sinkronog stroja dovede neka mehanička energija, on će raditi kao generator, a ako se u statorski namot dovede električna energija iz gradske mreže, radit će kao motor. Može se zaključiti da svaki sinkroni stroj može raditi i kao generator i kao motor.

U praktičnom procesu projektiranja i proizvodnje, svaki sinkroni stroj u tvornici konstruiran je s posebnom svrhom, osiguravajući da je unaprijed određeno hoće li stroj raditi kao generator ili motor. Sinkroni strojevi se pretežito koriste kao generatori koji osiguravaju pouzdan izvor električne energije za mrežu izmjenične struje. Izrađuju se uglavnom za velike snage.

Sinkroni generator mehaničku energiju dobiva od pogonskog stroja koji je osovinom povezan s rotorom generatora. Pogonski stroj je obično parna turbina, vodna turbina ili motor s unutarnjim izgaranjem.

Ako je pogonski stroj parna turbina, generatori se moraju graditi za velike brzine, zato što parne turbine imaju velike brzine rotacije. Točan broj okretaja je određen konstrukcijom generatora koji se grade uglavnom za dvije brzine, i to 1500 min^{-1} i 3000 min^{-1} . Ako se želi da struja koja izlazi iz generatora ima frekvenciju 50 Hz, turbina mora rotirati brzinom od 1500 min^{-1} , rotor generatora ima četiri pola, odnosno dva para polova, a s brzinom od 3000 min^{-1} rotor generatora ima dva pola odnosno jedan par polova.

Generatori kojima je pogonski stroj parna turbina nazivaju se brzohodni ili turbogeneratori. Vodne turbine rade s manjim brzinama od 1000 min^{-1} do 60 min^{-1} . Generatori u kojima je ova turbina nazivaju se hidrogeneratori.

Obje vrste generatora upotrebljavaju se za proizvodnju električne energije u elektranama, turbogeneratori se koriste u termoelektranama, dok hidrogeneratori u hidroelektranama.

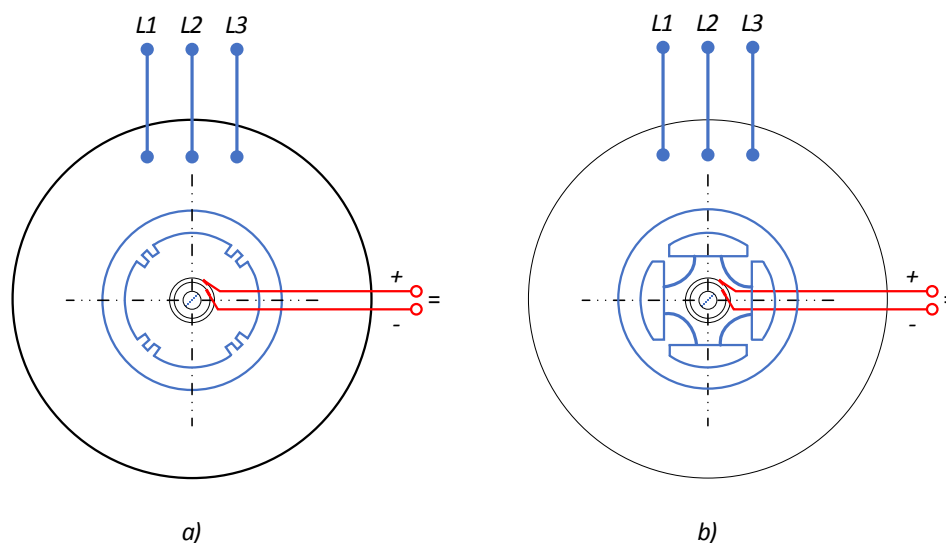
3.2. Konstruktivni dijelovi sinkronih strojeva

Magnetski krug sinkronog stroja sastoji se, kao i kod svih rotirajućih strojeva, iz dva osnovna dijela: nepokretnog dijela ili statora i rotirajućeg dijela ili rotora, koji su međusobno razdvojeni zračnim rasporem. Rotor čini cjelinu s osovino stroja, na kojoj se nalazi sam rotor koji sadrži 2 pola, koji mogu biti građeni od masivnog željeza ili od limova. Stator je šuplji valjak sastavljen od tankih magnetskih limova s ravnomjernim utorima na unutrašnjoj strani i složenih u oklopu statora. (Jureković, J. 2003)

U sinkronom generatoru jedan dio je odgovaran za stvaranje stalnog magnetskog toka, a u drugom dijelu sinkronog generatora se nalaze vodiči. U vodičima se inducira napon presijecanjem silnica magnetskog toka. Sinkroni stroj se sastoji od dva namota. Jednom namotu je zadaća da stvara stalni magnetski tok kada kroz njega protječe istosmjerna struja, a u drugome namotu se inducira izmjenični napon presijecanjem silnica magnetskog toka. Namot koji stvara stalni magnetski tok zove se *uzbudni namot* i nalazi se na rotoru, a namot u kojem se inducira izmjenični napon zove se *armaturni namot* i nalazi se na statoru. Na rotoru se dovodi istosmjerna struja iz izvora napona 200 V – 350 V, što ne predstavlja značajne izazove kliznim kolutima.

Postoje dvije izvedbe oblika, odnosno vrste rotora, a koji su prikazani na slici:

- Rotor sa neistaknutim polovima (cilindričan) – cilindar je od željeza s utorima, obično masivnog, armaturni namot je sastavljen iz sekcija smještenih u utorima. Ova konstrukcija primjenjuje se isključivo kod velikih dvopolnih ili četveropolnih turbogeneratora
- Rotor s istaknutim polovima – međupolnim prostorom kod kojih je namot koncentriran oko jezgre pola. Ova konstrukcija se upotrebljava kod strojeva s većim brojem polova hidrogeneratora.



Slika 3.1: Osnovni tipovi sinkronih strojeva: a) sinkroni stroj s neistaknutim polovima, b) sinkroni stroj s istaknutim polovima [Izvor: Autorski rad]

3.2.1. Stator

Mirujući dio stroja je stator koji je napravljen u obliku valjka i sastoji se od 3 karakteristična dijela (Jureković, J. 2003):

- kućišta
- jezgre ili statorskog paketa
- namota.

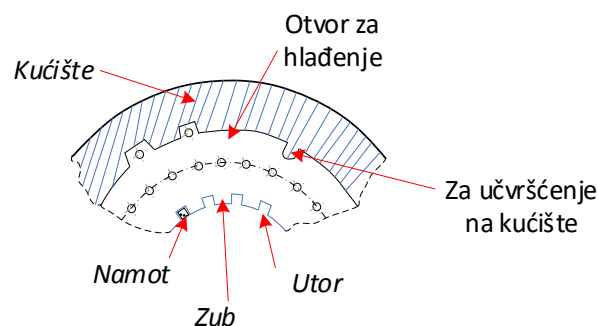
Kućište sinkronog generatora izrađuje se uglavnom od lijevanog željeza, valjanog čelika i zavarenih dijelova. Njegova glavna funkcija je zaštita aktivnih dijelova stroja (generatora ili motora). Također služi kao nosač jezgre i namota, a donji dio je proširen i ojačan kako bi se pričvrstio na vodoravne i stabilne temelje. Na bočnim stranama stroja nalaze se zaštitni poklopci s ugrađenim ležajevima za osovinu rotora. Kod većih strojeva koriste se posebni nosači s ležajevima kako bi se rotor stroja održao na mjestu.

Ploče su pričvršćene za kućište i stegnute su s obje strane statorskog paketa. Stator brzohodnih strojeva ima oblik uzdužnog valjka, s dužinom većom od promjera. Kod sporohodnih strojeva promjer statora je velik u odnosu na njegovu dužinu.

Statorski paket ili jezgra izrađeni su od limova debljine 0,35 ili 0,5 mm. Specifični gubitci u paketu limova kreću se od 3,0 do 2,6 W/kg, a kod specijalnih limova 1,75 W/kg. Kod hladnovaljanih limova imaju manje specifične gubitke.

Jezgra mora biti čvrsta kako bi se spriječilo pomicanje limova i cijelog paketa tijekom rada stroja i vibracija kojima je stator izložen. Svako pomicanje bi moglo uzrokovati mehanička oštećenja.

Na vanjskom rubu limovi imaju žljebove koji služe za pričvršćivanje jezgre za kućište, kako je prikazano na slici 3.2.



Slika 3.2: Segment statora [Izvor: Autorski rad]

Namot statora se izrađuje od bakrenih vodiča. Statorski namot se stavlja u utore statora. Kod poluzatvorenih utora postoje dva načina izvođenja: *šivanjem* i *usipanjem*. Ako je di-

menzija vodiča veća od utora, tada se namot izvodi šivanjem, tj. povlačenjem vodiča kroz utore u određenom broju i redoslijedu. Kada je vodič tanji od utora, tada se namot izvodi usipanjem vodiča. Na šablوني se izradi cijeli svitak u mekoj izvedbi, a zatim se vodič po vodič usipa u utor statora.

Namot izveden šivanjem koristi se kod strojeva srednje snage, dok se namot izveden usipanjem koristi kod strojeva male snage.

Utori otvorene izvedbe koriste se kod strojeva velike snage, a u njih se ulažu gotovi svitci izrađeni na šablوني, izolirani i učvršćeni odgovarajućom izolacijom. Takav namot, gdje se oblik, veličina i izolacija svitka potpuno određuju izvan statora, naziva se *šablonski namot*.

Danas se za izolaciju utora koriste novi sintetski izolacijski materijali visoke termičke klase. Vodiči za izradu namota moraju biti pojedinačno izolirani. Izoliraju se lakiranjem, opletanjem pamukom, svilom, natron-papirom, mikafolijom, zatim omotavanjem vrpcom. Izolacija vodiča mora biti na svakom mjestu jednake kakvoće. Za izolaciju se danas koristi izolacija od staklenih vlakana i staklene vrpce.

3.2.2. Rotor

Uzbudni dio sinkronog stroja je rotor. Na rotoru je smješten uzbudni namot kojim prolazi istosmjerna struja i stvara magnetski tok.

S obzirom na konstrukciju stroja postoje dvije vrste rotora:

- Strojevi s okruglim (valjkastim) rotorom, cilindrični ili rotori s neistaknutim polovima
- strojevi s istaknutim polovima.

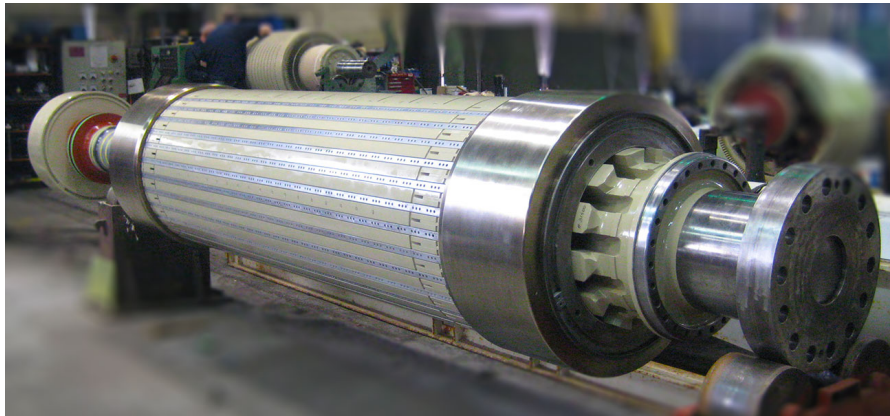
S obzirom na brzinu vrtnje rotora razlikuju se:

- brzohodni strojevi brzine $750 - 3000 \text{ min}^{-1}$ (2 - 8 polova)
- strojevi srednje brzine sa $300 - 600 \text{ min}^{-1}$ (10 - 20 polova)
- sporohodni strojevi s manje od 300 min^{-1} (više od 20 polova).

3.2.2.1. Strojevi s okruglim (valjkastim) rotorom

Strojevi s okruglim (valjkastim) rotorom nazivaju se još brzohodni rotori ili rotori s neistaknutim polovima. Izrađen je u obliku valjka, a uzduž valjka je smješten uzbudni namot. U praksi se najviše izvodi kao dvopolni.

Na slici 3.3 je prikazan jedan dvopolni turborotor s utorima za smještaj uzbudnog namota. Utori se oblažu s izolacijom, a na vrhu se zatvaraju klinovima. Zbog mehaničkih naprezanja koji se javljaju na radu, za brzinu vrtnje od 3000 min^{-1} najveći mogući promjer rotora je 1150 mm. Duljina je ograničena zbog kritičnih brzina vrtnje i mogućnosti balansiranja.



Slika 3.3: Dvopolni turborotor [Izvor: <https://motionelectric.com/ac-synchronous-machines/>]

Rotor je napravljen od jednog masivnog komada od čelika, kao što je prikazano na slici 3.3. Dijelovi rotora na kojima nema utora nazivaju se magnetski polovi, križne su izvedbe pa tako s ostalim dijelom rotora čine valjak. Na osovinu se navuku čelične ploče u vrućem stanju, a na pločama se urežu utori za smještaj namota. Takvi rotori se rade za turbogeneratore vrlo velike snage. Turborotori za manje snage generatora izvode se od dinamo limova debljine 1 mm.

Rotor turbogenerators mora biti savršeno obrađen, jer je on najvažniji dio turbogenerators, a radi pod nepovoljnim uvjetima kao što su velika naprezanja, velike brzine i velike centrifugalne sile.

Uzbudni namot izvodi se od profilnih bakrenih vodiča koji se izoliraju međusobno i prema masi rotora.

Dio namota rotora koji čine čelne spojeve mora biti dobro učvršćen za rotor, jer bi se inače deformirao pri rotaciji centrifugalne sile i prouzročio oštećenja.

Rotor kao i unutarnji dio statora mora biti potpuno okrugle izvedbe, a između oboda rotora i statora mora imati mali razmak, koji se naziva zračni raspor. Zračni raspor mora biti što manji, da bi i magnetski otpor bio što manji.

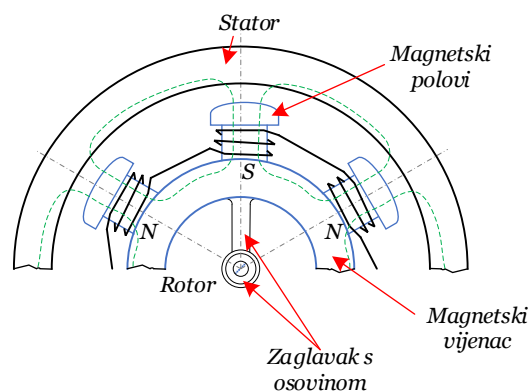
3.2.2.2. Rotor s istaknutim polovima

Rotor se stavlja na konstrukciju stroja, koja mora izdržati ne samo znatnu težinu rotora, nego i osovinu koja je spojena na turbinu. Najpoznatiji rotor s istaknutim polovima je rotor hidrogenerators, koji može biti sporohodni i brzohodni, s vertikalnom osovinom. (Jureković, J. 2003)

Osim vertikalne osovine, mogu se izvoditi i s horizontalnom osovinom. Rotor s istaknutim polovima čine tri osnovna dijela:

- magnetski polovi
- magnetski vijenac
- zaglavak s osovinom.

Magnetski polovi se sastoje od polnog nastavka, magnetskog stopala ili polne papuče, jezgre magnetskog pola i uzbudnog namota, kako je prikazano na slici 3.4.



Slika 3.4: Sastavni dijelovi rotora s istaknutim polovima [Izvor: Autorski rad]

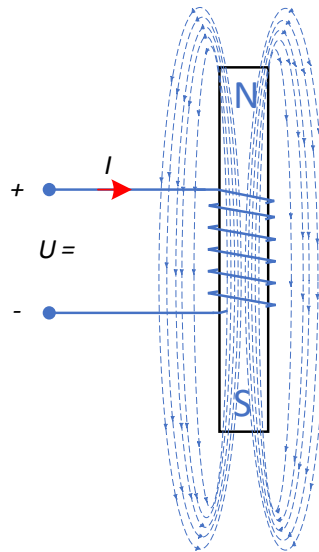
Polni nastavak može biti dio jezgre magnetskog pola ili se može izvesti kao poseban dio koji se pričvršćuje vijcima na pojedinačnu jezgru. Kod statorskih utora poluzatvorene izvedbe polni nastavak može biti masivan i izrađen od dobro vodljivog magnetskog materijala. Jezgra magnetskog pola može biti masivna ili lamelirana, pri čemu je magnetsko stopalo redovni dio jezgre kada se koristi lamelirana jezgra magnetskog pola.

Magnetski vijenac je izrađen od masivnog dobro vodljivog magnetskog materijala. Dimenzioniran je na način da omogućuje provođenje magnetskog toka koji se zatvara preko magnetskih polova. Također, magnetski vijenac mora biti dovoljno jak da izdrži mehanička naprazanja uzrokovana vlastitom težinom i težinom magnetskih polova, kao i dinamičke sile koje nastaju zbog vrtnje. Po potrebi, magnetski vijenac se može izraditi i od limeliranog materijala.

Na magnetski vijenac se izmjenično pričvršćuju sjeverni i južni magnetski pol. Namoti magnetskih polova također se pričvršćuju na jezgru kako bi se spriječilo deformiranje i kidanje tijekom rotacije.

3.3. Načelo rada sinkronog generatora

Elementi sinkronog generatora su stator s armaturnim namotom, rotor s magnetskim polovima i uzбудnim namotom i izvor istosmjerne struje. Poznato nam je da se elektromagnet dobije ako se oko željeza namota žica u obliku zavojnice i kroz tu žicu pusti struja, kako je prikazano na slici 3.5. (Krčum, M. 2009):



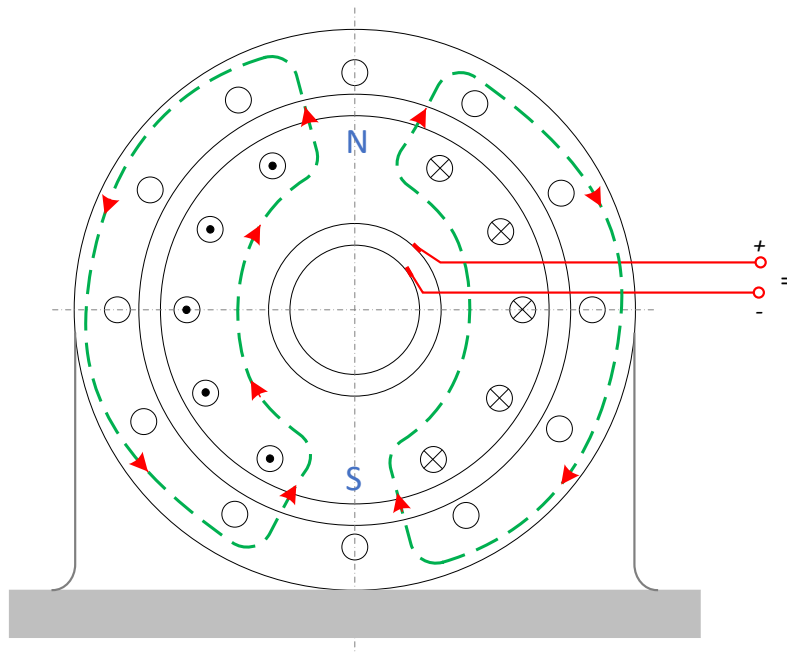
Slika 3.5: Dobivanje elektromagneta [Izvor: Autorski rad]

Istosmjerna struja zadržava svoju vrijednost, pa će i magnetski tok koji se generira unutar željeza imati konstantnu i nepromjenjivu vrijednost. Smjer magnetskog toka određen je magnetskim polovima N i S te ovisi o smjeru namatanja zavojnice i smjeru struje koja teče kroz zavojnicu. Magnetski tok se kreće u smjeru napredovanja struje, odnosno u smjeru napredovanja desnog vijka.

3.3.1. Magnetski polovi sinkronog generatora

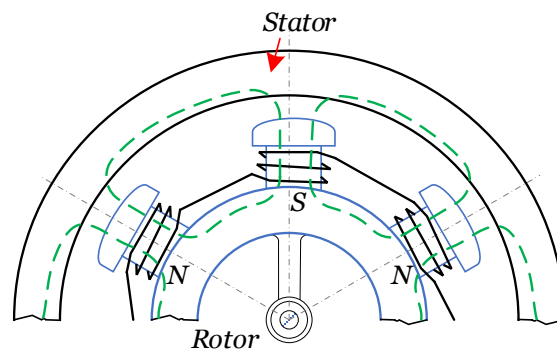
Magnetski polovi su elektromagneti. Imaju željenu jezgru i uzbudni namot, odnosno zavojnicu. Dva pola uvijek čine par, tj. jedan sjeverni i južni pol.

Turbogenerator s uzbudnim namotom turborotora s kliznom kolutima, četkicama i izvorom istosmjernog napona prikazan je na slici 3.6. Uzbudna struja teče od „+“ pola izvora kroz uzbudni namot do „-“ pola izvora te pritom uzbuđuje magnetski tok. Silnice magnetskog toka (označene zelenom bojom) izlaze iz rotora, na sjevernom polu prelaze zračni raspor i ulaze u aktivni dio statora, tj. armaturni namot, granaju se na dvije strane te ponovo prelaze preko zračnog raspra do južnog pola rotora. Time se zatvara magnetski krug. Na svom putu u statoru, magnetski tok je ulančio gotovo sve vodiče armaturnog namota.



Slika 3.6: Magnetski tok dvopolnog turbogenerators [Izvor: Autorski rad]

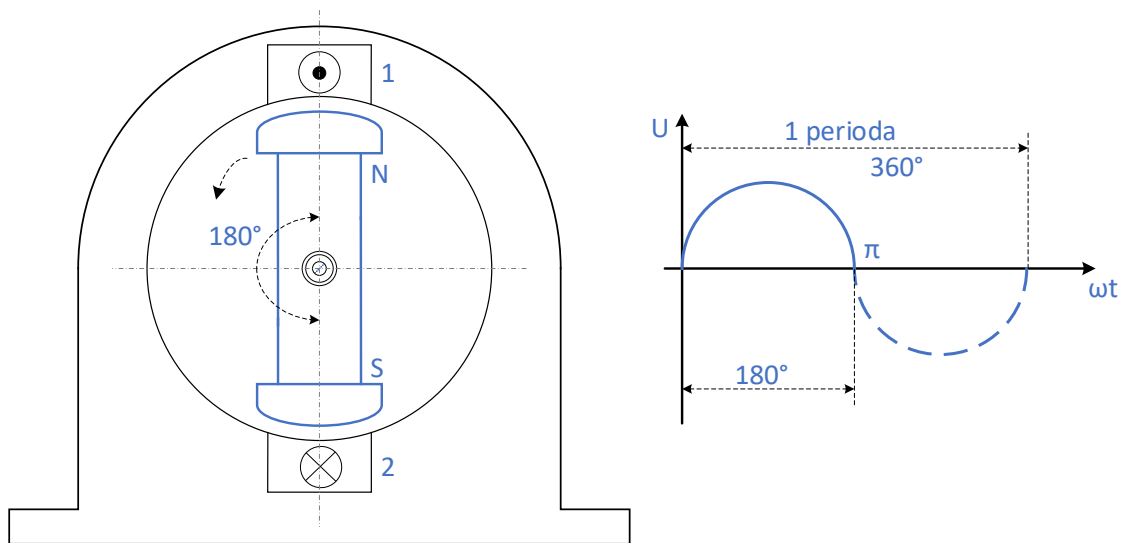
Segment hidrogenerators s istaknutim magnetskim polovima je shematski prikazan na slici 3.7.



Slika 3.7: Magnetski tok hidrogenerators [Izvor: Autorski rad]

3.3.2. Oblik inducirano napona

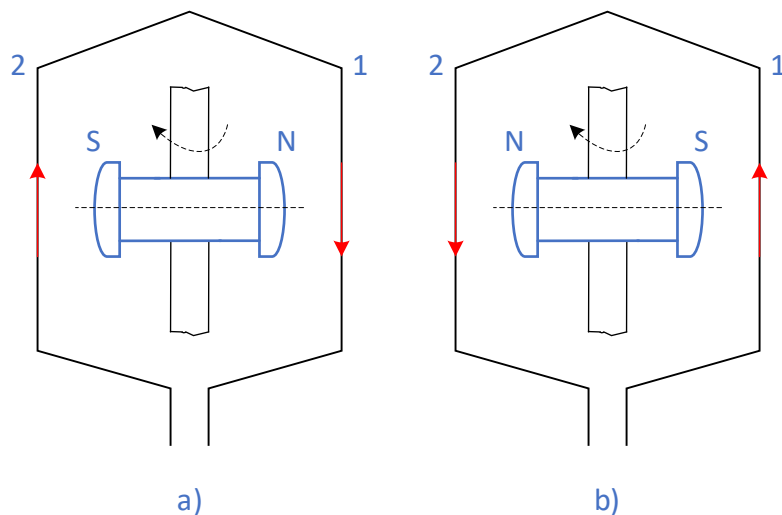
Inducirani napon u armaturnom namotu je *izmjeničan sinusoidnog oblika*. Za jednostavnost, pretpostavimo da u statoru postoje dva utora u kojima je smješten jedan zavoj, kako je prikazano na slici 3.8.



Slika 3.8: Sinkroni stroj za tumačenje dobivanja induciranog napona [Izvor: Autorski rad]

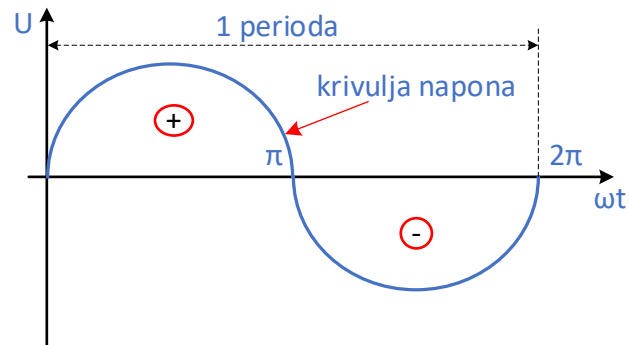
Vodiči 1 i 2 čine jedan zavoj. Kada ispred vodiča 1 prolazi pol N, istodobno ispred vodiča 2 prolazi pol S. U oba vodiča induciraju se naponi koji si potpomažu. Raspodjela magnetskog toka ima sinusoidni oblik, pa će takva oblika biti i inducirani napon u zavoju.

Na slici 3.9 prikazan je zavoj po cijeloj svojoj dužini s ucrtanim smjerom induciranog napona, u ovisnosti o smjeru rotacije magnetskog toka. Smjer induciranog napona označit će se oznakom „+“ na slici 3.9. a), a smjer induciranog napona prema slici 3.9. b) označit će se oznakom „-“.



Slika 3.9: Induciranje napona u jednom zavoju: a) induciranje pozitivnog poluvala, b) induciranje negativnog poluvala [Izvor: Autorski rad]

Ako se nacrtaju krivulje induciranog napona, tada će prema slici 3.9 a) smjer induciranog napona dobiti pozitivni poluval, a prema slici 3.9 b) dobiva se negativni poluval kako je prikazano na slici 3.10.



Slika 3.10: Inducirani napon sinusoidnog oblika [Izvor: Autorski rad]

Kada jedan par polova prođe ispred vodiča jednog zavoja, u zavoju će se stvoriti napon koji predstavlja jedan ciklus sinusnog vala. Za svaki puni okretaj rotora, jedan par polova inducira jedan ciklus napona. Ako stroj ima 4 pola, tj. 2 para polova ($p = 2$), za jedan puni okretaj rotora ispred vodiča prođu dva para polova koji će inducirati dva puna vala, imat će dvije periode sinusnog napona.

3.3.3. Frekvencija induciranog napona

Frekvencija, broj perioda u sekundi, ovisi o brzini vrtnje magnetskih polova i o broju parova polova. Iz prethodne slike 3.9. vidi se da se u vodiču 1 mijenja smjer induciranog napona kada se promijeni magnetski pol. To znači da će se te promjene događati brže, što je je brža promjena magnetskih polova.

Ispred vodiča će se mijenjat magnetski polovi to brže, što ih ima više i što je veća brzina njihova kretanja.

Frekvencija od 50 Hz je u Europi usvojena za izmjenični napon i struju. Za tu frekvenciju su građena sva trošila električne energije, električni strojevi i transformatori i drugi uređaji.

Frekvencija 50 Hz znači da napon i struja imaju 50 punih perioda odnosno titraja u sekundi. Prema tome se svi generatori izmjenične struje moraju izrađivati tako da daju napon i struju od 50 Hz.

Frekvencija f [Hz] ovisi o brzini vrtnje stroja n [min^{-1}] i broju para polova p . Prema tome dobivamo relaciju:

$$f = \frac{n * p}{60} \text{ [Hz]}$$

Jednadžba 3.1

Kako je frekvencija poznata, pomoću ove relacije može se lako izračunati brzina rotacije sinkronog generatora za određen broj par polova:

$$n = \frac{60 * f}{p} \text{ [min}^{-1}\text{]}$$

Jednadžba 3.2

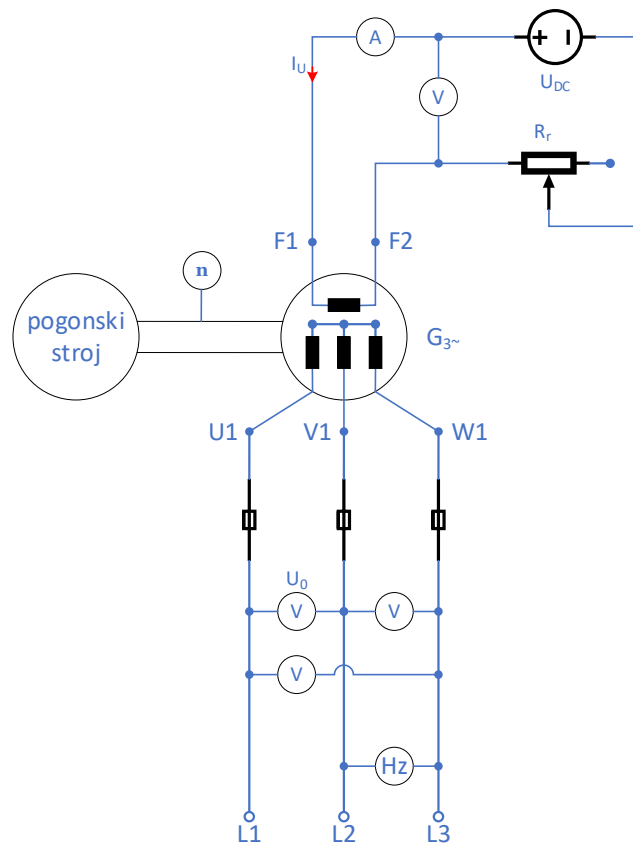
3.4. Pogonska stanja sinkronih generatora

Kao i kod transformatora, pogonska stanja možemo predočiti i na sinkrone generatore na ova tri stanja:

- pri praznom hodu
- pri kratkom spoju
- pri opterećenju.

3.4.1. Prazni hod sinkronog generatora

Kad sinkroni generator radi u praznom hodu, magnetski polovi se aktiviraju pokrećući rotor pomoću pogonskog stroja, a na stezaljkama armaturnog namota nije priključen nikakav teret. Shema spoja pri pokusu praznog hoda sinkronog generatora prikazana je na slici 3.11.



Slika 3.11: Shema spoja pokusa praznog hoda generatora [Izvor: Autorski rad]

U armaturnom namotu inducirat će se izmjenični napon sinusnog oblika, a može se izmjeriti na stezaljkama generatora. Može se izračunati i po formuli.

$$E = 4,44 * f * N * \Phi_{gl} * K_n \quad [V]$$

Jednadžba 3.3

Gdje je:

- f - frekvencija 50 Hz
- N - broj zavoja armaturnog namota po fazi
- Φ_{gl} - glavni magnetski tok
- K_n - faktor namota.

Prema gornjoj jednadžbi može se vidjeti da u njoj postoje veličine koje se kod izgrađenog stroja ne mogu mijenjati. Pri stalnom broju okretaja rotora mora biti i stalna frekvencija, namotan stator ima određen broj zavoja, a nepromjenjiv je i faktor K_n .

Iz tog razloga se može uzeti da je umnožak stalne vrijednosti označene s K (konstanta).

Gornja relacija može se zapisati i kao:

$$E = K * \Phi_{gl}$$

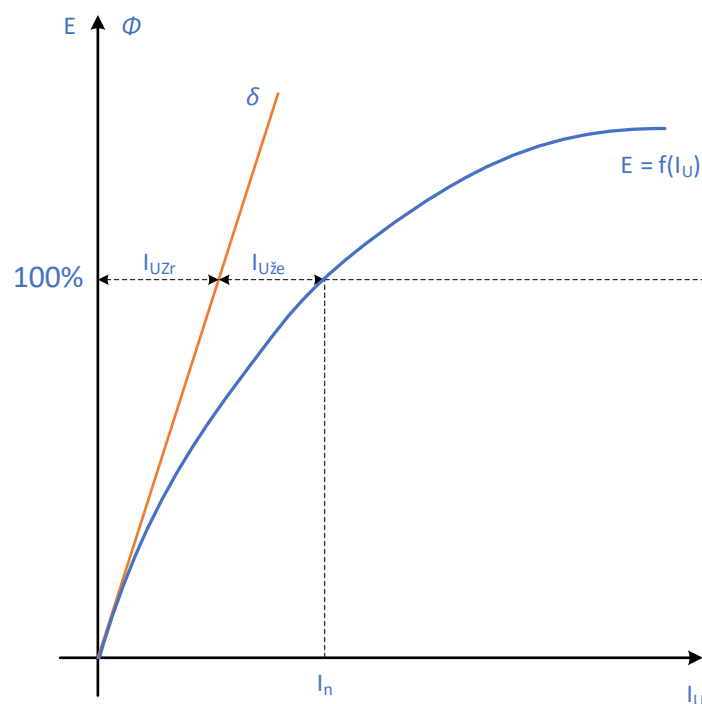
Jednadžba 3.4

Veličina induciranog napona razmjerna je s glavnim magnetskim tokom. Kako će se mijenjati glavni magnetski tok, tako će se mijenjati i inducirani napon. Veličina glavnog magnetskog toka ovisi o:

- uzbudnoj struji I_U
- broju zavoja uzbudnog namota
- zračnom prostoru
- dimenzijama rotora i statora
- magnetskim svojstvima materijala.

Kod izgrađenog stroja promjenjiva je samo struja uzbuđene I_U . Sve ostale veličine su stalne, materija i njegove dimenzije su određene prilikom projektiranja samog stroja i broj zavoja uzbudnog namota je stalan. Promjena induciranog napona bit će ovisna o promjeni uzbuđene struje, koja ovisi o promjeni magnetskog toka Φ_{gl} .

Kod pokusa praznog hoda, struja raste od 0 mA na više i za razne iznose struja očitava se napon. Pri pokusu praznog hoda generator mora rotirati sinkronom brzinom. Mjerenjem pokusa praznog hoda u konačnici dobivamo krivulju kako se inducirani napon mijenja s promjenom uzbuđene struje, što je prikazano na slici 3.12. Tu krivulju nazivamo *karakteristika praznog hoda*.



Slika 3.12: Karakteristika praznog hoda [Izvor: Autorski rad]

Na slici 3.12 je prikazan pravac koji predstavlja karakteristiku praznog hoda ako se uzme da je željezo idealni vodič magnetskog toka i da se sva uzbudna struja troši na savladavanje otpora koji se stvara u zračnom rasporu. Kako željezo nije idealni vodič magnetskog toka, za savladavanje otpora u željezu potrebna je uzbudna struja pa je zato karakteristika praznog hoda dobila oblik krivulje koja je slična paraboli.

Krivulja pokazuje realno stanje u generatoru kod praznog hoda.

Također, na slici 3.12 naznačene su i vrijednosti struja I_{Uzr} i I_{Uze} koje predstavljaju vrijednosti struja za savladanje otpora zračnog prostora i otpora željeza, kod nazivnog napona. Karakteristika praznog hoda ujedno predstavlja u određenom mjerilu i krivulju promjene magnetskog toka s promjenom uzbudne struje. Kada se magnetski krug zasiti magnetskim tokom, magnetski tok, odnosno inducirani napon, samo malo poraste i pri vrlo velikom porastu uzbude struje.

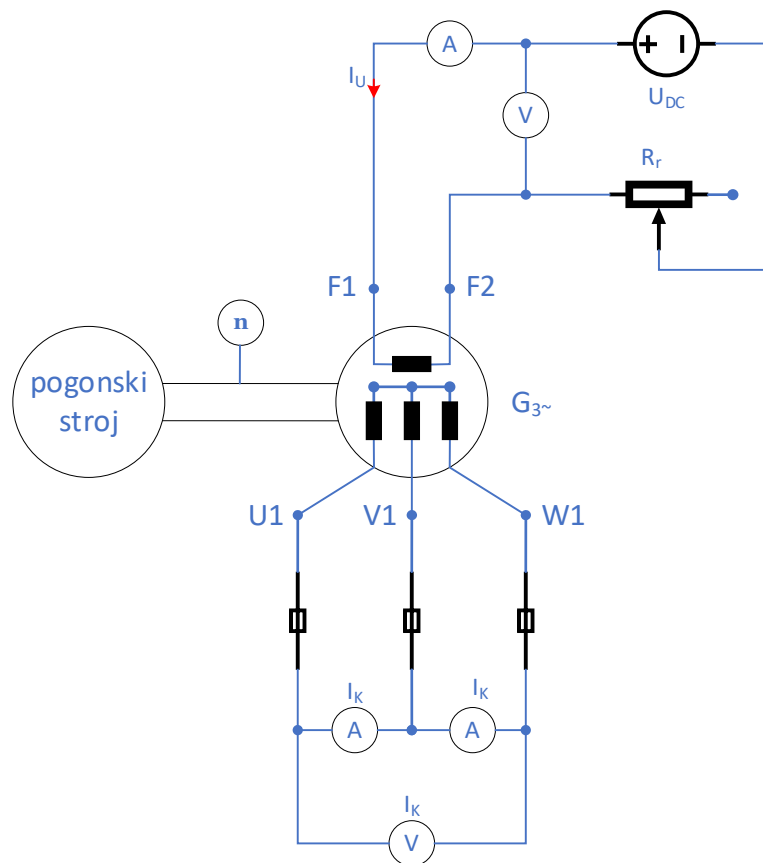
3.4.2. Kratki spoj sinkronog generatora

Kratki spoj sinkronog generatora nastaje kada se vodovi faznih namota $U1$, $V1$ i $W1$ spoje u blizini izlaznih stezaljki armaturnog namota ili na izlaznim stezaljkama trofaznih vodova $L1$, $L2$ i $L3$. Kratki spoj je vrlo opasan i može uzrokovati razaranje generatora. Zbog toga se generator štiti posebnim zaštitnim uređajima koji brzo neutraliziraju djelovanje struja kratkog spoja. Prvo je potrebno uzbudnu struju I_U smanjiti na nulu. (Krčum, M. 2009)

Shema spoja pri pokusu kratkog spoja trofaznog sinkronog generatora prikazana je na slici 3.13. Stezaljke armaturnog namota kratko se spoje preko ampermetra. Ampermetar se spaja i na uzbudni krug rotora. Stroj se zarotira na sinkronu brzinu n_s i tada se uzbuda struja počinje pomoću regulatora polako podizati. Struja pokusa kratkog spoja I_{2K} jednaka je nazivnoj struji I_{2N} generatora.

$$I_{2K} = I_{2N}$$

Jednadžba 3.5



Slika 3.13: Shema spoja pokusa kratkog spoja sinkronog generatora [Izvor: Autorski rad]

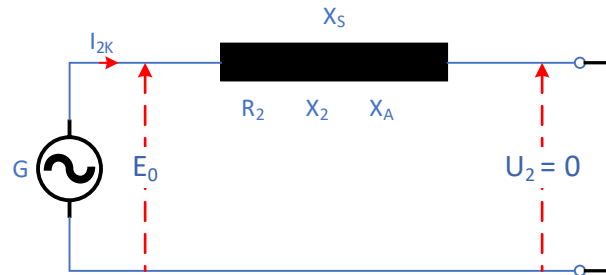
Stezaljke su kratko spojene pa je napon $U_2 = 0$. U armaturi teče nazivna struja, što zahtijeva induciranje određenog napona E_0 u armaturnom namotu. Taj napon se troši na unutarnjem otporu armature. Na nadomjesnoj shemi na slici 3.14 prikazani su otpori X_2 , X_A i R_2 , iz čega proizlazi da je:

$$\overline{E_0} = \overline{I_{2K}} * R_2 - j\overline{I_{2K}} * (X_2 - X_A)$$

Jednadžba 3.6

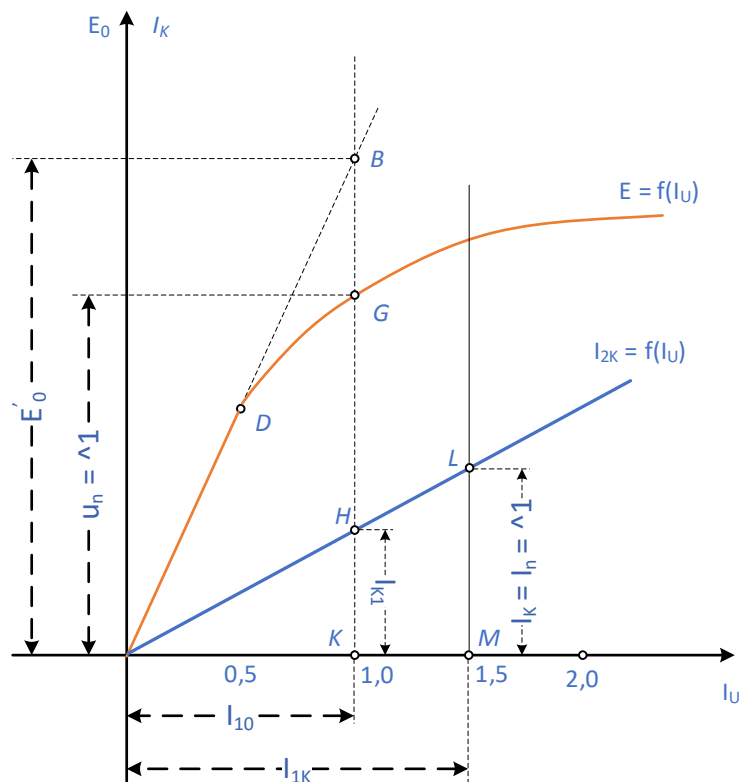
Uz $X_A + X_2 = X_S$ te zanemarimo $I_{2K} * R_2$, proizlazi da je:

$$E_A = -jI_{2K} * X_S \quad \text{odnosno} \quad E_0 + jI_{2K} * X_S = U_2 = 0$$



Slika 3.14: Nadomjesna shema kratkog spoja sinkronog generatora [Izvor: Autorski rad]

Karakteristika kratkog spoja sinkronog generatora predstavlja ovisnost struje kratkog spoja o uzbuđnoj struji $I_{2K} = f(I_U)$ pri $f = \text{konstanta}$ i $U_2 = 0$. U kratkom spoju nema magnetskog zasićenja jezgre generatora ili je zasićenje vrlo malo. Karakteristika kratkog spoja je pravac koji prolazi ishodište, kao što je prikazano na slici 3.15.



Slika 3.15: Karakteristika praznog hoda i kratkog spoja [Izvor: Autorski rad]

Na slici 3.15 je prikazana karakteristika praznog hoda ($E = f(I_U)$) i karakteristika kratkog spoja ($I_{2K} = f(I_U)$). Generator u kratkom spoju, pa i kod pokusa kratkog spoja, radi u gotovo linearnom području karakteristike praznog hoda.

Karakteristika kratkog spoja je pravac, što znači da je kod kratkog spoja generatora struja kratkog spoja proporcionalna struji uzbuđne I_U . Kada dođe do kratkog spoja kao kvara u pogonu gdje su struje kratkog spoja vrlo velike, važno je smanjiti uzbuđnu struju na nulu.

Karakteristika kratkog spoja trofaznog slučaja zajedno s karakteristikom praznog hoda, omogućava dobivanje niza podataka koji su važni za rad sinkronog generatora, a to su:

- Struja kratkog spoja $I_{2K} = I_{2N}$ omogućava utvrđivanje gubitaka u generatoru kod opterećenja nazivnom strujom uz $U_2 = 0$, te otporom R_2 armaturnog namota kod struje I_{2N} .
- Karakteristike kratkog spoja i praznoga hoda armature prikazane u odgovarajućem mjerilu, omogućavaju da se grafičkom metodom odrede veličine rasipne reaktancije X_2 , reaktancije armature X_A i padova napona na otporima pri nazivnoj struji I_{2N} i faktoru snage $\cos_{\phi_2} = 0$. Također, omogućuju određivanje veličine uzbudne struje I_U za struju I_{2N} pri nazivnom opterećenju generatora ili bilo kojeg drugog realnog generatora. Ove karakteristike omogućuju da se grafičkom metodom odrede sinkrone reaktancije.

3.4.3. Opterećenje sinkronog generatora

Kada se na stezaljke generatora koji radi u praznom hodu priključi neki teret, električno trošilo, struja I_2 će protjecati kroz armaturni namot prema trošilu, što znači da generator radi pod opterećenjem. (Krčum, M. 2009)

Zbog toga što kroz armaturni namot protječe struja I_2 , u sinkronom generatoru nastaje promjena u odnosu na stanje koje je vladalo u praznom hodu.

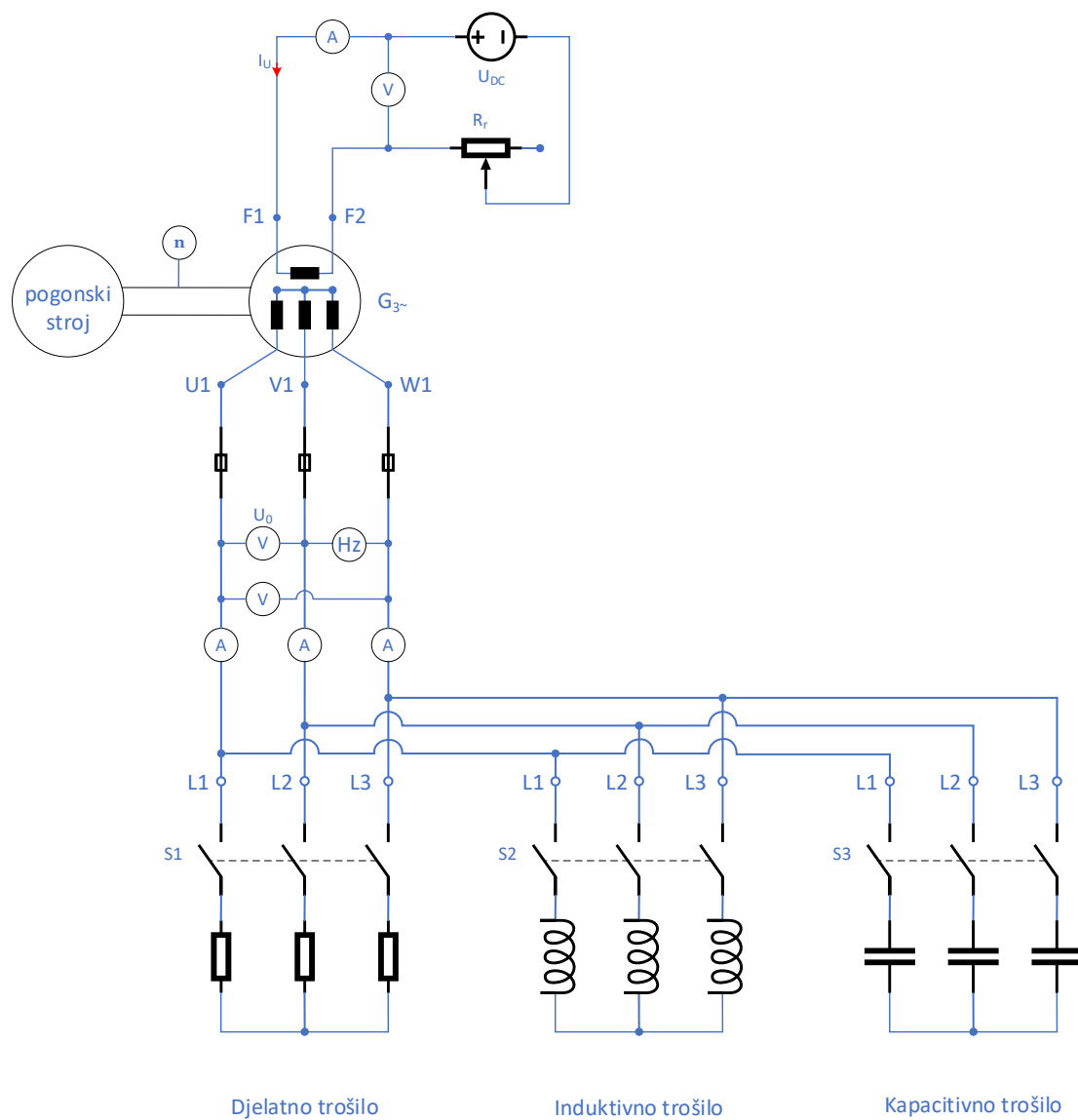
Napon na stezaljkama generatora u praznom hodu ima nazivnu vrijednost. Kada se generator optereti, napon na stezaljkama se mijenja i to uglavnom iz dva razloga:

- zbog pada napona u armaturnom namotu
- zbog reakcije armature.

U radu stroja značajne su pojave i pogonska stanja: okretni moment i kut opterećenja, okretno polje armature, reakcija armature, sinkrona reaktancija, regulacija napona te podešavanje frekvencije f induciranog napona E .

Postoje tri vrste opterećenja ovisno o vrsti tereta sinkronog generatora, što je prikazano i na slici 3.16, a to su:

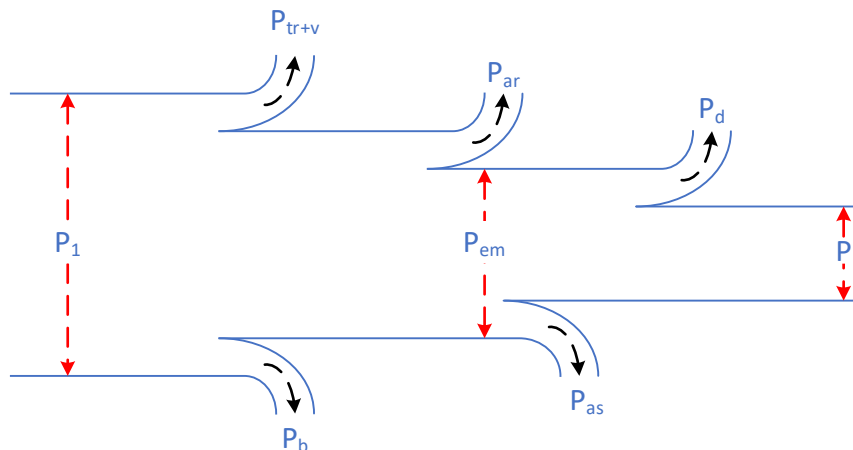
- čisto omsko opterećenje
- kombinacija omskog i induktivnog opterećenja
- kombinacija omskog i kapacitivnog opterećenja.



Slika 3.16: Opterećenje sinkronog generatora [Izvor: Autorski rad]

3.5. Iskoristivost

Energetski dijagram pretvorbe mehaničke energije u električnu može se vidjeti na slici 3.17. Energetski dijagram sinkronog generatora prikazuje proces pretvorbe električne kod kojeg dolazi do gubitaka u rotorskom i statorskom dijelu sinkronog stroja.



Slika 3.17: Energetski dijagram sinkronog generatora [Izvor: Autorski rad]

P_1 je snaga koja se iz pogonskog stroja prenosi na rotor generatora. Na osovini rotora gubi se dio snage P_1 zbog trenja u ležajevima i otpora zraka. Ti gubici označeni su sa P_{tr+v} . Ako je uzbuđni stroj na istoj osovini, onda se za rotaciju tog stroja troši neka snaga P_b . U uzbuđnom namotu također se javljaju gubici, a isto tako i u dijelu rotora koji provodi magnetski tok. Svi ti gubici u aktivnom dijelu rotora označit će se sa P_{ar} . Preostala snaga P_{em} prenosi se elektromagnetski preko zračnog raspora s rotora na stator. No, i u statoru se javljaju gubici, i to u željezu zbog vrtložnih struja i pojave histereze te u armaturnom namotu zbog prolaženja struje. Gubici u aktivnom dijelu statora i rotora označeni su s P_{as} . Osim ovih navedenih gubitaka postoje još i dodatni gubici koji nisu obuhvaćeni ni u jednoj spomenutoj skupini gubitaka, a označavaju se s P_d . Oni iznose približno 0,5 % od privedene snage statora. Preostalu snagu P stator predaje u mrežu.

Prema tome ukupni gubici iznose:

$$E_A = -jI_{2K} * X_S \quad \text{odnosno} \quad E_0 + jI_{2K} * X_S = U_2 = 0$$

Jednadžba 3.7

Korisnost η dobit ćemo ako se aktivna predana snaga P podijeli s aktivnom primljenom snagom P_1 .

$$\eta = \frac{P}{P_1} = \frac{P}{P + P_g} = \frac{P_1 - P_g}{P_1} = 1 - \frac{P_g}{P_1}$$

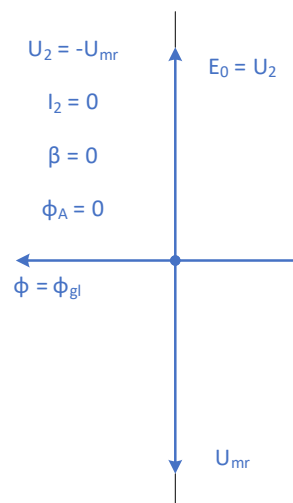
Jednadžba 3.8

Korisnost je uvijek manja od 1, a kreće se uglavnom iznad 0,95. Izražena je u postotcima i iznosi 95 %, što znači da se od ukupne primljene snage 5 % troši na gubitke, 95 % odlazi u mrežu. Kod velikih generatora korisnost η je još povoljnija.

3.6. Sinkroni motor

Rad sinkronog motora isti je kao i kod generatora po pitanju elektromagnetske pretvorbe, ali s obrnutim smjerom toka energije. Motor se, naime, priključuje na električnu mrežu odgovarajućeg napona i on uzima električnu energiju iz mreže i pretvara je u mehaničku.

Sinkroni motor se okreće brzinom koja je usklađena s brzinom električne mreže na koju je spojen. Pretpostavljamo da je sinkroni motor već usklađen i spojen na mrežu. Kada na osovini motora nema nikakvog opterećenja, motor radi bez opterećenja. U statorskom namotaju se inducira napon koji je u ravnoteži s naponom mreže. Fazorsko – vektorski dijagram motora je prikazan na slici 3.18.

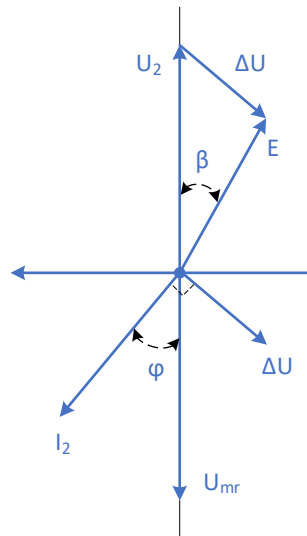


Slika 3.18: Fazorsko – vektorski dijagram motora [Izvor: Autorski rad]

Pretpostavimo da je na motor sinkronog stroja priključen neki radni stroj koji će polako opterećivati osovini motora mehaničkom snagom. To mehaničko opterećenje na radnom stroju prenosi se preko osovine na rotor sinkronog stroja i djeluje na njega protumomentom koji mu nastoji smanjiti brzinu. Međutim, sinkronizacijska sila ne dopušta smanjivanje

brzine, ali će se rotor ipak zaokrenuti za neki kut unatrag, tj. vrtjet će se suprotno od smjera vrtnje i dalje rotirati sinkronom brzinom.

Zbog toga što je rotor zaostao za kut β , inducirani napon u statorskom namotu ne drži više ravnotežu napona mreže, kako je prikazano u praznom hodu.



Slika 3.19: Fazorski dijagram opterećenog motora [Izvor: Autorski rad]

Kako je prikazano na slici 3.19 na fazorskom dijagramu opterećenog motora, zbog pomaka rotora za kut β pomaknuo se i napon E za taj kut u odnosu na napon mreže U_2 . Zbog toga ravnotežu napona mreže U_2 drži inducirani napon mreže E i pad napona ΔU . Pad napona nastaje na otporu kroz kojeg proteče struja I_2 . Napon ΔU je upravo onaj napon, zbog kojeg struja protječe iz mreže u statorski namot. Energija je, dakle, protekla iz mreže u sinkroni stroj pa kažemo da sinkroni stroj radi kao motor. Primljena električna energija iz statora se elektromagnetski prenosi na rotor u obliku mehaničke energije.

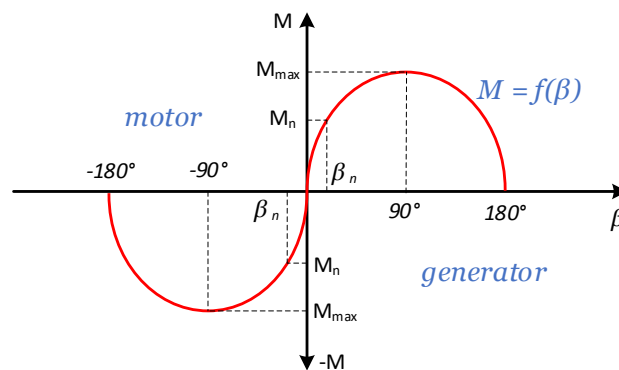
Da bi svladao protumoment kojim ga je opteretio radni stroj, rotor iz mreže uzima energiju potrebnu za savladavanje momenta tereta.

$$M = M_{ter}$$

Jednadžba 3.9

Kada se rotor sinkronog motora opteretiti do te mjere da kut opterećenja β prijeđe 90° , električni motor više nije u stanju savladati taj protumoment i zaustavit će se. Kut β je kut opterećenja, a elektromagnetski moment je proporcionalan sinus kuta β . Kada je $\beta = 90^\circ$, $\sin \beta = 1$.

Realni sinkroni strojevi rade u linearnom dijelu momentne karakteristike $M = f(\beta)$ do 30° el., jer daljnje povećanje kuta opterećenja dovodi stroj u nestabilno područje rada, što je prikazano na slici 3.20.

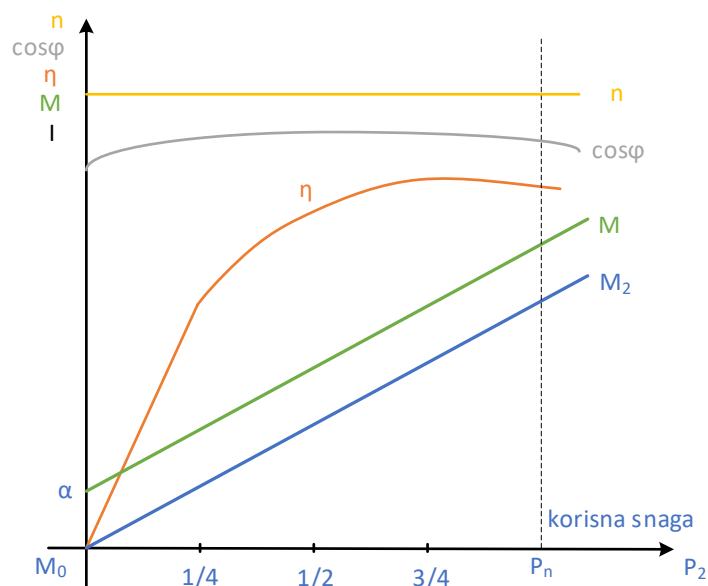


Slika 3.20: Ovisnost elektromagnetskog momenta (M) o kutu opterećenja [Izvor: Autorski rad]

Radne karakteristike sinkronog motora ukazuju na dobra svojstva motora i prikazane su na slici 3.21.

Ukupni okretni moment $M = M_0 - M_2$, gdje je:

- M_0 - okretni moment praznog hoda
- M_2 - moment tereta $M_2 = f(P_2)$
- n - brzina vrtnje, n - konstantan
- $\cos\Phi$ - faktor snage
- η - korisnost motora.



Slika 3.21: Radne karakteristike sinkronog motora [Izvor: Autorski rad]

Iz radnih karakteristika može se očitati da sinkroni motor ima linearni porast okretnog momenta (M), dobru iskoristivost kod punih opterećenja, stabilan faktor snage i konstantnu brzinu vrtnje kod promjene opterećenja.

3.6.1. Pokretanje sinkronog motora

Priključi li se mirujući sinkroni stroj na mrežu tako da radi kao motor, on se neće pokrenuti jer su polovi uzbuđeni i ne mogu se samopokrenuti. On se ne može pokrenuti, zato što sila koja određuje smjer okretaja mijenja smjer svog djelovanja 100 puta u sekundi.

U statorskom namotu teče izmjenična struja koja ima 50 pozitivnih poluvalova i 50 negativnih poluvalova u sekundi, frekvencije 50 Hz. Svaki polual struje proizvodi silu u svom smjeru. Zbog toga rotor samo podrhtava i stoji na mjestu.

Da bi se motor priključio u paralelni rad sa stabilnom mrežom, potrebno je njegov rotor zarotirati na približno sinkronu brzinu, a uzbuđu podići do razine kao u praznom hodu.

Motor se može uključiti na stabilnu mrežu, jer ga sinkronizacijska sila povuče u sinkronizam. Naravno da moraju biti zadovoljeni i ostali uvjeti za paralelni rad.

Pogonski stroj za dovođenje rotora sinkronog motora u sinkronu brzinu može biti s unutarnjim izgaranjem, istosmjerni motor, asinkroni motor. Pritom se sinkroni motor na mrežu može priključiti na jedan od sljedećih načina:

- Sinkronizacija – priključivanje sinkronog motora na mrežu uz prethodnu sinkronizaciju složen je i dugotrajan posao, pa se u praksi izbjegava.
- Asinkrono pokretanje i priključivanje motora – svaki motor ima ugrađen kavezni namot s većim ili manjim otporom, ovisno o tome kakav moment motor treba razviti. Proces pokretanja pomoću asinkronog motora je ovakav: sinkroni motor priključi se na mrežu, u statorski namot proteče struja i uzbuđu izmjenični statorski tok koji u vodičima kaveznog motora inducira napon. Tako kroz štapove kaveznog namota proteče struja koja pokrene rotor i dovode ga u sinkronizam. No, pokretanje sinkronog motora kaveznim namotom ima i nezgodnih stanja. Statorski magnetski tok može u uzbudnom namotu inducirati napon od 2000 V i više, što je vrlo opasno jer može doći do proboja izolacije. Zato uzbuđu kod asinkronog pokretanja treba smanjiti na malu vrijednost, a u uzbudni strujni krug uključiti neki radni otpor ili uzbuđu odvojiti, a uzbudni namot kratko spojiti. Da bi se u mreži izbjegli strujni udari koje pri pokretanju uzrokuje sinkroni motor, smanjuje se priključni napon statorskog namota i to transformatorima s podešavanjem, sklopkom zvijezda-trokut i pomoću podešavajućeg otpornika ili prigušnice.
- Sinkroni zalet – armaturni namot uzbuđenog stroja priključuje se na izvor promjenjivog napona i frekvencije pomoću drugog sinkronog generatora ili *statičkog pretvarača*. Omogućuje podešavanje napona i frekvencije do nazivne vrijednosti za velike struje i napon. Podižući napon i frekvenciju statorskom namotu od nule do nazivne vrijednosti, statorski magnetski tok okreće uzbuđeni rotor do sinkrone brzine, kada se priključuje na mrežu.

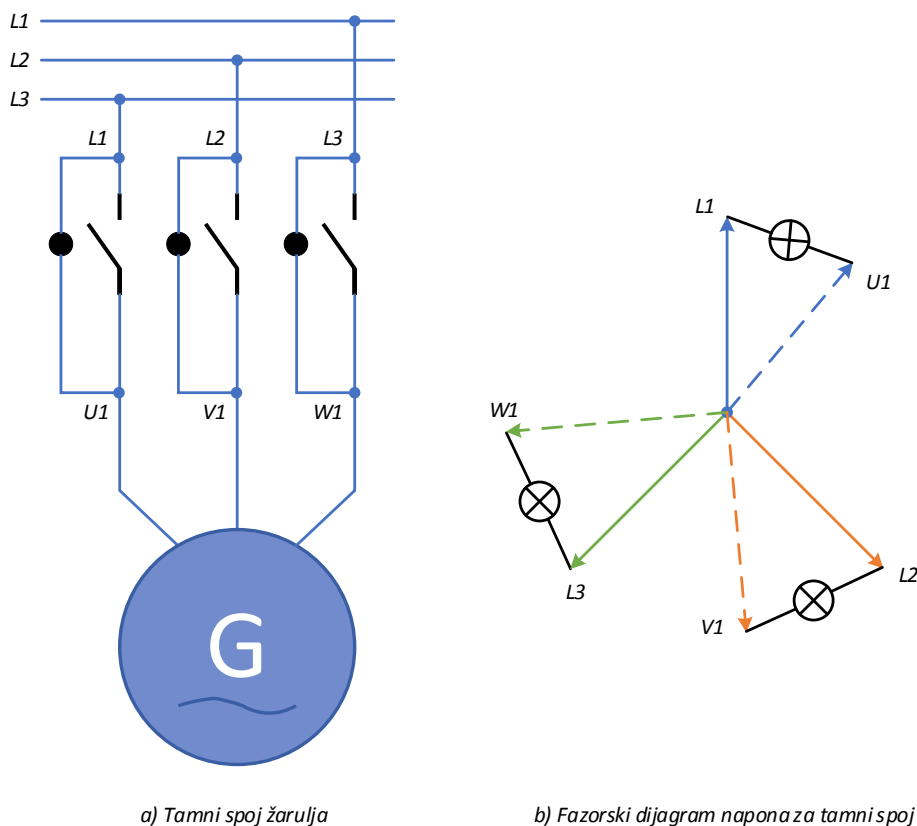
3.7. Postupak sinkronizacije sinkronog generatora

Kad se sinkroni generator priključuje u paralelni rad, potrebno je prvo zarotirati rotor na sinkronu brzinu te se polako povisuje uzbuda. Izmjenični napon koji će se pojaviti na statorima generatora, može se izmjeriti voltmetrom. Generator se ne smije priključiti na električnu mrežu sve dok se ne ispune i ostali uvjeti koji su potrebni za priključivanje generatora na električnu mrežu, bez obzira što voltmetar pokazuje napon generatora koji je jednak naponu mreže. Da bi se ispunili svi potrebni uvjeti sinkronizacije, postoje razni uređaji kojima se mogu odrediti. Najjednostavniji uređaji za sinkronizaciju su sinkronizacijske žarulje, koje se mogu spojiti na dva načina: u tamni spoj i u svijetli spoj.

Za sinkronizaciju se danas koristi uređaj sa sinkronoskopom, dvostrukim voltmetrom i dvostrukim frekvencijometrom. Za sinkrone generatore većih snaga za sinkronizaciju se koriste poluautomatski uređaji ili potpuno automatski uređaji u najsloženijim postrojenjima.

3.7.1. Tamni spoj

U tamnom spoju žarulje su priključene između električne mreže i sinkronog generatora, kako je prikazano na slici 3.22.

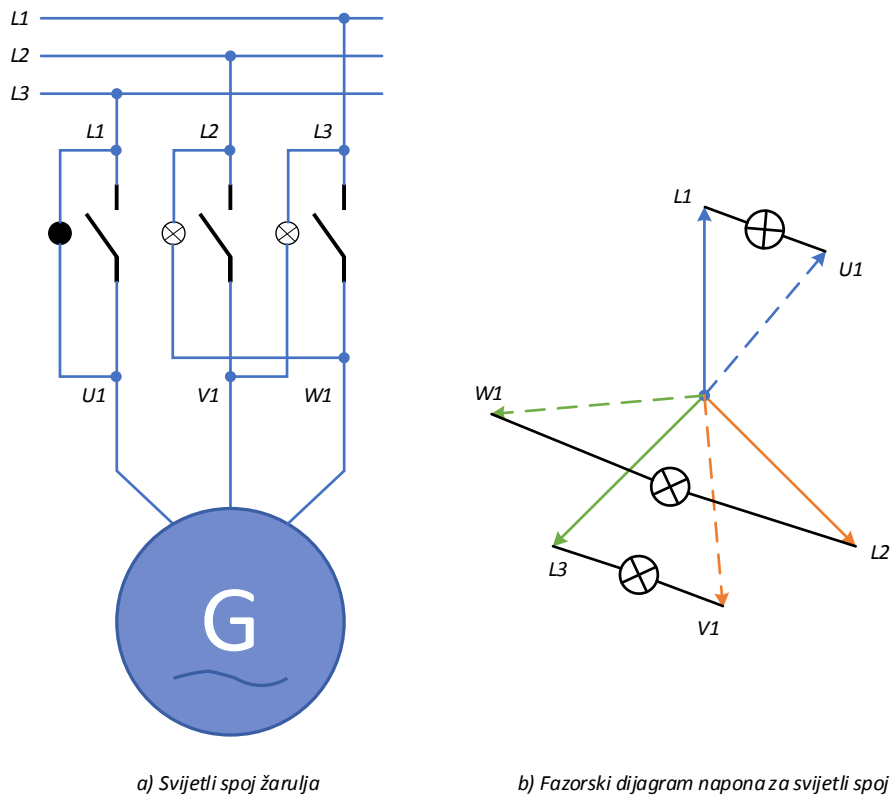


Slika 3.22: Sinkronizacija - tamni spoj [Izvor: Autorski rad]

Žarulje trebaju biti napravljene za dvostruki fazni napon, zbog toga što se kod sinkronizacije na njima može pojaviti cijeli napon mreže i cijeli napon generatora. Žarulje će svijetliti sve dok naponi ne budu približno isti. Jednakost napona generatora i električne mreže postiže se podešavanjem uzbudne struje generatora. Kada se postigne jednakost napona, žaruljice će se paliti i gasiti. To znači da frekvencija električne mreže i generatora nije ista. Jednakost frekvencije i napona postiže se prilagođivanjem brzine vrtnje sinkronog generatora. Kad se postignu svi uvjeti za sinkronizaciju, sve žarulje ostaju duže vremena isključene i tada se generator može uključiti sklopkom u paralelni rad. Ako se sve tri žarulje pale istovremeno, tada je redoslijed faza ispravan.

3.7.2. Svijetli spoj

U svijetlom spoju žarulje su priključene između sinkronog generatora i električne mreže, kako je prikazano na slici 3.23.



Slika 3.23: Sinkronizacija - svijetli spoj [Izvor: Autorski rad]

U tamnom spoju je spojena jedna žarulja, dok su preostale dvije spojene u svijetli spoj između dviju različitih faza generatora i mreže. Žarulje se dimenzioniraju za dvostruki napon. Kad nisu ispunjeni uvjeti za sinkronizaciju, žarulje se redom pale i gase. Kada svijetlo prestane rotirati, žarulja koja je spojena u tamni spoj ostaje tamna, dok ostale dvije izrazito svijetle. Sinkronizacija je u tom trenutku postignuta i generator se sklopkom uključuje u mrežu.

Pitanja za provjeru znanja

1. Kada sinkroni stroj radi kao generator, a kada kao motor?
2. Objasni zašto su sinkroni strojevi rotacijski električni strojevi i koja im je namjena.
3. Navedi glavne konstruktivne dijelove sinkronog stroja i objasni njihovu ulogu u radu stroja.
4. Objasni zadatak uzbudnog namota, mjesto ugradnje i način napajanja.
5. U kojem je dijelu sinkronog stroja ugrađen armaturni namot?
6. Navedi glavne karakteristike rotora sa i bez istaknutih polova.
7. Objasni stanje praznog hoda pomoću karakteristike praznog hoda sinkronog generatora.



4

POGLAVLJE

ASINKRONI STROJEVI

Nakon ovog poglavlja moći ćete:

- upoznati princip rada i konstrukcijske dijelove asinkronih strojeva
- objasniti prazni hod, kratki spoj i opterećenje asinkronih strojeva
- mjerenjem prikazati karakteristične vrijednosti u praznom hodu, kratkom spoju i opterećenju.

4.1. Uvod u asinkrone strojeve

Asinkroni stroj je vrsta rotirajućeg električnog stroja koji radi na izmjeničnu struju. Glavni predstavnik asinkronih strojeva je asinkroni motor, koji pretvara električnu energiju u mehaničku. Električna energija ulazi u stator, gdje se putem elektromagnetskog polja prenosi na rotor i pretvara u mehaničku energiju. Rotacijom rotor može obaviti određenu fizičku radnju. Zbog svoje sposobnosti da obavlja mehanički rad, asinkroni motor se koristi u raznim radnim strojevima kao što su alatni strojevi, poljoprivredni strojevi, crpke, ventilatori, strojevi za obradu drva, mlinski strojevi, itd. Danas se asinkroni motori široko koriste u industriji, kućanstvu, poljoprivredi i u drugim područjima gdje postoji izmjenična struja. Zbog svojih mnogobrojnih prednosti, asinkroni motor je postao najpopularniji električni stroj u širokoj primjeni. (Jureković, J. 2003)

Asinkroni stroj karakterizira promjena brzine rotora n unutar uskog raspona kada se mijenja opterećenje pri određenoj frekvenciji mreže na koju je priključen.

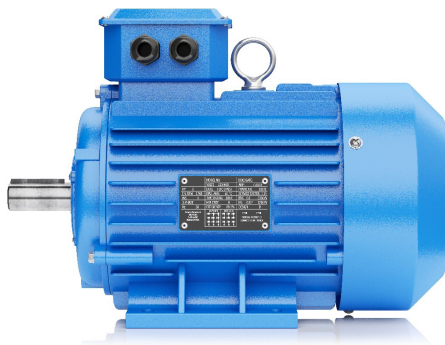
Brzina rotora nije jednaka brzini okretnog magnetskog polja statora, nisu vremenski usklađeni sa sinkronom brzinom toka statora pa su zato i dobili ime *asinkroni neistovremeni motori*, za razliku od sinkronih strojeva kod kojih su obje brzine bile iste, odnosno *istovremene*.

Osnovni konstruktivni dijelovi asinkronih strojeva su stator i rotor. Statorski namot priključuje se preko priključne kutije na mrežu izmjenične struje. Rotor slobodno rotira i galvaniski nije vezan na izvor izmjenične struje. Radni stroj koji se pokreće asinkronim motorom, priključen je na rotorsku osovinu izravno ili pomoću zupčanog ili remenskog prijenosa.

Asinkroni strojevi tipični su predstavnici strojeva izmjenične struje male snage, a s obzirom na široku primjenu proizvode se serijski.

Pretežito se upotrebljavaju kao motori, a rjeđe kao generatori ili električne kočnice, pa će se u daljnjem proučavanju tih strojeva govoriti uglavnom o asinkronom motoru.

Asinkroni motor otkrio je 1883. Nikola Tesla. On je prvi došao do zaključka da se u višefaznom motoru izmjenične struje stvara rotirajuće magnetsko polje, na čemu se zasniva rad asinkronog motora. Nakon tog pronalaska, asinkroni motor naglo se razvio i potisnuo iz šire primjene do tada vodeći istosmjerni motor. Na slici 4.1. prikazan je jedan asinkroni motor.



Slika 4.1: Asinkroni motor [Izvor: <https://www.shutterstock.com/image-illustration/blue-electric-engine-isolated-on-white-459215131>]

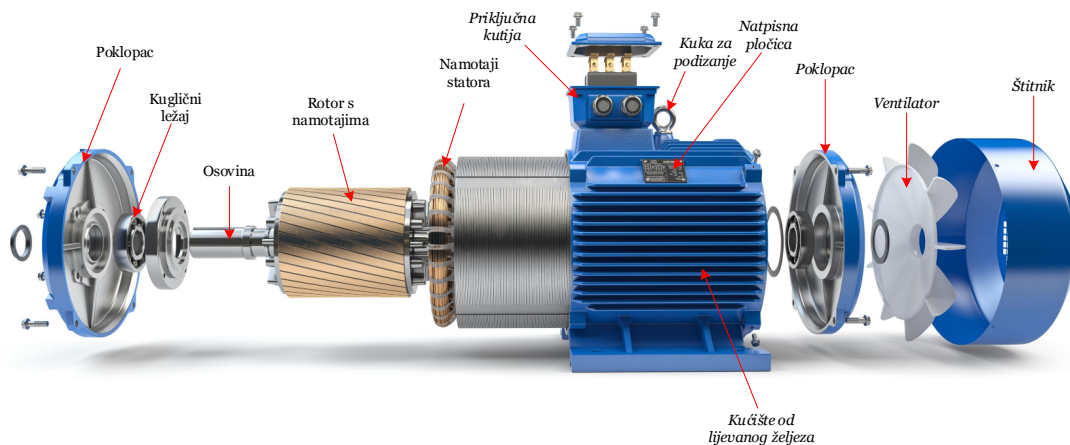
4.2. Konstruktivni dijelovi trofaznog asinkronog motora

Trofazni asinkroni motor se, kao i svi električni rotacijski strojevi, sastoji od dva osnovna dijela: statora i rotora.

Ostali konstruktivni dijelovi takva motora su:

- ležajni štit
- klizni koluti
- držači četkica s četkicama, kod kliznokolutnih asinkronih motora
- ležajevi
- priključna kutija za šest vijaka, sastavni dio kućišta statora asinkronog motora.

Na slici 4.2 je prikazan rastavljeni asinkroni motor sa svim konstruktivnim dijelovima.

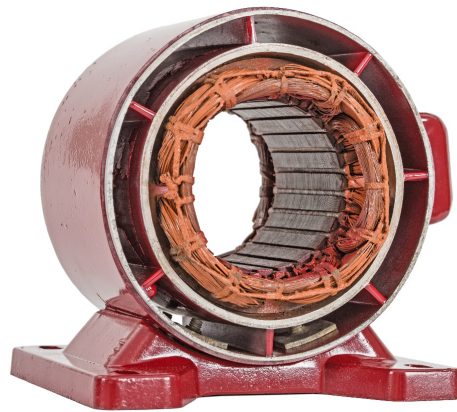


Slika 4.2: Konstruktivni dijelovi asinkronog motora [Izvor: https://www.freepik.com/premium-photo/electric-motor-parts-structure-isolated-white-background_33994277.htm#query=induction%20motors&position=10&from_view=search&track=ais, autorski rad]

4.2.1. Stator asinkronog motora

Po konstruktivnoj izvedbi stator asinkronog motora potpuno je jednak statoru sinkronog stroja. Sastoji se od kućišta, statorskog paketa sastavljenog od dinamo limova, koji na unutrašnjoj strani ima utore za smještaj statorskog namota.

Za statorski namot asinkronog motora vrijedi sve što samo prije govorili o namotu statora sinkronog stroja. Namot se izvodi kao jednofazni i kao trofazni. Trofazni asinkroni motor se izvodi simetrično u faznom razmaku 120° , i može se spajati u spoj zvijezda ili trokut. Statorski asinkroni motor možemo vidjeti na slici 4.3.



Slika 4.3: Stator asinkronog motora [Izvor: <https://www.shutterstock.com/image-photo/stator-electric-motor-isolated-on-white-1147922336>]

4.2.2. Rotor asinkronog motora

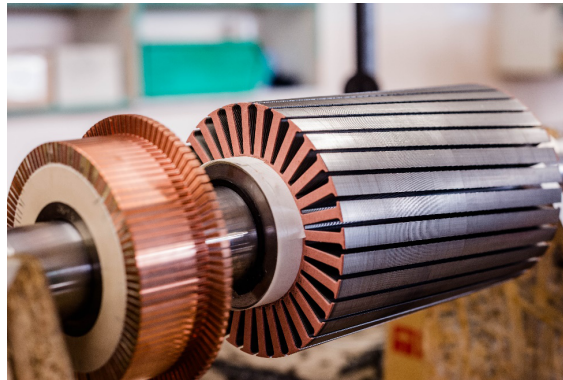
4.2.2.1. Rotorski paket

Rotor se sastoji od osovine i rotorskog paketa. Rotorski paket izgrađen je od dinamo limova iste kakvoće i obrade kao i stator, a ima oblik valjka.

U uzdužnom smjeru po obodu rotora izvedeni su utori za smještaj rotorskog namota. Utori se izrađuju već kod rezanja lima za rotorski paket. Lim za rotorski paket dobije se kao preostali dio kod rezanja statorskog paketa. Prilikom rezanja rotorskog lima naprave se otvori za osovinu i za učvršćenje paketa na osovinu, a kod većih motora i ventilacijski otvori. (Krčum, M. 2009)

Kod motora većih snaga izrađuje se paket rotora od prstenastih segmenata. Lim se isiječe u obliku prstenastog segmenta, a pri slaganju paketa limovi se preklapaju kako bi se postigla veća čvrstoća i kompaktnost paketa te bolja magnetska provodljivost. Zadaća rotorskog paketa je da u utorima nosi rotorski namot, da provodi magnetski tok te silu kojom namot djeluje da je prenese na rotor motora. On mora izdržati sve centrifugalne sile prilikom rotacije. Najviše su opterećeni zubovi rotora, jer prilikom rotacije namot želi izaći iz utora, a kako je učvršćen u utoru, cjelokupna centrifugalna sila namota prenosi se na tijelo zuba. Zubovi su najviše napregnuti dio rotora, pa u pogonu redovito dolazi do prvog oštećenja na zubovima rotora.

Rotorski paket limova mora biti dobro spregnut zbog svih funkcija koje ima, tako da postane kompaktna cjelina. To se postiže na razne načine: stezanjem pomoću izoliranih vijaka kao i kod transformatora ili posebnim konstruktivnim dodatcima od ne magnetskog materijala kojima se paket limova čvrsto stegne.



Slika 4.4: Rotorski paket limova [Izvor: <https://www.shutterstock.com/image-photo/eletric-motor-rotor-497171659>]

4.2.2.2. Podjela asinkronih motora

S obzirom na izvedbu rotorskog namota, asinkroni motori mogu biti:

- Kliznokolutni - kod kliznokolutnih asinkroni motori namot rotora je izrađen jednako kao i statorski, tj. od svitaka koji se ulažu u utore i spajaju u trofazni namot kod trofaznog motora. Krajevi namota dovode se na tri klizna koluta koji su učvršćeni na osovinu rotora, po čemu su u dobili ime.
- Kavezni ili krletkasti - kod kaveznih ili krletkastih asinkronih motora rotorski namot izrađen je od štapnih vodiča koji su na obje strane kratko spojeni. Ovaj namot ima oblik kaveza, pa je po tome i dobio ime.

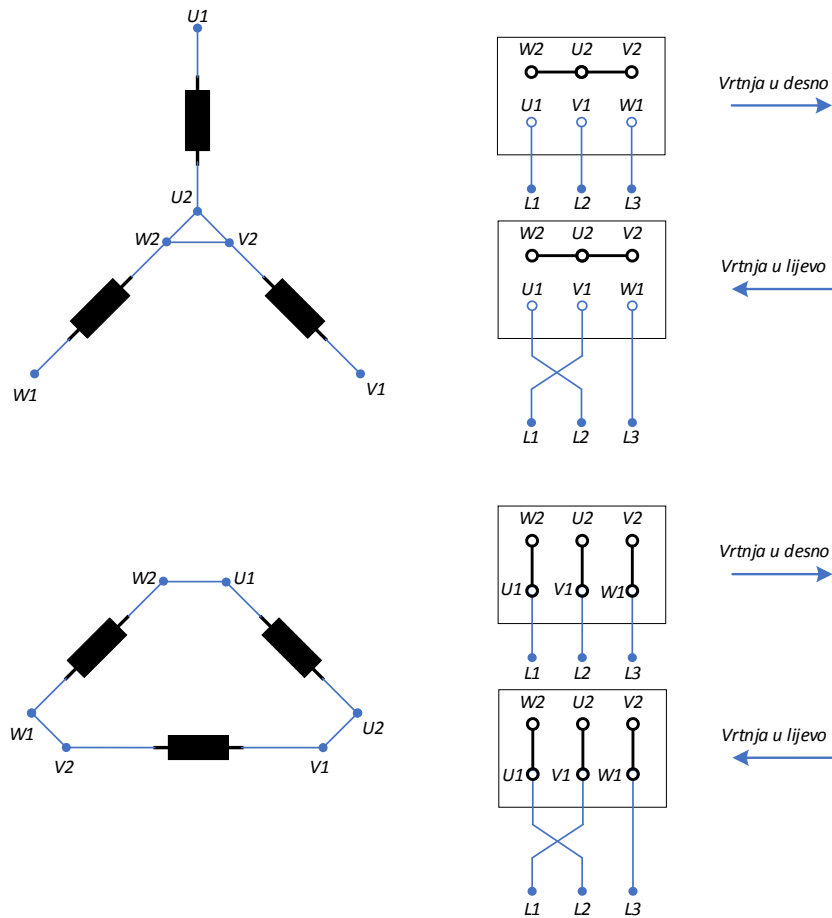
4.2.3. Spajanje namota

4.2.3.1. Spajanje statorskog namota

Na kućištu statora se nalazi priključna kutija sa šest stezaljki na koje se priključuju početci i krajevi faznih namota.

Trofazni namot se može spojiti u zvjezdasti ili trokutni spoj. Kod manjih motora spajanje se obično vrši na priključnoj kutiji. Stezaljke na koje su spojeni početci namota označavaju se velikim slovima $U1$, $V1$ i $W1$, dok se stezaljke na koje su spojeni krajevi faznih namota označavaju velikim slovima $U2$, $V2$ i $W2$.

Na stezaljke s početcima namota $U1$, $V1$ i $W1$ priključuje se i vod za dovod električne energije. Na slici 4.5 su prikazani spojevi namota u zvjezdasti i trokutasti spoj, kao i spoj stezaljki u priključnoj kutiji trofaznog asinkronog motora.



Slika 4.5: Statorski namot u spoju zvijezda i trokut i spoj stezaljki u priključnoj kutiji [Izvor: Autorski rad]

Kod oba spoja treba uočiti da je na priključnoj kutiji redoslijed završnih stezaljki $W2$, $U2$ i $V2$. to je neophodno jer se jedino pomoću bakrenih spojnice na priključnoj kutiji može izvesti spoj u trokut.

4.2.3.2. Spajanje rotorskog namota

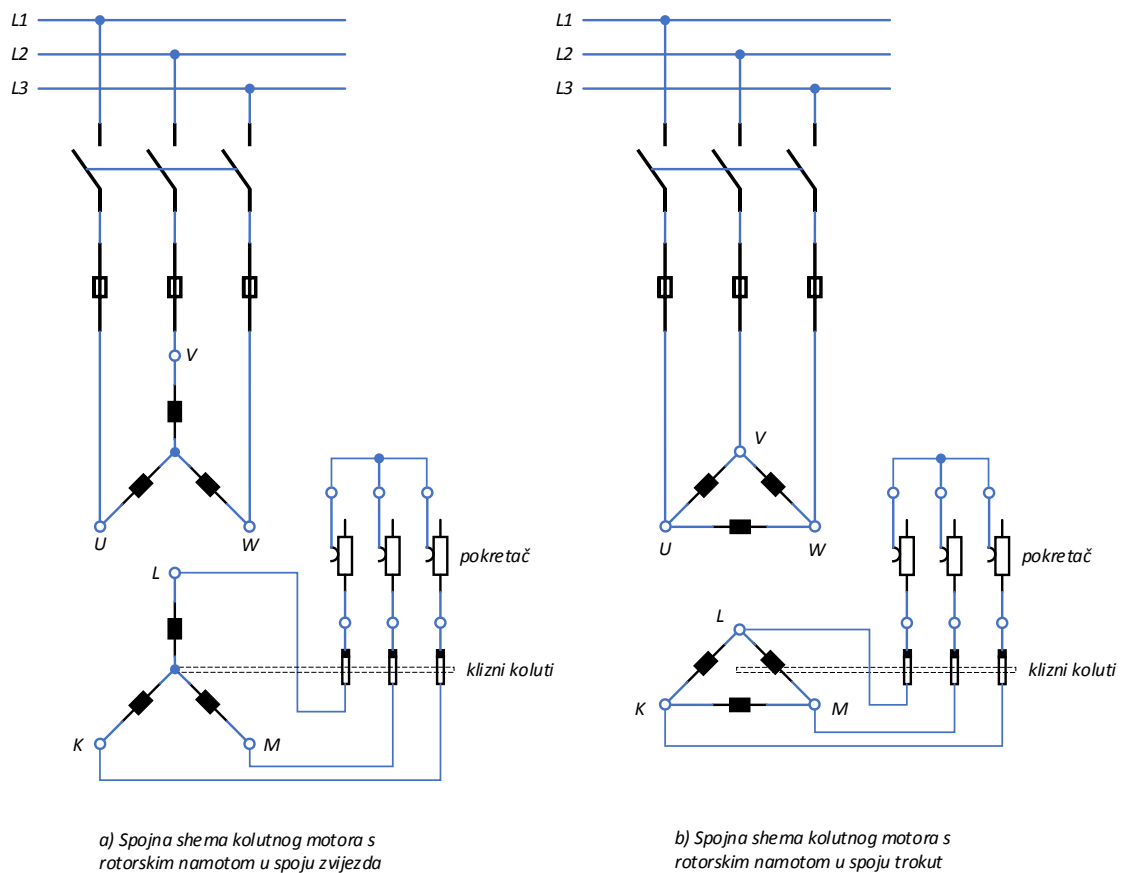
Kad se govori o spajanju rotorskog namota, misli se na spajanje rotorskog namota kolutnih motora, jer je namot kaveznog rotora već ukратно spojen.

Prema tome, namot kolutnih motora je fazni namot, jednako kao i namot statora pa se tako i spaja. Kod trofaznih kolutnih motora namot rotora se može spojiti u zvijezdu i u trokut spoj.

Kod spoja namota u zvijezdu, početci faznih namota označeni s $K1$, $L1$ i $M1$, dovode se na klične kolute, a završetci $K2$, $L2$ i $M2$ spajaju se kratko u zvjezdište, kako je prikazano na slici 4.6 a). Na slici je prikazana shema spoja namota kolutnih motora, spojenih na stator i rotor u spoj zvijezda. Zvjezdište rotorskog namota izvodi se na samom rotoru prilikom izrade namota. Završetci svih triju faza na rotoru spajaju se kratko lemljenjem, a potom se spoj dobro izolira i učvrsti na rotor.

Kod spoja rotorskog namota u trokut, kako je i poznato, završetak namota jedne faze spaja se s početkom namota druge faze i tako se dobiju tri spojna mjesta faznih namota. Spojna mjesta ($K1 - M2$, $L1 - K2$, $M1 - L2$) spajaju se s tri klizna prstena učvršćena na osovini, kako je prikazano na slici 4.6 b).

Na slici 4.6 a) i b) su shematski prikazani i omski otpornici priključeni preko četkica i kliznih koluta na faze rotorskog namota. Ti otpornici sastavni su dio rotorskog strujnog kruga. Oni su stupnjevi, u rotorski strujni krug može se uključivati više ili manje otpora, a služe kod pokretanja kliznokolutnih asinkronih motora kao pokretači.



Slika 4.6: Spojna shema kolutnih motora [Izvor: Autorski rad]

4.2.4. Klizni koluti

Klizni koluti učvršćuju se na osovini rotora. Svaka faza rotorskog namota ima svoj kolut s kojim je spojen početak faze. Kod trofaznog motora postoje tri klizna koluta. Po kolutima klize četkice, koje su spojene na otpornik preko kojeg se zatvara rotorski strujni krug.

Klizni koluti izrađuju se od mjedi, bronce ili bakra, a dobivaju se lijevanjem. Koluti od čelika, kod istosmjernih strojeva, izrezuju se iz valjane ploče. Klizni koluti su izolirani od osovine i međusobno.

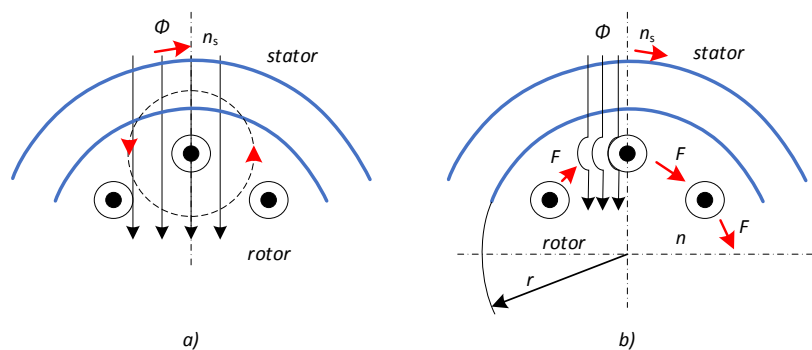
Kod slobodne konstrukcije kliznih koluta, oni se učvršćuju na specijalno valjkasto tijelo, koje se zajedno s kolutima navuče na osovinu. Od mase tijela koluti se izoliraju lisnato u više slojeva. Takve konstrukcije imaju i brončani prsten za kratko spajanje rotorskog namota. Kada rotor poprimi nazivnu brzinu, otpori za pokretanje nisu potrebni pa se isključuju, a da bi rotorski strujni krug bio zatvoren, potrebno je kratko spojiti četkice. No, to nije dobro jer se tako troše klizni koluti i četkice. Da bi se to izbjeglo, potrebno je četkice podignuti s kliznih koluta, a dovodi s rotorskog namota se kratko spoje.

4.3. Načelo rada asinkronih strojeva

U nastavku će se razmotriti fizikalna slika rada asinkronog stroja, koji može raditi kao motor, generator i kočnica. Glavni i najvažniji asinkroni stroj je asinkroni motor.

Asinkroni motori uzimaju sa statorskog namota preko priključne kutije iz mreže električnu energiju i pretvaraju je u mehaničku.

Iz mreže će u trofazni statorski namot poteći izmjenična struja, koja u statoru stvori okretno magnetsko polje sinkrone brzine. To polje izlazi iz statora okomito na rotor, ima radijalni smjer, što je prikazano na slici 4.7 te ulančuje vodiče rotorskog namota, presijeca ih preko zračnog raspora i zatvara se u statoru. Postoji stalno magnetsko polje koje rotira sinkronom brzinom n_s i presijeca vodiče mirujućeg namota rotora. U rotorskim vodičima će se inducirati napon, elektromotorna sila E_{22} . Okretno magnetsko polje inducira u primarnom statorskom namotu napon E_1 , koji drži ravnotežu priključenom naponu U_1 .



Slika 4.7: Djelovanje magnetskog polja statora na vodič rotora [Izvor: Autorski rad]

Kako je već otprije poznato, ako između dvije točke u strujnom krugu postoji razlika potencijala, ispunjeni su svi uvjeti da u tom strujnom krugu proteče struja. Da bi u rotoru asinkronog motora protekla struja, potrebno je da je strujni krug rotorskog namota zatvoren.

Kod kavezskih motora to je uvijek ispunjeno, a kod kliznokolutnih je potrebno otpornik za pokretanje priključiti na rotorski namot, kako je prikazano na slici 4.6.

Inducirani napon u vodičima rotora potjerat će struju I_2 kroz vodiče. Veličina struje I_2 ovisit će o induciranom naponu na namotu rotora E_2 i o otporu u rotorskom namotu Z , a izračunat će se relacijom:

$$I_2 = \frac{E_2}{\sqrt{R_2^2 + X_2^2}}$$

Jednadžba 4.1

Gdje je – ukupni otpor u rotorskom namotu (impedancija).

Pojavom struje u rotorskom namotu dolazi do prije razmatranog slučaja, tj. vodiča u magnetskom polju, gdje kroz vodič protječe struja. Ta struja po Biot - Savartovu zakonu s tokom okretnog polja Φ stvara silu u pojedinim vodičima na obodu rotora, a time i zakretni moment u smjeru okretaja polja.

$$M = K * I_2 * \Phi * \cos\varphi$$

Jednadžba 4.2

Kao rezultat toga rotor će se početi okretati ako nije zakočen. Kad se motor pokrene, brzina njegova vrtnje neprekidno se povećava i nastoji poprimiti brzinu magnetskog polja statora, odnosno sinkronu brzinu n_s . Rotor međutim nikad neće dostići sinkronu brzinu n_s , već neki niži broj okretaja n . Pri tome treba uzeti u obzir da rotor rotira slobodno, na njegovoj osovine nema nikakvog protumoment osim vlastitog trenja i ventilacije. Rotor dakle rotira u praznom hodu i njegov je broj okreta manji od sinkrone brzine n_s , sinkrone brzine vrtnje magnetskog polja statora, pa se zato naziva *asinkroni*. Brzina n i sinkrona brzina n_s nisu istovremeni.

Rotor u praznom hodu troši određenu snagu zbog protumoment od trenja u ležajevima i otpora zraka. Rotor mora razvijati neki moment vrtnje, a to će moći samo kada kroz vodiče rotorskog namota teče odgovarajuća struja. A da bi u rotorskom namotu uopće potekla neka struja, mora se u vodičima inducirati odgovarajući napon, a on se može inducirati samo ako vodiče presijecaju magnetske silnice. Rotor mora imati manji broj okreta od broja okreta okretnog magnetskog polja statora, jer samo tada može razviti snagu koja mu je potrebna za rotaciju.

Ako se rotor optereti nekim vanjskim protumomentom, smanjit će se broj okreta u odnosu na broj okreta u praznom hodu, jer se smanjenjem broja okreta u vodičima induciraju veći naponi i proteku jače struje koje su potrebne za razvijanje okretnog momenta. Motor je sebi pomogao tako da je smanjio brzinu vrtnje, kako bi povećao silu zakretanja.

Snaga rotora dobiva se iz statora, a stator uzima iz mreže napon. Asinkroni motor se pri promjeni opterećenja ponaša kao transformator. Njegov rotor je potpuno odvojen od sta-

tora, kao i sekundarna strana transformatora koji je odvojen od primarnog. Na stezaljka-
ma rotorskog namota kliznokolutnog motora, kada je primarni statorski namot priključen
na mrežu, može se izmjeriti inducirani napon praznog hoda E_2 . Taj napon je razmjeran pri-
marnom naponu E_1 te omjeru rotorskog i statorskog namota i njihovim faktorima namota.

$$E_2 = E_1 * \frac{N_2 * K_{n2}}{N_1 * K_{n1}}$$

Jednadžba 4.3

Struja i napon induciraju se u rotorskom namotu elektromagnetskom indukcijom statora,
pa se ovi motori često nazivaju i *indukcijski motori*.

4.4. Ostale fizikalne veličine asinkronog motora

Da bi se moglo nastaviti s upoznavanje fizikalne slike asinkronog motora, potrebno je uz
veličine koje su bile razmatrane u prethodnom dijelu, upoznati i ostale veličine koje se jav-
ljaju kod rada asinkronog motora, a to su:

- relativna brzina
- klizanje
- brzina rotora
- frekvencija u rotorskom strujnom krugu
- rotorski magnetski tok i brzina njegova vrtnje te rezultanti tok asinkronog motora.

4.4.1. Relativna brzina

Kao što smo prije rekli, magnetski tok statora rotira sinkronom brzinom n_s koja je uvijek
veća od brzine rotora n . Ako smo na rotirajućem rotoru i promatramo rotirajući tok sta-
tora, opazit ćemo da vodiče rotora presijeca nekom brzinom koja je proporcionalna op-
terećenju rotora. Ta brzina je razlika između sinkrone brzine n_s i brzine rotora n i zove se
relativna brzina i označava se s n_r .

$$n_r = n_s - n$$

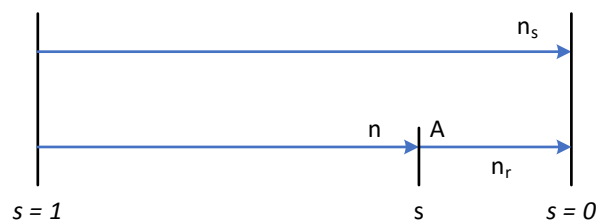
Jednadžba 4.4

Veličina n_r , koja označava brzinu rotacije magnetskog toka u rotoru, definira se kao brzina
rotacije magnetskog toka u rotoru u odnosu na broj presjeka vodiča rotora magnetskim
tokom statora.

Imamo tri karakteristična slučaja relativne brzine kod rada asinkronog motora. Ako motor radi u praznom hodu, relativna brzina je vrlo mala jer je brzina rotora vrlo blizu sinkronoj brzini. Kod nazivnog opterećenja asinkronog motora smanjuje se brzina rotora, ali raste relativna brzina. Ako se rotor asinkronog motora zakoči tako da ostaje u mirovanju, tada je relativna brzina n_r jednaka sinkronoj brzini n_s .

4.4.2. Klizanje

Rotor u rotaciji zaostaje za okretnim magnetskim poljem statora. Zaostajanje rotora proporcionalno je s opterećenjem. Zbog toga je uveden naziv *klizanje* i označava se sa s . Prema slici 4.8 točka A kliže naprijed-nazad u skladu s promjenom opterećenja rotora i promjene brzine n od $n = 0$ ($s = 1$) do $n = n_s$ ($s = 0$), kao što je prikazano na slici 4.8.



Slika 4.8: Grafički prikaz brzine [Izvor: Autorski rad]

Klizanje s definirano je kao odnos brzine kojom magnetski tok statora presijeca vodiče rotora i sinkrone brzine kojom rotira magnetski tok statora. Izraženost s brzinom vrtnje proizlazi:

$$s = \frac{n_r}{n_s} = \frac{n_s - n}{n_s}$$

Jednadžba 4.5

To je odnos relativne i sinkrone brzine. Izražava se obično u postotnim vrijednostima sinkrone brzine n_s .

$$s \% = \frac{n_s - n}{n_s} * 100$$

Jednadžba 4.6

Asinkroni motor radi pri nazivnom opterećenju s klizanjem od 3 % do 6 % kod malih motora, a 1 % do 3 % kod srednjih i velikih motora. Klizanje je važna veličina za analizu pogonskih stanja asinkronog stroja.

4.4.3. Brzina rotora

Brzina rotora je obrnuto proporcionalan s opterećenjem. Određuje se klizanjem s i sinkronom brzinom n_s . Brzinu rotora možemo iskazati prema formuli za klizanje:

$$s = \frac{n_r}{n_s} = \frac{n_s - n}{n_s} \Rightarrow n = n_s - n_s * s = n_s * (1 - s)$$

Jednadžba 4.7

Uvrštavanje već poznate formule za sinkronu brzinu n_s .

$$n_s = \frac{60 * f}{p}$$

Jednadžba 4.8

Proizlazi da je brzina rotora:

$$n = \frac{60 * f_1}{p} * (1 - s)$$

Jednadžba 4.9

4.4.4. Frekvencija rotorske struje i napona

Magnetski tok statora presijeca vodiče relativnom brzinom pa o njoj ovisi frekvencija u rotoru. Kako se mijenja relativna brzina, mijenja se i frekvencija rotora f_2 . Frekvencija f_2 dobije se iz jednadžbe za relativnu brzinu, s tim da se u jednadžbu uvrste odgovarajuće veličine.

Rješenjem jednadžbe dobije se izraz za frekvenciju struje i napona u rotoru.

$$n_r = n_s * s; \quad n_r = n_s - n; \quad n_r = \frac{60 * f_2}{p}$$

Jednadžba 4.10

$$\frac{60 * f_2}{p} = \frac{60 * f_1}{p} - \frac{60 * f_1}{p} * (1 - s) = \frac{60 * f_1}{p} * s$$

Jednadžba 4.11

Skraćenjem izraza proizlazi:

$$f_2 = f_1 * s$$

Jednadžba 4.12

Frekvencija struje i napona u rotoru ovisna je o relativnoj brzini, odnosno o klizanju i frekvenciji u statoru. Klizanje se može definirati i kao odnos frekvencije u rotoru i frekvencije u statoru.

4.4.5. Brzina vrtnje rotorskog magnetskog toka

Dosada se razmatrao samo magnetski tok koji nastaje u statoru zbog protjecanja trofaznih struja kroz statorski trofazni namot. Kao što je poznato, statorski tok kao rezultat triju faznih izmjeničnih tokova rotira sinkronom brzinom i stalnog je iznosa.

Kada kroz rotorske vodiče proteče struja, u rotoru se stvori *rotorski magnetski tok*.

Brzina rotacije rotorskog magnetskog toka može se promatrati u odnosu na rotor i u odnosu na stator.

Rotorski magnetski tok prema rotoru rotira brzinom koja ovisi o frekvenciji rotorske struje prema relaciji:

$$n_{\Phi_r} = \frac{60 * f_2}{p}$$

Jednadžba 4.13

gdje je n_{Φ_r} brzina rotorskog toka promatrana sa rotora.

Iz navedene relacije proizlazi da rotorski magnetski tok u odnosu na rotor rotira upravo relativnom brzinom n_r , jer je $n_r = n_{\Phi_r}$.

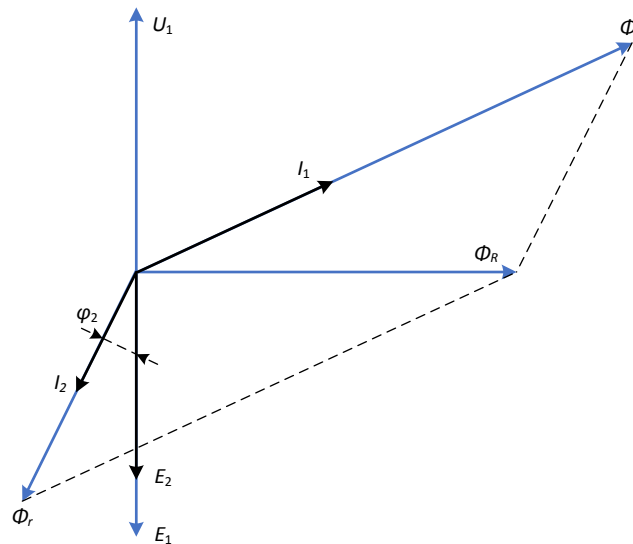
Promatra li se brzina rotorskog magnetskog toka sa statora, lako se utvrđuje da on rotira brzinom kojom rotira i statorski tok. Rotor naime, rotira brzinom n , a u njemu magnetski tok brzinom n_r . Zbroje li se brzine vrtnje, dobije se ukupna brzina rotorskog toka promatrana sa statora:

$$n + n_r = n_s; \quad n_s * (1 - s) + n_s * s = n_s$$

Jednadžba 4.14

Iz navedene relacije proizlazi da magnetski tokovi statora i rotora rotiraju jednakom brzinom pa jedan prema drugome relativno miruju. Oba magnetska toka u motoru stvaraju jedan ukupni magnetski tok koji također rotira sinkronom brzinom.

Slika 4.9 je fazorsko-vektorski prikaz magnetskih tokova i struja i napon u asinkronom motoru. Magnetski tok statora je Φ_s , magnetski tok rotora je Φ_r , a ukupni magnetski tok je Φ_R .



Slika 4.9: Fazorsko-vektorski prikaz magnetskih tokova i struja i napon u sinkronom motoru [Izvor: Autorski rad]

4.5. Pogonska stanja asinkronog motora

Kada je statorski namot priključen na trofaznu mrežu, struja magnetiziranja stvara trofazni statorski magnetski tok koji rotira sinkronom brzinom, ulazi u rotor te ulančuje i presijeca namot.

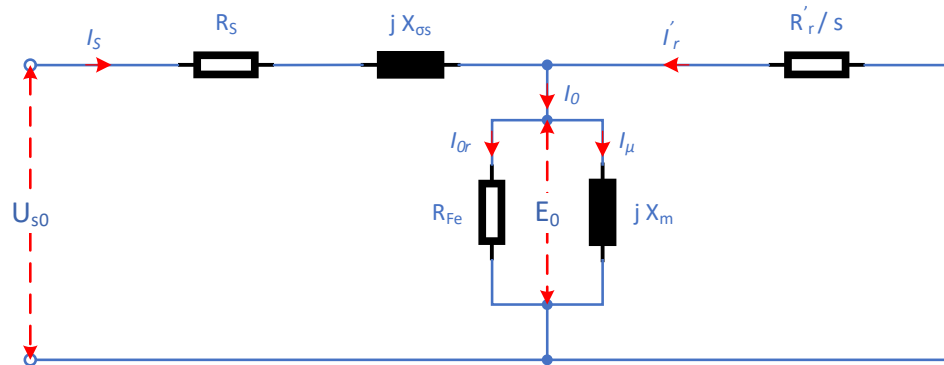
Rotor je mehanički odvojen od statora i nema nikakvog vanjskog napajanja. Rotor je samostalno tijelo u magnetskom polju statora. Glavni mu je zadatak da pokreće radni stroj koji je spojen na njegovu osovinu i elektromagnetskom indukcijom preuzima iz statora potrebnu snagu.

Rotor može biti u raznim pogonskim uvjetima, a to su:

- u praznom hodu
- u kratkom spoju
- u pogonskom stanju s promjenjivim mehaničkim opterećenjima.

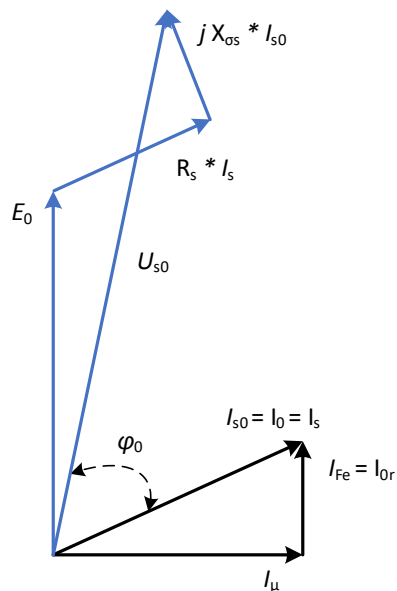
4.5.1. Prazni hod asinkronog motora

Na osovini nema opterećenja, klizanje je vrlo malo $s \ll$, otpor rotora je velik $R_r \gg$, struja praznog hoda I_0 je mala. Na slici 4.10 prikazana je nadomjesna shema praznog hoda.



Slika 4.10: Nadomjesna shema praznog hoda [Izvor: Autorski rad]

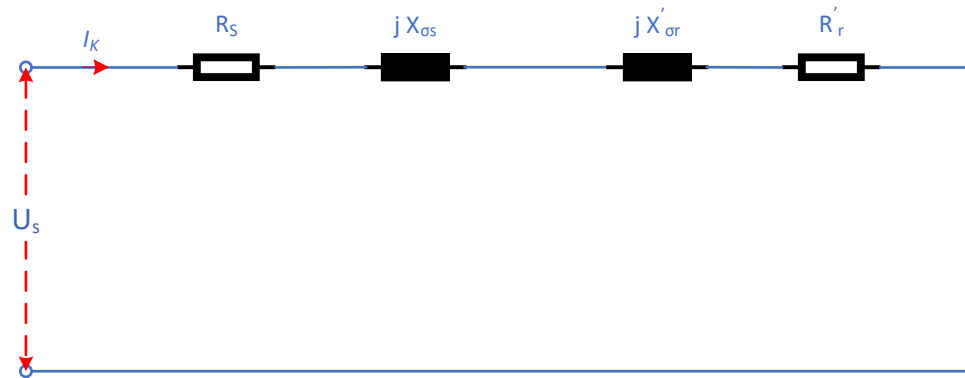
Na slici 4.11 prikazan je fazorski dijagram za stanje praznog hoda. Rotorski dio nadomjesne sheme se može zanemariti jer je struje rotora vrlo mala $I_r \ll$. Faktor snage praznog hoda je $\cos \Phi_0$.



Slika 4.11: Fazorski dijagram za stanje praznog hoda [Izvor: Autorski rad]

4.5.2. Kratki spoj asinkronog motora

U stanju kratkog spoja rotor je zakočen, klizanje $s = 1$, a struja kratkog spoja vrlo velika ($I_k = 5 - 10 I_n$). Na slici 4.12 prikazana je nadomjesna shema kratkog spoja.



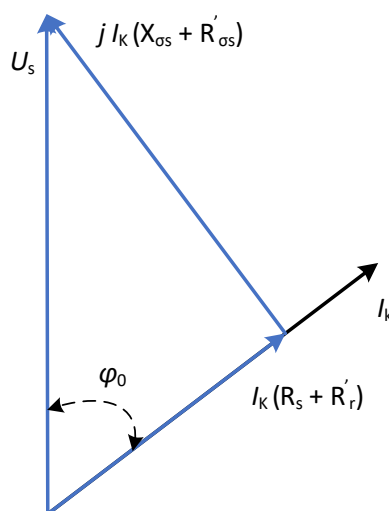
Slika 4.12: Nadomjesna shema kratkog spoja [Izvor: Autorski rad]

U kratkom spoju može se zanemariti poprečna grana sheme i struja računati prema izrazu:

$$I_k = \frac{U_s}{\sqrt{(R_s + R'_r)^2 + (X_{os} + X'_{or})^2}}$$

Jednadžba 4.15

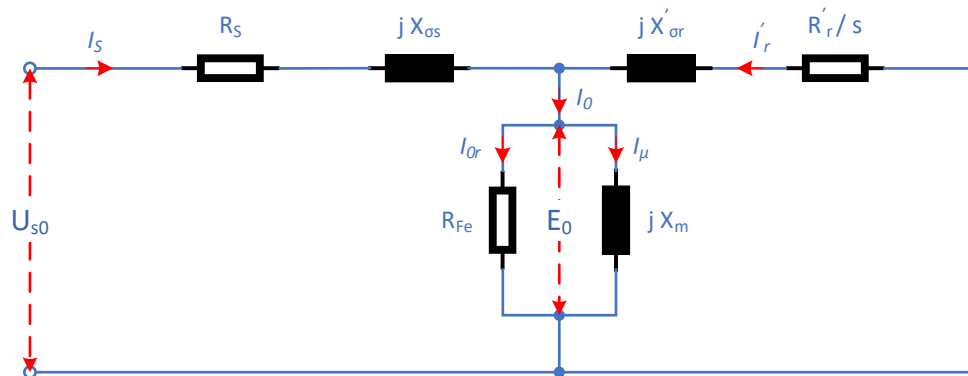
što se može vidjeti i na fazorskom dijagramu na slici 4.13.



Slika 4.13: Fazorski dijagram za stanje kratkog spoja [Izvor: Autorski rad]

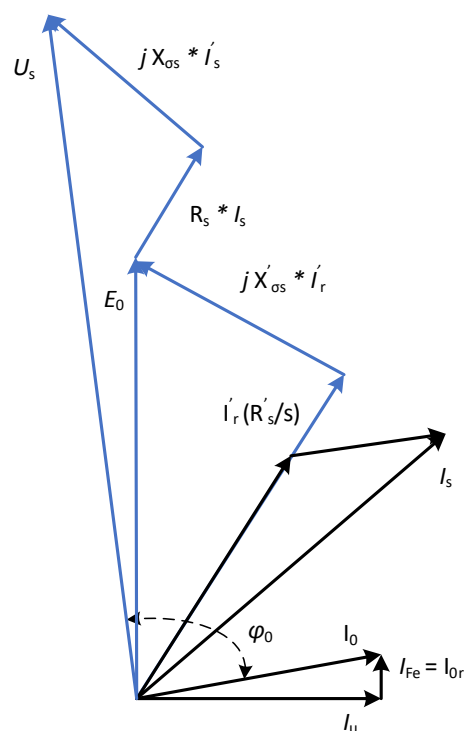
4.5.3. Opterećenje na osovini asinkronog motora

Klizanje je malo od 1 % do 5 %, dok vrijednost struje ovisi o opterećenju (veće opterećenje – veća struja). Na slici 4.14 prikazana je nadomjesna shema stacionarnog stanja.



Slika 4.14: Nadomjesna shema stacionarnog stanja [Izvor: Autorski rad]

Prema nadomjesnoj shemi crtaju se fazorski dijagrami kako je prikazano na slici 4.15, Φ je kut faznog pomaka struje i napona.

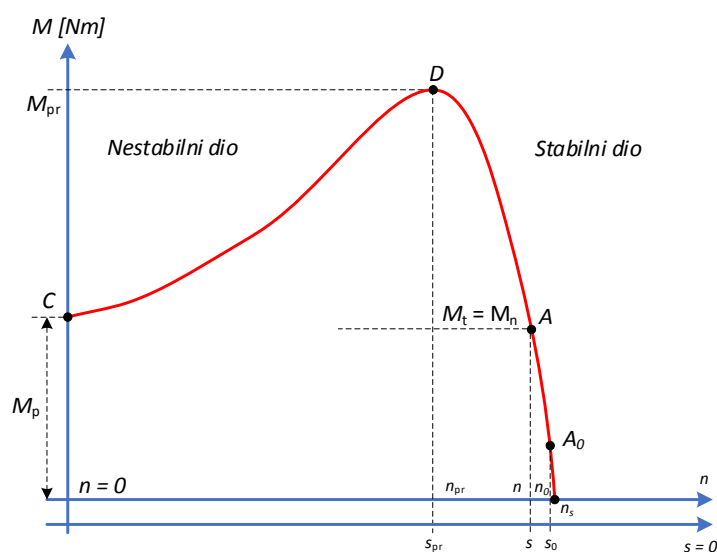


Slika 4.15: Fazorski dijagram za opterećenje [Izvor: Autorski rad]

4.6. Momentna karakteristika asinkronog motora

Svaki asinkroni motor je konstruiran za određenu snagu, određeni napon i frekvenciju. Da bi mogao svladati vanjsko opterećenje koje je priključeno na osovину, tj. moment tereta M_t , motor mora razviti odgovarajući moment vrtnje ili okretni moment M . (Krčum, M. 2009)

Moment vrtnje koji razvija asinkroni motor kod konstantnog napona i kratko spojenog namota rotora nije konstantan, već se mijenja s promjenom broja okretaja, odnosno klizanja, prema krivulji prikazanoj na slici 4.16. Ova krivulja naziva se *momentna karakteristika asinkronog motora*. To je prirodna karakteristika kliznokolutnog motora, odnosno standardnog kaveznog motora.



Slika 4.16: Momentna karakteristika asinkronog motora [Izvor: Autorski rad]

Iz analize momentne karakteristike mogu se izvući različiti zaključci o sposobnostima asinkronog motora da razvije moment vrtnje u različitim pogonskim uvjetima.

U trenutku pokretanja, klizanje $s = 1$, brzina $n = 0$, asinkroni motor može generirati moment vrtnje koji je određen točkom C. Taj moment vrtnje koji se naziva *potezni* ili *pokretni moment* i označava se s M_p , omogućuje motoru da se samostalno pokrene u trenutku kada je spojen na mrežu.

Kad se motor pokrene, brzina mu počinje rasti, a klizanje opadati. Mogućnosti razvijanja momenta vrtnje rastu, odnosno motor razvija sve veći moment vrtnje, sve do točke D u kojoj je motor razvio maksimalni moment vrtnje. Taj maksimalni moment vrtnje koji određeni asinkroni motor uopće može razviti naziva se još i *prekretni moment* i označava se s M_{pr} . S daljnjim porastom brzine motora, veličina momenta vrtnje koji razvija motor opada sve do nule, odnosno do točke u kojoj asinkroni motor teoretski poprima sinkronu brzinu. U toj je točki moment nula, $M = 0$.

$$n = n_s, \quad s = 0$$

Jednadžba 4.16

4.7. Jednofazni asinkroni motor

Osim trofaznih asinkronih motora u praksi se mnogo primjenjuju i jednofazni asinkroni motori. Osobito se mnogo upotrebljavaju motori manjih snaga za kućanske aparate, a većih snaga u industriji. Velika je primjena malih motora posebne namjene.

Izrađuju se kao kolutni i kavezni motori, i to kavezni do nekoliko W do približno 10 kW, a kolutni od 1,5 kW do najviše 50 kW. Građeni su slično kao i trofazni. U utore statora stavlja se jednofazni radni namot glavne faze, koji ispunjava 2/3 utora, a preostalu 1/3 utora ispunjava namot pomoćne faze. Rotor je po građi potpuno sličan trofaznom, s tim da kolutni ima samo dva klizna koluta. Jednofazni asinkroni motor priključuje se na jednu fazu izmjenične mreže na naponu od 230 V.

4.7.1. Rad jednofaznog asinkronog motora

Statorski magnetski tok jednofaznog asinkronog motora ne rotira, već na mjestu pulsira, odnosno mijenja se po zakonu sinusa od maksimalnih do minimalnih vrijednosti. Taj fazni mirujući tok sastoji se u stvari od dva suprotno rotirajuća magnetska toka, direktnog magnetskog toka Φ_d i inverznog magnetskog toka Φ_i , pri čemu je:

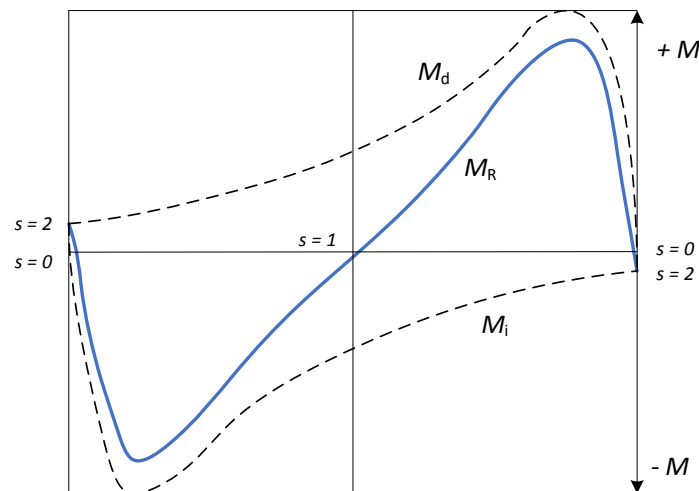
$$\Phi_d = \Phi_i = \frac{\Phi_{max}}{2}$$

Jednadžba 4.17

U svakom trenutku geometrijski zbog Φ_d i Φ_i daje vrijednost faznog mirujućeg toka koji se mijenja od maksimalne pozitivne vrijednosti preko nule do maksimalne negativne vrijednosti. Isto je i kod sinkronih jednofaznih strojeva.

Zbog toga što su rotirajući tokovi Φ_d i Φ_i međusobno jednaki i što rotiraju suprotno, rotor ne može krenuti, jer svaki tok stvara svoj moment vrtnje. Kako su oni u trenutku pokretanja jednaki, međusobno se poništavaju te na rotor ne djeluje nikakva sila zakretanja.

Momentne karakteristike jednofaznog asinkronog motora prikazane su na slici 4.17.



Slika 4.17: Momentna karakteristika jednofaznog asinkronog motora [Izvor: Autorski rad]

Slika 4.17 M_d prikazuje momentnu karakteristiku izravne komponente Φ_d , M_i momentnu karakteristiku inverzne komponente Φ_i , a M_R je rezultantna momentna karakteristika, u stvari karakteristika jednofaznog asinkronog motora. Kao što se vidi iz karakteristike M_R , u trenutku pokretanja $s = 1$, a $M_R = 0$, dakle nema poteznog momenta.

Da bi se motor mogao upotrijebiti, odnosno da se pokrene i rotira, potrebno je jedan od momenta, bilo M_d ili M_i , potpomoći, tj. treba na neki način omogućiti da se rotor zarotira u jednom smjeru, pa će sam dalje nastaviti rotirati svladavši pritom suprotni moment. Kod starijih motora to se činilo rukom ili oprugom, no to se, pogotovo kod velikih motora, nije pokazalo praktičnim pa su pronađena druga dobra rješenja koja omogućuju pokretanje motora.

4.7.2. Pokretanje jednofaznog asinkronog motora

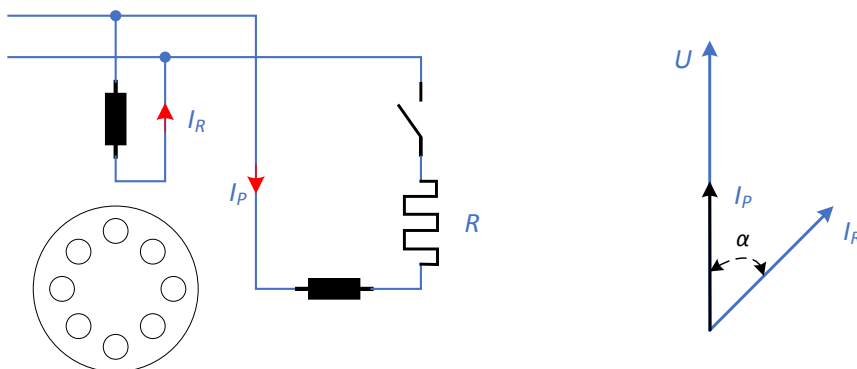
Jednofazni motori koji se danas proizvode u tvornicama, redovno uz glavni fazni namot ili radni namot imaju i pomoćnu fazu. Kako smo već spomenuli, namot glavne faze stavlja se u $2/3$ utora, a namot pomoćne faze u preostalu $1/3$ utora.

Namot pomoćne faze pomaknut je u odnosu na namot glavne faze za 90° el.

Međutim, obje faze motora vezane su na istu naponsku mrežu, a to znači da struja u obje faze stvara magnetski tok istodobno. Rotirajuće magnetsko polje dobit će se ako se postigne da u pomoćnoj fazi struja bude fazno pomaknuta prema struji u glavnoj fazi. To znači da će u jednoj fazi magnetsko polje nastati nešto prije nego magnetsko polje u drugoj fazi. Upravo je to potrebno da bi se dobila rotacija magnetskog toka.

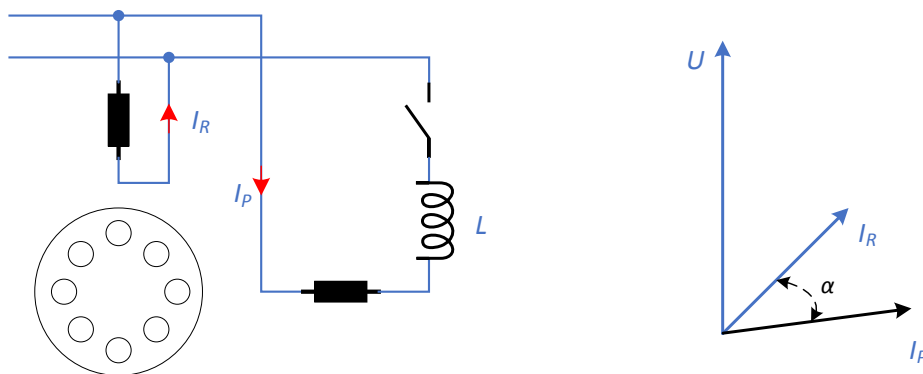
Fazni pomak između struje glavne faze I_R i struje pomoćne faze I_P može se postići na tri načina:

- Uključivanjem djelatnog otpora između mreže i pomoćne faze – to je najjednostavnije i najjeftinije rješenje jer se povećanje djelatnog otpora postiže tako da se namot pomoćne faze izvede od žice koja ima veći otpor. Zbog velikog djelatnog otpora, struja u pomoćnoj fazi bit će u fazi s naponom, a struja glavne faze I_R zaostajat će za neki kut, jer glavni namot uz djelatni otpor ima i induktivni otpor, kako je prikazano na slici 4.18.



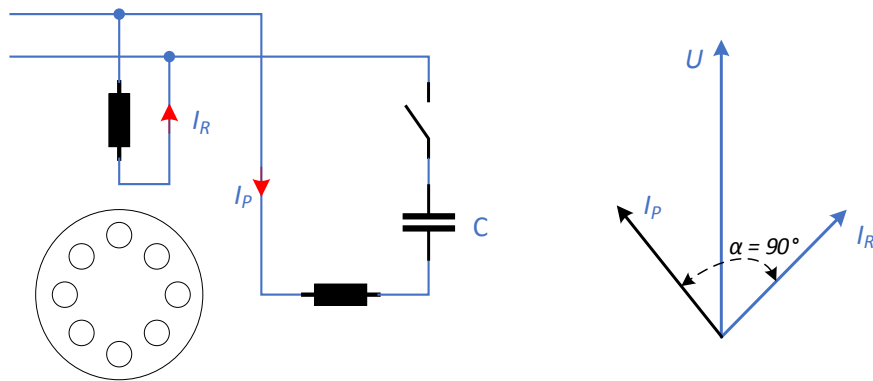
Slika 4.18: Pokretanje pomoću uključivanja djelatnog otpora i fazorski prikaz [Izvor: Autorski rad]

- Uključivanjem induktivnog otpora između mreže i pomoćne faze – daje veći pokretni moment, ali se danas gotovo ne upotrebljava. Prikazan je na slici 4.19.



Slika 4.19: Pokretanje pomoću uključivanja induktivnog otpora i fazni prikaz [Izvor: Autorski rad]

- Uključivanjem kapacitivnog otpora između mreže i pomoćne faze – najviše se upotrebljava. Uključivanjem kondenzatora u pomoćnu fazu moguće je postići točan vremenski pomak magnetskog toka za 90° el. Time je postignuto da je vremenski pomak jednak prostornom pomaku faze, kako je prikazano na slici 4.20.



Slika 4.20: Pokretanje pomoću uključivanja kapacitivnog otpora i fazni prikaz [Izvor: Autorski rad]

Pomoćna faza s kondenzatorom uključena je samo za vrijeme pokretanja, pa su fazni namot i kondenzator dimenzionirani samo za kratkotrajno opterećenje. Kada motor poprimi određenu brzinu, pomoćna faza s kondenzatorom automatski se isključuje pomoću elektromagneta ili centrifugalne sklopke.

Uključivanjem kondenzatora dobilo se simetrično okretno magnetsko polje, koje daje veliki pokretni moment. Taj moment može biti 1 do 1,5 puta veći od nazivnog momenta.

Danas se jednofazni asinkroni motori izrađuju tamo gdje su pomoćna faza i kondenzator trajno uključeni. Takvi motori nazivaju se *kondenzacijski motori*. Upotrebljavaju se samo za približno stalna opterećenja. Potezni moment kondenzacijskog motora nije velik, iznosi od 50 % do 60 % od nazivnog momenta.

4.8. Asinkroni generator

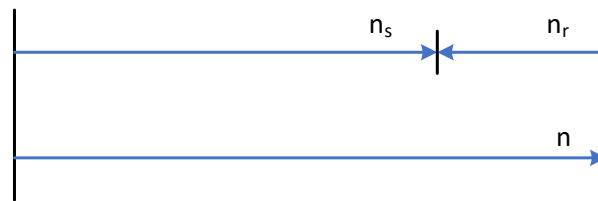
Asinkroni stroj može raditi i kao generator. Kad stroj radi kao generator, tada u mrežu predaje električnu energiju. Asinkronom generatoru na osovinu rotora dovodimo mehaničku energiju da bi predao električnu energiju u električnu mrežu.

Pogonski stroj koji radi brzinom $n_p > n_s$ povećava brzinu rotora asinkronog stroja kontinuiranom regulacijom. Kad se rotor vrti istom brzinom kao magnetsko polje statora, brzina rotora $n = n_s$, odnos između rotora i statora je neutralan. Pri tim uvjetima elektromagnetsko djelovanje statora i rotora nestaje te energija ne može prelaziti između statora i rotora.

Ako se poveća brzina rotora tako da je veća od sinkrone ($n > n_s$), relativna brzina mijenja smjer, kako je prikazano na slici 4.21.

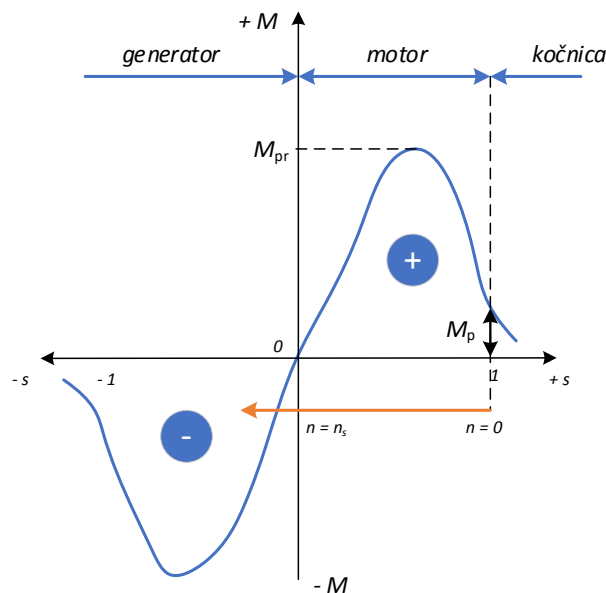
$$n + (-n_r) = n_s \quad , \quad -n_r = n_s - n = n_s(-s)$$

Jednadžba 4.18



Slika 4.21: Grafički prikaz brzina u asinkronom generatoru [Izvor: Autorski rad]

Na slici 4.22. prikazana je momentna karakteristika asinkronog motora. Može se vidjeti da relativna brzina mijenja smjer, ima negativni predznak, pa tako i klizanje s ima negativni predznak. Kada se promijeni smjer magnetskog toka kroz vodiče rotora suprotno od smjera uzbuđnog toka statora, mijenja se i smjer inducirane struje u rotorskom namotu. Okretni moment, u usporedbi s onim kada stroj radi kao motor, ukazuje da je asinkroni stroj u generatorskom području rada i da električnu energiju šalje u mrežu.



Slika 4.22: Momentna karakteristika asinkronog motora za rad u generatorskom, motorskom i kočnom području [Izvor: Autorski rad]

Asinkroni stroj će raditi kao generator ako na njegovu osovinu rotora priključimo pogonski stroj koji će mu predavati mehaničku energiju. Pri tome je sve vrijeme iz mreže uzimao uzbuđnu induktivnu struju koja je potrebna za magnetiziranje. Struja magnetiziranja, tj. uzbuđna struja za asinkroni stroj je velika te iznosi od 25 do 30 % nazivne struje stroja.

Velike struje magnetiziranja čine asinkrone strojeve velikim induktivnim trošilima, s lošim faktorom snage $\cos\Phi$.

Fazorski dijagram asinkronog generatora isti je kao i kod motora, s tim da fiktivni otpor R_2/s ima drugo značenje. Kod generatora taj otpor fizikalno znači da aktivna snaga iz rotora elektromagnetskim putem prelazi iz statora na električnu mrežu.

Pitanja za provjeru znanja

1. Navedi glavne konstruktivne dijelove asinkronog stroja.
2. Kako je konstruiran stator asinkronog stroja?
3. Od kojih materijala se izvodi i čemu služi kućište asinkronog stroja?
4. Kojom brzinom rotira rezultatno magnetsko polje statora?
5. O čemu ovisi veličina struje i momenta zakretanja rotora?
6. Zašto se asinkroni motori nazivaju još i indukcijski motori?
7. Što je klizanje kod asinkronog motora?
8. Kako se mijenja brzina rotora, relativna brzina i klizanje s promjenom opterećenja motora?
9. Navedi moguća pogonska stanja asinkronog motora.
10. Kada je asinkroni motor u kratkom spoju?
11. O kojim veličinama ovisi pokretni moment?

5

POGLAVLJE

ISTOSMJERNI STROJEVI

Nakon ovog poglavlja moći ćete:

- upoznati princip rada i konstrukcijske dijelove istosmjernih strojeva
- objasniti vrste istosmjernih strojeva
- objasniti snagu istosmjernog stroja i iskoristivost.

5.1. Uvod u istosmjerne strojeve

Istosmjerni strojevi dijele se na generatore i motora. Generatori istosmjerne struje ili istosmjerni motori proizvode istosmjernu struju i napon, dok istosmjerni motori troše istosmjernu struju i napon. Da bi generatori proizvodili istosmjernu struju i napon, moraju biti pogonjeni pogonskim strojevima koji troše mehaničku energiju za rotaciju generatora. Motori se priključuju na mrežu istosmjernog napona i struje, uzimaju električnu energiju iz mreže i pretvaraju je u mehaničku.

Istosmjerni generatori i motori su konstrukcijski jednako građeni pa svaki istosmjerni stroj može biti generator ili motor. Iz praktičnih razloga se redovito neki istosmjerni stroj koristi samo kao generator ili kao motor.



Slika 5.1: Istosmjerni stroj [Izvor: <https://www.shutterstock.com/image-photo/dc-motor-machine-isolated-on-white-267800240>]

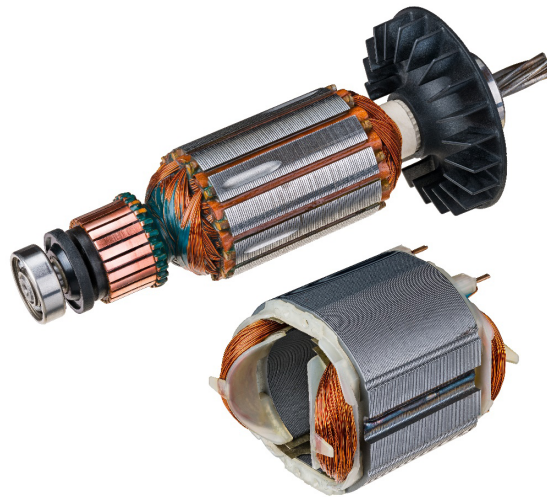
Istosmjerni strojevi bili su dugo vremena jedini električni strojevi. Poslije otkrića Teslina okretnog polja i razvitkom izmjeničnih električnih strojeva, brzo su bili potisnuti iz šire primjene. Koriste se kao mali električni motori i strojevi posebne namjene.

Istosmjerni stroj ima tri osnovna dijela:

- stator
- rotor s armaturnim namotom
- kolektor.

Građen je slično kao i sinkroni stroj, s tom razlikom što su kod istosmjernog stroja magnet-ski polovi učvršćeni na stator, a rotor nosi armaturni namot ili radni namot.

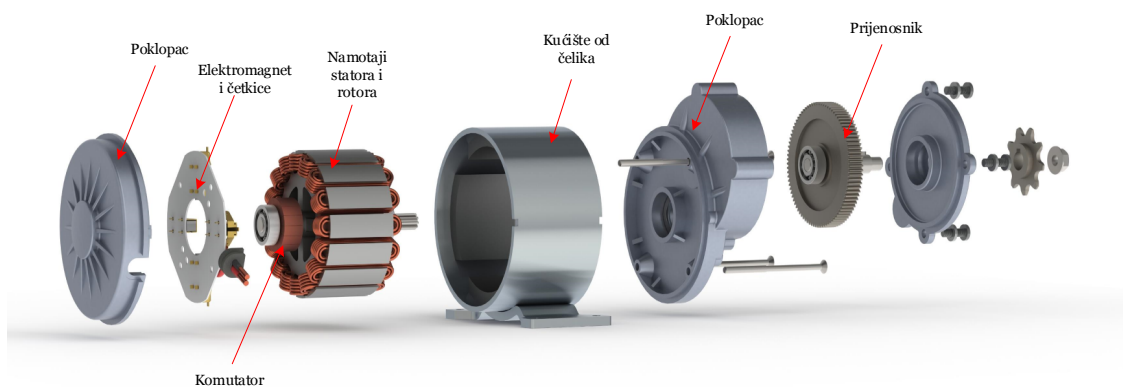
Istosmjerni stroj ima kolektor ili komutator koji je učvršćen na osovinu rotora, dok sinkroni stroj ima klizne kolute. Na slici 5.2. prikazan je rastavljeni istosmjerni stroj.



Slika 5.2: Rastavljeni istosmjerni stroj [Izvor: <https://www.shutterstock.com/image-photo/electric-dc-motor-stator-rotor-plastic-2109041753>]

5.2. Konstruktivni elementi istosmjernih strojeva

Istosmjerni strojevi su rotacijski električni strojevi pa njihova konstrukcija, kao i kod ostalih rotacijskih električnih strojeva, mora udovoljiti tom zahtjevu, kako što je prikazano na slici 5.3.



Slika 5.3: Konstruktivni dijelovi istosmjernog stroja [Izvor: <https://www.shutterstock.com/image-illustration/direct-current-motor-3d-rendering-isolated-2185345831>]

Stroj mora imati vanjski stabilni dio koji nosi sve unutarnje dijelove stroja, a ujedno služi i kao zaštitni oklop. Taj dio se naziva *stator*.

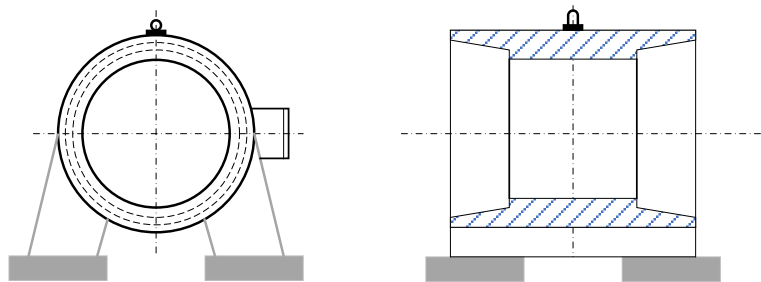
Unutar statora imamo *rotor* koji rotira, bilo da ga pokreće neki drugi pogonski stroj ako se radi o generatoru ili da rotor okreće neki vanjski radni stroj ako se radi o motoru. Osim statora i rotora istosmjerni stroj se sastoji još i od kolektora koji je važan element i učvršćen je na osovinu rotora.

5.2.1. Stator

Stator je sastavljen od kućišta koji nosi glavne, kod nekih strojeva i pomoćne magnetske polove s namotima, dok ga bočno zatvaraju ležajni štitovi.

Kućište je izvedeno u obliku šupljeg valjka sa stijenkama nešto veće debljine u srednjem dijelu. Taj dio kućišta naziva se *statorski jaram*. Kućište se izrađuje od lijevana ili valjana čelika.

Na slici 5.4 prikazano je kućište od valjana čelika.



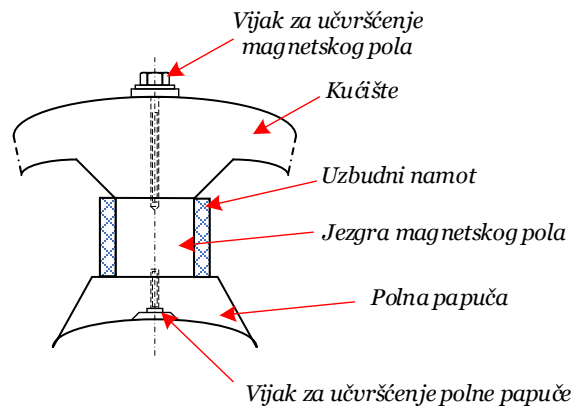
Slika 5.4: Kućište istosmjernog stroja [Izvor: Autorski rad]

Kućište statora ima višestruku zadaću:

- nosi magnetske polove
- omogućava zatvaranje silnica magnetskog toka
- štiti unutrašnjost stroja od vanjskih utjecaja
- nosi cijeli stroj.

Ležajni štitovi zatvaraju stator s obje strane otvorenog dijela kućišta. Izrađuju se od sivog lijeva i od valjanih čeličnih profila. Na sredini imaju otvor u koji se ugrađuju ležajevi za osovinu rotora. Učvršćuju se na kućište statora pomoću vijaka.

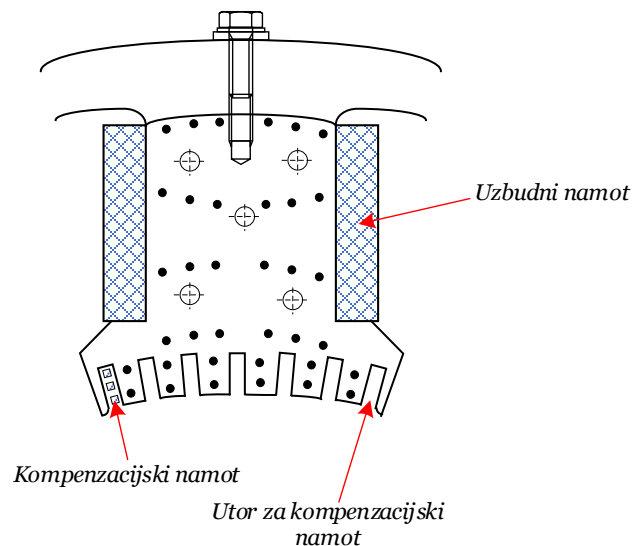
Glavni magnetski polovi se sastoje od pola na kojem je smješten uzbudni namot i od polnog nastavka, kako je prikazano na slici 5.5.



Slika 5.5: Glavni magnetski pol istosmjernog stroja [Izvor: Autorski rad]

Dimenzije glavnog pola određene su veličinom glavnog magnetskog toka. Jezgra magnetskog pola izrađuje se u obliku valjka ili u obliku kvadrata. Prednost valjkaste jezgre je u tome što je izvedba uzbudnog namota jednostavna i što je presjek jezgre najbolje iskorišten za prolaz magnetskog toka. Mana je u tome što se povećava i cijena ako se poveća dimenzija stroja.

Danas se kod izrade istosmjernih strojeva najčešće ugrađuju magnetski polovi s jezgrom u obliku kvadrata, koja se zajedno s polnim nastavkom izrađuje od dinamo limova debljine 0,5 do 1 mm. Na slici 5.6 je prikazan glavni magnetski pol od dinamo limova s uzbudnim namotom i utorima za kompenzacijski namot.



Slika 5.6: Glavni magnetski pol od dinamo limova [Izvor: Autorski rad]

Jezgra magnetskog pola može se izraditi i od željeza punog presjeka jer u njoj nema vrtložnih struja. Polni nastavak ili polna papuča izrađuje se od dinamo limova, jer mogu nastati vrtložne struje zbog blizine izmjeničnog magnetskog toka rotora.

Ako je magnetski pol u cijelosti izrađen od dinamo limova, paket limova treba dobro stegnuti i prešati kako ne bi došlo do rasipanja limova. To se postiže pritezanjem vijcima ili zakovicama. Vanjski limovi mnogo su deblji: od 6 mm do 12 mm i služe kao pritezne ploče.

Magnetski pol učvršćuje se na jaram statora vijcima. Ako je polni nastavak izrađen kao posebni dio, također se na jezgru učvršćuje vijcima. Polni nastavak oblikovan je na unutrašnjoj strani kružno, tako da se cijelom svojom dužinom što više približi rotoru i da se smanji zračni raspor.

Uz glavni uzbudni namot koji je smješten na jezgri magnetskog pola, na slici 5.5 su prikazani polni nastavak i utori za smještaj kompenzacijskog namota. Uzbudni namot glavnih magnetskih polova izrađuje se od izoliranih bakrenih vodiča, a pomoću šablone svitak se izradi tako da nesmetano sjedne na jezgru magnetskog pola. Iz svitka izlaze izvodi za priključak na istosmjerni izvor.

Uzbudni namot može biti izveden kao serijski, paralelni i kombinacija serijskog i paralelnog namota.

Serijski uzbudni namot istosmjernih strojeva spaja se serijski s namotom rotora te se takvi strojevi nazivaju *serijski strojevi*.

Paralelni uzbudni namot istosmjernih strojeva spaja se paralelno s namotom rotora pa se takvi strojevi zovu *paralelni strojevi*.

5.2.2. Rotor istosmjernog stroja

Rotor istosmjernog stroja sastoji se od tri elementa:

- rotorski paket
- armaturni namot
- kolektor.

Na osovinu se učvršćuje rotorski paket s pripadajućim namotom koji se naziva *armatura* te kolektor koji je također učvršćen na osovinu.

Rotorski paket je sastavljen od dinamo limova koji su debljine 0,5 mm. Izolirani su s obje strane da se smanje vrtložne struje i njihove posljedice. Zadatak rotorskog paketa je da nosi armaturni namot u utorima koji su izvedeni na obodu, da provodi magnetski tok i da prenosi sve sile koje nastaju na rotoru - bilo da stroj radi kao generator ili kao motor.

Rotorski paket istosmjernog stroja je građen na isti način kao i rotor asinkronog motora. Na slici 5.7 prikazan je rotorski paket koji je učvršćen pomoću zavarene konstrukcije, s radijalnim kanalima unutar paketa koji služe za pojačano hlađenje.



Slika 5.7: Rotorski paket istosmjernog stroja [Izvor: <https://www.shutterstock.com/image-photo/electrical-armature-assembly-isolated-on-white-1440377432>]

Namot armature je smješten na rotorski paket te je raspoređen u utorima i zatvoren je oko sebe. Izvedba namota ovisi pored ostalog i o obliku utora. Razlikuju se dvije osnovne izvedbe utora: otvoreni i poluzatvoreni. Na slici 5.7 možemo vidjeti nekoliko raznih oblika rotorskog utora.

Poluzatvoreni utori nam omogućavaju ravnomjernu raspodjelu magnetskog toka u zračnom rasporu i time dobivamo manje gubitke u zubovima utora. Nedostatak im je što se namoti izrađuju polušablonski, što zahtijeva i ručni rad i pojačanu izolaciju.

Otvoreni utori omogućavaju šablonsku izradu namota, kojom se postiže veliko sniženje troškova za izradu namota.

Centrifugalna sila pri rotaciji djeluje na namot pa se namot mora učvrstiti kako bi trajno zadržao svoj položaj u utoru, ali i izvan utora. To možemo postići da namot u utorima učvrstimo klinom gdje je to moguće.

Namoti armature se izrađuju od bakrenih vodiča. Izolacija je neaktivni dio namota pa je potrebno da u utorima bude više bakrenog vodiča nego izolacije. Izolacija mora zadovoljavati i mehaničke i električne zahtjeve. Za izolaciju se najviše upotrebljavaju izolacijski materijali, kao što su papir, lak, pamuk, koji moraju u odgovarajućim pogonskim uvjetima izdržati potrebna zagrijavanja.

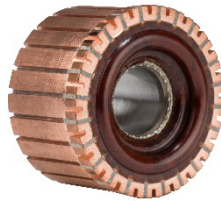
Kolektor je jedan od najvažnijih i najosjetljivijih dijelova istosmjernog stroja. Učvršćen je na osovinu rotora i dobro je izoliran. Kolektor ili komutator nam omogućava pretvaranje izmjenične struje i napona u istosmjernu i obrnuto.

Kolektor se sastoji od velikog broja bakrenih lamela, kojih ima i po više stotina, a kod nekih strojeva i više od tisuću. Lamele moraju biti međusobno i prema osovinu dobro izolirane. Velike centrifugalne sile koje djeluju na lamele kod rotacije stroja ne smiju olabaviti i deformirati kolektor po kliznoj površini.

Kolektori se izrađuju u dvije osnovne izvedbe:

- mali kolektori s lamelama učvršćeni *plastikom*
- veliki kolektori u *svornoj* izvedbi.

Na slici 5.8 možemo vidjeti izgled kolektora.

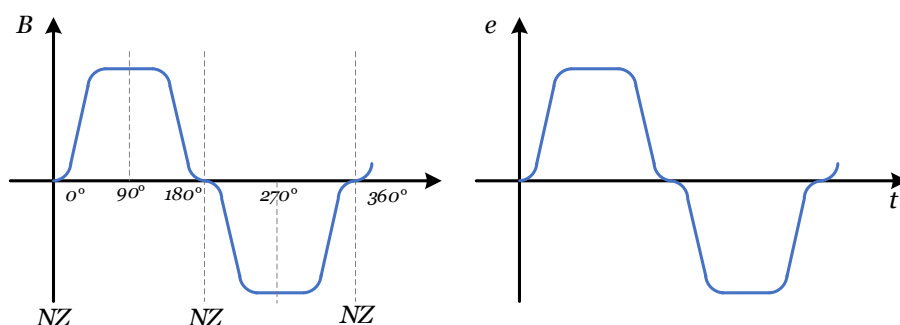


Slika 5.8: Komutator [Izvor: <https://www.shutterstock.com/image-photo/commutator-385950718>]

5.3. Načelo rada istosmjernih strojeva

Princip rada istosmjernih strojeva bit će prikazan na primjeru generatorskog režima rada. Kada kroz vodiče namota statora protječe istosmjerna struja, ona stvara stalno uzbuđeno magnetsko polje Φ odgovarajućeg polariteta, ovisno o smjeru struje. Ovo polje je periodično, s periodom jednakom duljini dvostrukog polnog koraka i funkcija je prostorne koordinate, odnosno položaja na obodu stroja. (Krčum, M. 2009)

Kada se pomoću nekog pogonskog stroja rotor okreće konstantnom brzinom n , u njegovim zavojima se, zbog presijecanja magnetskog polja, inducira odgovarajuća elektromotorna sila po zakonu . Raspored magnetske indukcije je prikazan na slici 5.9.



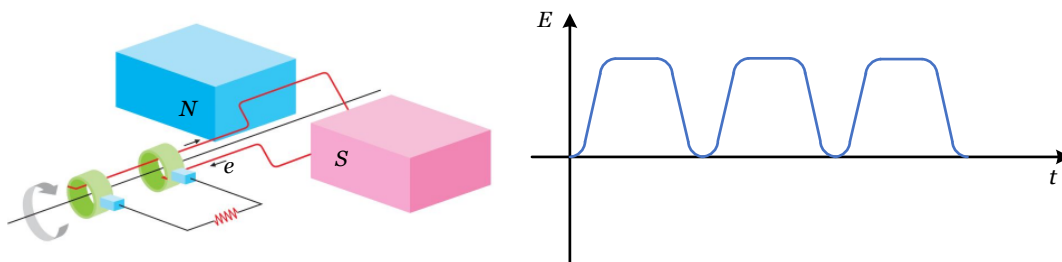
Slika 5.9: Raspored magnetske indukcije u zračnom rasporu i oblik induciranog napona u vodiču [Izvor: Autorski rad]

Budući da je samo magnetska indukcija promjenjiva, oblik e_{ms} bit će isti oblik kao i oblik magnetskog polja, indukcija B . U pojedinim vodičima koji sačinjavaju zavoj, e_{ms} će biti suprotan i zbrajat će se, jer su spojeni u seriju. Kada je zavoj u položaju da je pod utjecajem magnetskog toka, u njemu će se inducirati elektromotorna sila, e_{ms} , koja će biti jednaka nuli. Taj položaj nazivamo neutralnom zonom.

$$e = -\frac{d\Psi}{dt}$$

Jednadžba 5.1: Elektromotorna sila (e_{ms})

Zahvaljujući djelovanju kolektora, polaritet elektromotorne sile, kao i polaritet struje, neće se mijenjati u odnosu na vanjski krug. Zbog nepromjenjivog smjera okretanja, četkice su uvijek istog polariteta jer su preko lamela kolektora povezane s vodičima koji prolaze ispod magnetskog pola. Pomoću kolektora se, prema tome, izmjenične struje u vodičima „ispravljaju“, što ima za posljedicu pojavu istosmjerne struje u vanjskom električnom krugu. Shematski je to prikazano na slici 5.10.



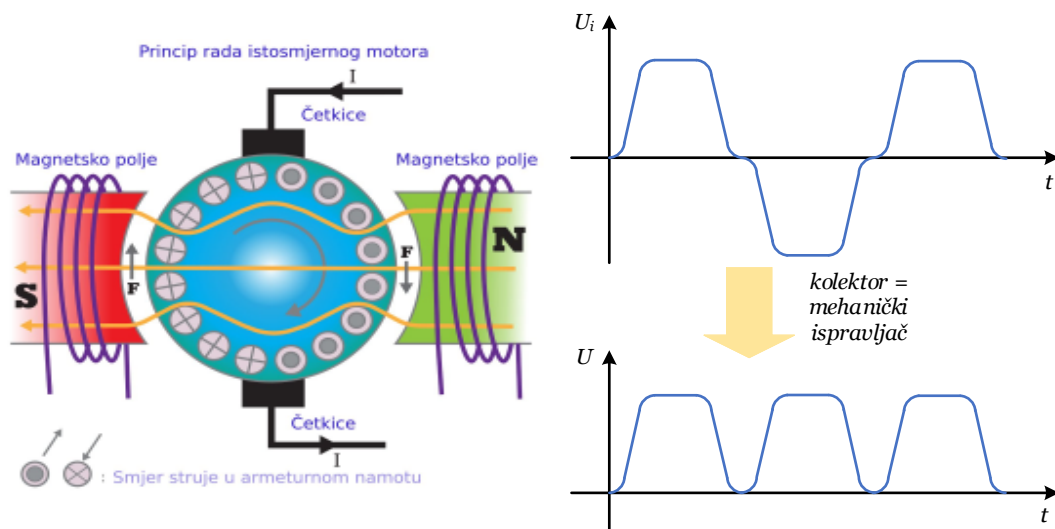
Slika 5.10: Dobivanje pulsirajućeg istosmjernog napona na četkicama [Izvor: <https://www.shutterstock.com/image-vector/dc-generator-cross-diagram-illustration-simple-2158091041>, Autorski rad]

Ako se na „+“ i „-“ stezaljke spojene s četkicama izvana priključi istosmjerni napon, proteći će struja I suprotnog smjera od one kod generatora. Na vodiče djeluje sila i nastaje okretni moment te stroj radi kao motor.

$$F = B * I * l$$

Jednadžba 5.2: Sila na vodiče

Okretni moment pokrene motor u istom smjeru u kojem se okretao generator, ali uz suprotan smjer struje, kako je prikazano na slici 5.11.



Slika 5.11: Princip rada istosmjernog motora [Izvor: <https://www.shutterstock.com/image-vector/basics-direct-current-motordc-motor-vector-2378402299>, Autorski rad]

Kada vodič napusti područje ispod jednog pola i prijeđe u područje drugog, mijenja se smjer magnetske indukcije B gdje je izložen, ali se istovremeno promijenio smjer struje u vodiču, a djelovanje komutatora s četkicama i smjer momenta je isti. Veći broj zavoja daje ravnomjerniji moment. Postoje dva naziva koji se koriste zbog dviju uloga, a to su: kolektor i komutator. Kolektor sakuplja struju ili napon, dok komutator mijenja smjer struje.

5.4. Vrste istosmjernih strojeva

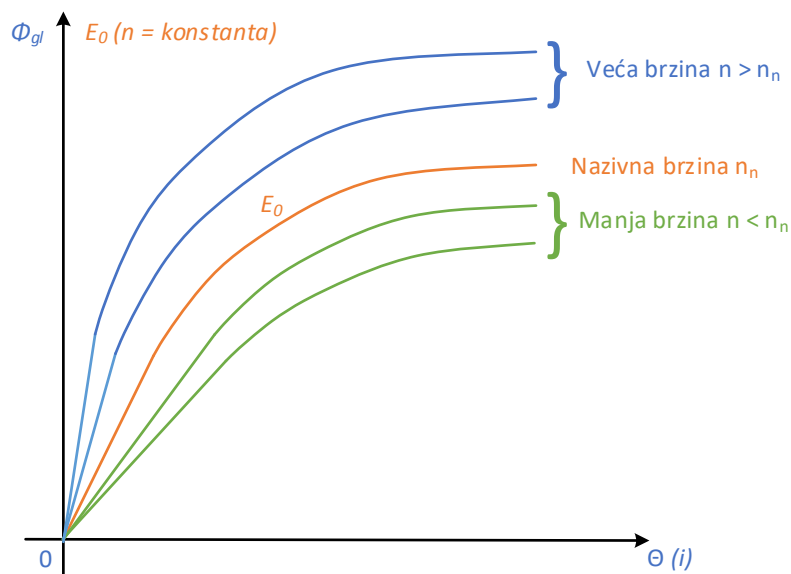
Svaki istosmjerni stroj je upotrebljiv kao generator i kao motor. Između generatora i motora u pogonu postoji razlika u međusobnim spojevima uzbude i armaturnog namota. Različita električna i mehanička svojstva koja se traže od generatora ili motora, postižu se pomoću raznih sustava uzbude stroja. Za poznavanje raznih vrsta istosmjernih generatora i motora potrebno je poznavati uzbudu istosmjernog stroja, izvore uzbudne struje i spajanje uzbudnog namota.

5.4.1. Uzbuda i vrste uzbude

U istosmjernom stroju postoji više namota u kojima se uzbuđuju magnetski tokovi. Postoji glavni uzbudni namot, namot pomoćnih polova, kompenzacijski namot i kompaudni namot. Kod dinamičnijih izvedbi uzbudni dijelovi istosmjernih strojeva su elektromagneti, odnosno polovi na kojima se nalaze uzbudni namoti. U praksi se rjeđe koristi uzbuda permanentnim magnetima.

Na glavnom polu stroja može biti jedan ili više uzбудnih namota. Ako na glavnom polu imamo više namota, stroj se može uzbuđivati iz više izvora. Pri tome se razna protjecanja kod namatanja u istom smjeru potpomažu, odnosno zbrajaju. Kod suprotnog smjera namatanja oni se poništavaju, odnosno oduzimaju, što ovisi o pojedinačnim vrijednostima protjecanja svakog namota. U tome leži prava mogućnost mijenjanja istosmjernog stroja. Krivulja magnetiziranja je osnovna karakteristika istosmjernog stroja.

Krivulja magnetiziranja je jednako definirana za sve vrste istosmjernih strojeva, kao i funkcionalna ovisnost magnetskog toka o ukupnom uzbudnom protjecanju $\Phi_{gl} = f(\Theta)$, što je i prikazano na slici 5.12.



Slika 5.12: Karakteristika magnetiziranja i praznog hoda [Izvor: Autorski rad]

Kako možemo vidjeti na karakteristici magnetiziranja, jedna se karakteristika poklapa s karakteristikom praznoga hoda ($E_0(\Theta)$) kod brzine $n_0 = \text{konstanta}$.

Istosmjerni strojevi s različitim uzбудama pokazuju različita svojstva, odnosno imaju drugačije vanjske karakteristike. Pod vanjskim karakteristikama istosmjernog generatora podrazumijeva se ovisnost napona stezaljki U i struje tereta I_r , uz konstantnu brzinu vrtnje. Vanjska karakteristika istosmjernog motora naziva se ovisnost momenta motora M i brzine vrtnje n , uz konstantan napon na stezaljkama motora. Istosmjerne strojeve tako možemo podijeliti upravo prema načinu spajanja uzbudnog namota. Osnovne vrste uzbudnog namota su:

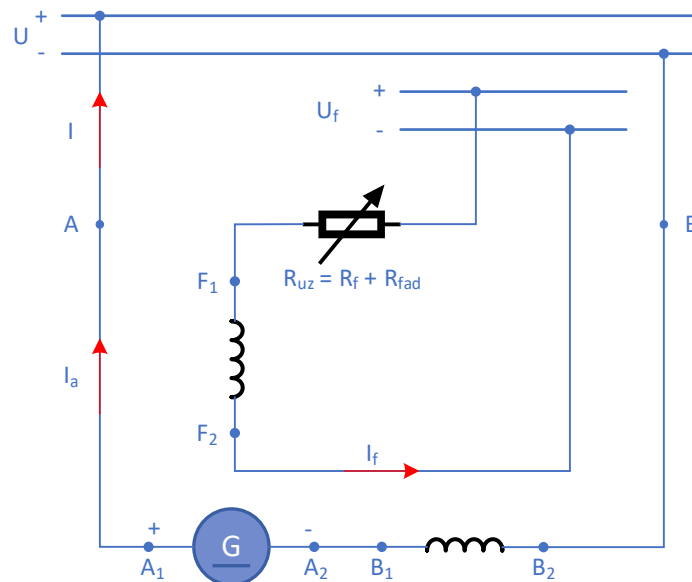
- Nezavisna uzbuđa – kad stroj ima uzbudni namot spojen na nezavisni vanjski izvor napajanja. Iznos uzbudne struje može se podešavati otpornikom u krugu uzbuđe.
- Paralelna uzbuđa – kad stroj ima uzbudni namot spojen paralelno armaturnom namotu. Uzbuđna struja se može podešavati otpornikom u krugu uzbuđe.

- Serijska uzbuda – kad stroj ima uzбудni namot spojen serijski s armaturnim namotom. Uzbudna struja je određena strujom armature i ne može se nezavisno podešavati.
- Složena uzbuda – kad stroj ima uzбудni namot kombinacije serijskog i paralelnog uzbudnog namota ili serijskog i nezavisnog uzbudnog namota.

Udio pojedinih namota u ukupnoj uzbudi određuje se na osnovi zahtijevanih vanjskih karakteristika. Takvi se strojevi nazivaju kompaundirani ili složeni uzbuđeni strojevi.

5.4.2. Nezavisno uzbuđeni generator

Konstruktivna shema spoja nezavisno uzbuđenog generatora je prikazana na slici 5.13.



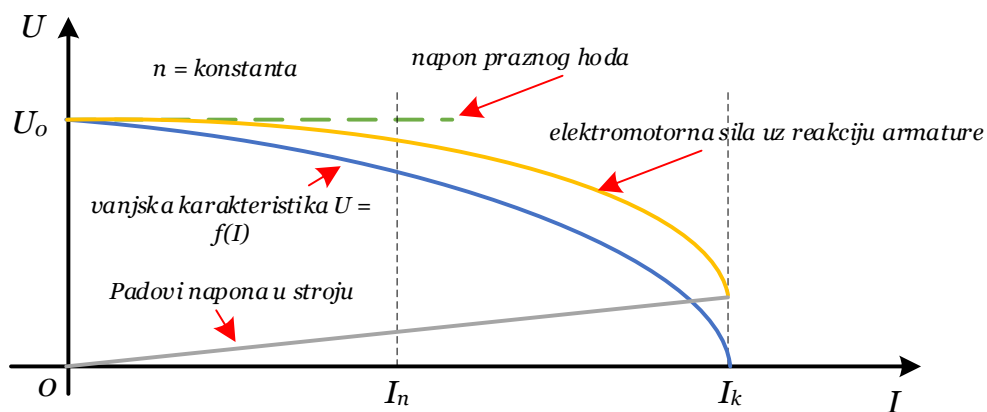
Slika 5.13: Nezavisno uzbuđeni generator [Izvor: Autorski rad]

Iz posebnog izvora U_f preko promjenjivog otpornika, napaja se uzбудni namot oznake $F1$ i $F2$. Struja se podešava promjenjivim otpornikom koji je spojen serijski s uzbudnim namotom. Napon uzbude U_f ne mora biti jednak naponu generatora U . Struja generatora je i struja armature $I = I_a$, dok kroz uzбудni namot teče struja uzbude I_f . Uzbudna struja je određena uzbudnim naponom U_f i ukupnim otporom u uzbudnom krugu $R_f + R_{fad}$.

$$I_f = \frac{U_f}{R_f + R_{fad}}$$

Jednadžba 5.3: Uzbudna struja kruga

Magnetski tok Φ i elektromotorna sila su ovisni o uzbuđnoj struji I_f prema karakteristici magnetiziranja i praznoga hoda te vanjskoj karakteristici, kako je prikazano na slici 5.14.



Slika 5.14: Vanjska karakteristika nezavisno uzbuđenog generatora [Izvor: Autorski rad]

Bez opterećenja na stezaljkama je napon praznog hoda U_0 , dok se pri opterećenju U nešto smanji zbog reakcije. Zbog protunapona na otporima u armaturnom krugu, na stezaljkama se napon U još smanji. Možemo vidjeti da je uslijed opterećenja napon na stezaljkama manji od napona u praznom hodu. Protunapone u armaturnom krugu određuju:

- otpor armature
- otpor četkica
- otpor ostalih namota vezanih u seriju s armaturnim namotom.

Ukupni protunapon u stroju ΔU za stroj s pomoćnim polovima može izraziti jednadžbom:

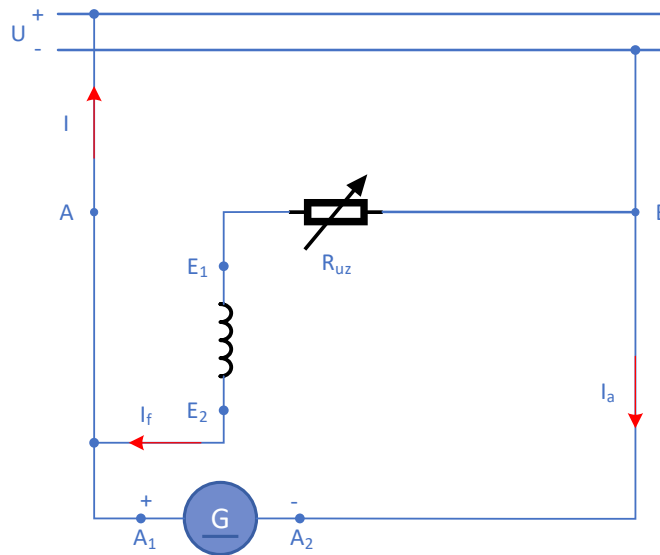
$$\Delta U = I_a * (R_a + R_p) + U_b$$

Jednadžba 5.4: Ukupni protunapon u stroju

Može se uzeti u obzir i otpor namota pomoćnih polova R_p , uz otpor armature, ako ih stroj ima.

5.4.3. Paralelno uzbuđeni generator

Konstruktivna shema spoja paralelno uzbuđenog generatora je prikazana na slici 5.15.

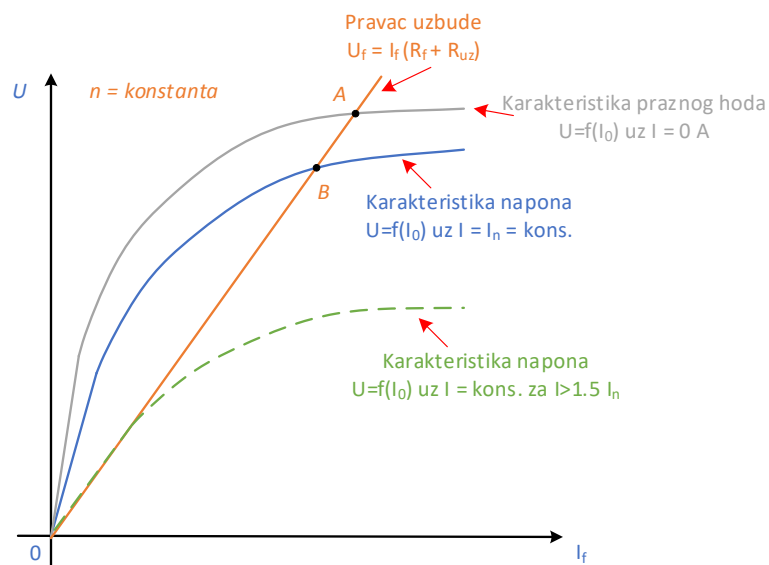


Slika 5.15: Paralelno uzbuđeni generator [Izvor: Autorski rad]

Uzbuđni namot, označen stezaljkama E_1 i E_2 priključen je paralelno na stezaljke armaturnog namota koje imaju oznaku A_1 i A_2 pa je uzbuđno protjecanje razmjerno naponu koji proizvodi generator. Uzbuđni napon U_f jednak je naponu generatoru U . Struja generatora je umanjena za iznos struje uzbuđne koje prolazi kroz uzbuđni namot.

$$I = I_a - I_f$$

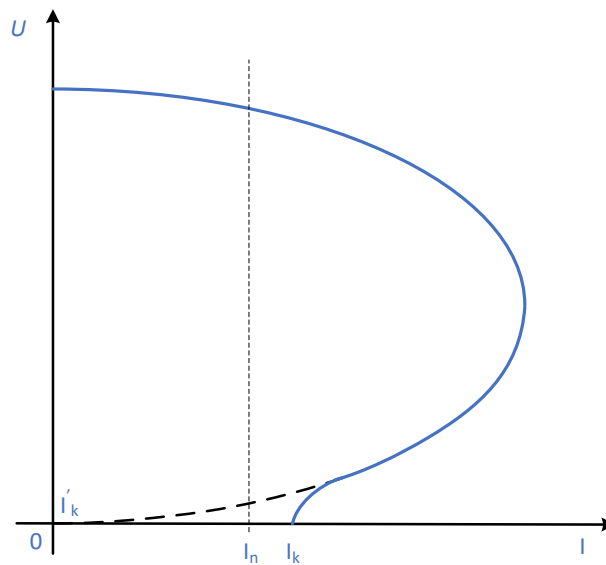
Karakteristika napona u ovisnosti o uzbuđnoj struji prikazana je na slici 5.15.



Slika 5.16: Karakteristike napona u ovisnosti o uzbuđnoj struji paralelno uzbuđenog generatora [Izvor: Autorski rad]

Napon remanencije potjera struju u uzбудnom krugu. Uzbudna struja je određena pravcem samouzbuđivanja, a uslijed nje se postepeno uzbudi generator do ravnotežne točke, ovisno o pogonskom stanju. Prvo uzbuđivanje se postiže vanjskim izvorom malog napona tako da se taj izvor kratkotrajno priključi na stezaljke uzbudnog namota. Time se potakne proces samouzbuđivanja.

U praznom hodu radnu točku određuje sjecište pravca samouzbuđivanja i karakteristike praznog hoda. To je točka *A* na karakteristici sa slike 5.16. Uz opterećenje dobijemo karakteristiku napona koja leži ispod karakteristika praznoga hoda. Radnu točku tada određuje sjecište te krivulje napona i pravca samouzbuđivanja. To je točka *B* na karakteristici sa slike 5.16.

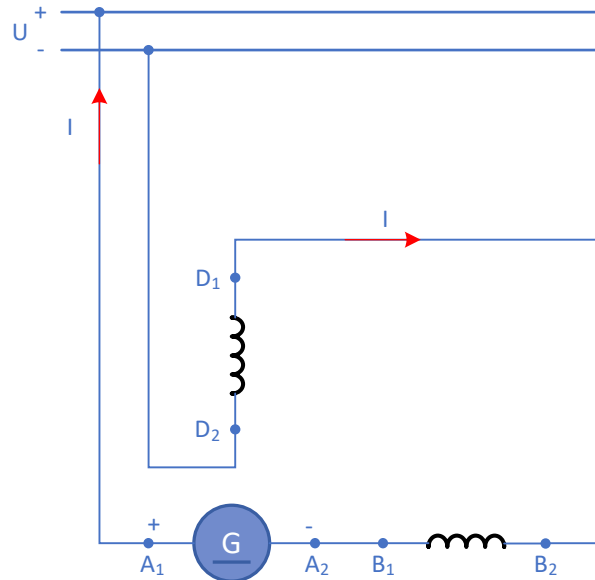


Slika 5.17: Vanjska karakteristika paralelnog generatora [Izvor: Autorski rad]

Pri opterećenju će napon pasti više nego kod nezavisno uzbuđenog generatora. Osim zbog padova napona u generatoru, izlazni napon se smanji i zbog smanjene uzbudne struje. Ako struju povećamo, napon će se naglo rušiti u jednom trenutku. To se događa u trenutku kada se linearni dio krivulje napona poklopi s pravcem samouzbuđivanja. Struja kratkog spoja bi teoretski trebala biti nula. Teoretska struja kratkog spoja je označena s I'_k na slici 5.17. Međutim, i bez struje uzbuđivanja imamo nekakav napon remanencije pa stvarna struja kratkog spoja I_k ima neku vrijednost.

5.4.4. Serijski uzbuđeni (serijski) generator

Osnovni spoj serijskog uzbuđenog generatora prikazan je na slici 5.18.



Slika 5.18: Serijski uzbuđeni generator [Izvor: Autorski rad]

Uzbuđni namot na glavnim polovima spojen je u seriju s namotom armature i namotima pomoćnih polova. Ukupan otpor serijskog generatora, bez prijelaznog otpora četkica, jednak je zbroju unutarnjeg otpora R_u i uzbuđenog otpora R_m . Struja kroz armaturni namot ujedno je i struja uzbuđenja, isto tako je i struja tereta $I_o = I_u = I$.

Uvjeti uzbuđivanja serijskog generatora slični su onima kod paralelnog generatora. Razlika je što je kod paralelnog generatora uzbuđna struja bila ovisna o naponu generatora U , na koji je bio priključen uzbuđni namot. Kod serijskog generatora ovisi o induciranoj ems E , kao posljedica rezultantnog magnetskog toka. Elektromotorna sila E protjera u glavni strujni krug struju I , koja ovisi o ukupnom otporu strujnog kruga:

$$R_s = R_u + R_m + R_t$$

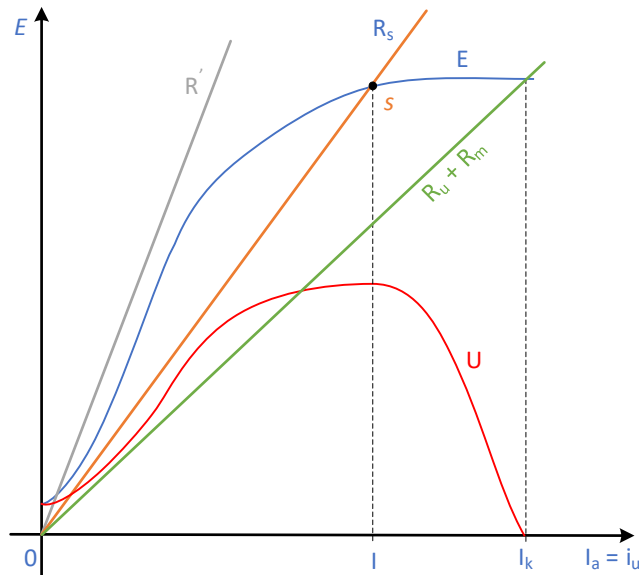
Jednadžba 5.5: Ukupni otpor strujnog kruga

Gdje je R_t – otpor tereta. Pošto je glavni strujni krug ujedno i uzbuđni krug, ukupni otpor u strujnom krugu R_s će određivati pravac samouzbuđenja, a radna točka sjecištem karakteristike $E(I)$ i pravac samouzbuđenja, jer vrijedi:

$$E = I * (R_u + R_m + R_t) = I * R_s$$

Jednadžba 5.6: Samouzbuđenja

Ako se u namotu armature serijskog generatora induciraju ems E i padovi napona unutar samog stroja, dobije se napon na stezaljkama generatora. Na slici 5.19 je prikazana vanjska karakteristika serijskog generatora.



Slika 5.19: Vanjska karakteristika serijskog generatora [Izvor: Autorski rad]

Točka s predstavlja promjenu smjera uzbude s većim teretom. Kod serijskog generatora imamo dva nedostatka. Prvi nedostatak je što se pri promjeni struje I mijenja napon između nule i maksimalne vrijednosti. Drugi nedostatak je što se serijski motor ne može opteretiti s malim teretom. Kako bi došlo do uzbude generatora, strmina otpora $R_t = R_u + R_m$ treba biti manja od nagiba funkcije $E(I)$. Kod većeg iznosa otpora tereta, na karakteristici to predstavlja pravac R' , serijski generator se neće uzbuditi. Iz tih razloga se, osim u specijalne svrhe, serijski generatori ne upotrebljavaju.

5.4.5. Složeno uzbuđeni (kompaundirani) generator

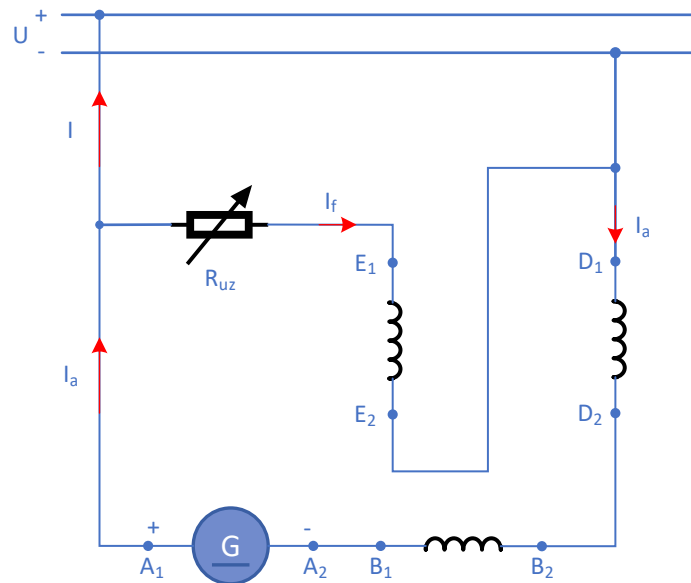
Složeni uzbuđeni generator ili kompaundirani generator ima jednu od navedenih uzbuda:

- serijsku i paralelnu uzbudu
- serijsku i nezavisnu uzbudu.

Serijski uzbudni namot može biti spojen tako da:

- potpomaže paralelnu uzbudu (kompaundirani generator)
- protivi se paralelnoj uzbudi (protukompaundirani generator).

Osnovni spoj kompaundiranog generatora prikazan je na slici 5.20.



Slika 5.20: Kompaundirani generator s pomoćnim polovima [Izvor: Autorski rad]

Kroz serijski uzbudni namot u oba slučaja teče struja armature I_a , dok kroz namot paralelne ili nezavisne uzbuđuje teče struja I_f . Kod kompaundiranog generatora s paralelnom uzbuđdom ukupna struja je ista kao i kod paralelnog generatora:

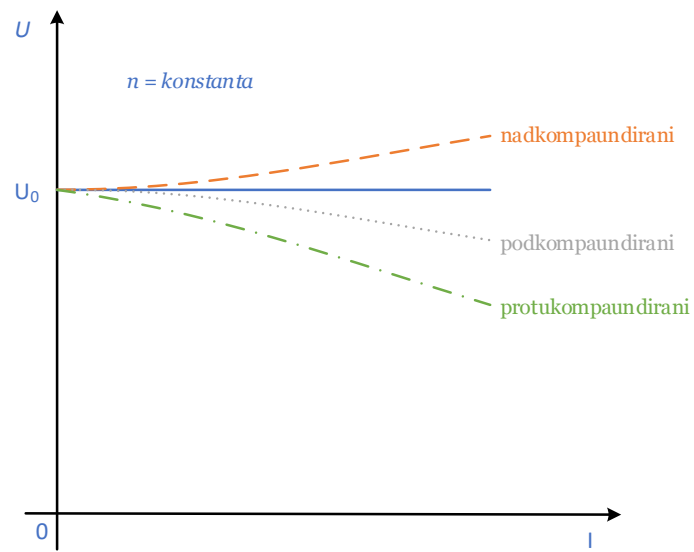
$$I = I_a - I_f$$

Jednadžba 5.7: Ukupna struja kompaundnog generatora

Ako kompaundirani generator ima nezavisnu uzbuđdu, struja I je kao i kod nezavisno uzbuđdenog generatora, odnosno $I = I_a$.

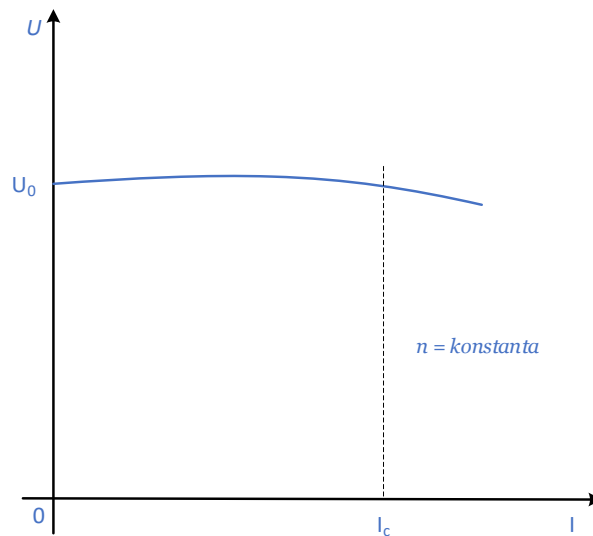
Vanjske karakteristike razlikuju se za četiri stanja kompaundiranog stroja, kako je prikazano i na slici 5.21.

- Potpuno kompaundirani generator ima konstantan napon. Serijska uzbuđda je tako podešena da pokriva gubitak napona zbog reakcije armature i padova napona u stroju
- Nadkompaundirani generator – utjecaj serijske uzbuđde je jači od gubitaka napona, napon raste s povećanjem tereta.
- Podkompaundirani generator – serijska uzbuđda ne kompenzira sve gubitke napona zbog opterećenja.
- Protukompaundirani generator ima vrlo mekanu vanjsku karakteristiku.



Slika 5.21: Vanjske karakteristike kompaundiranih generatora [Izvor: Autorski rad]

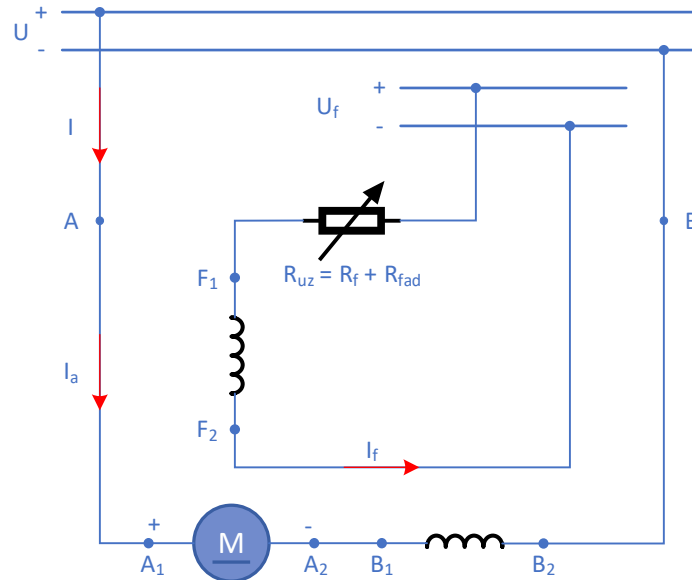
Uobičajena vanjska karakteristika kompaundiranog generatora je prikazana na slici 5.22.



Slika 5.22: Uobičajena karakteristika kompaundiranog generatora [Izvor: Autorski rad]

5.4.6. Nezavisno uzbuđeni motor

Osnovni spoj nezavisno uzbuđenog motora prikazan je na slici 5.23.



Slika 5.23: Nezavisno uzbuđeni motor s pomoćnim polovima [Izvor: Autorski rad]

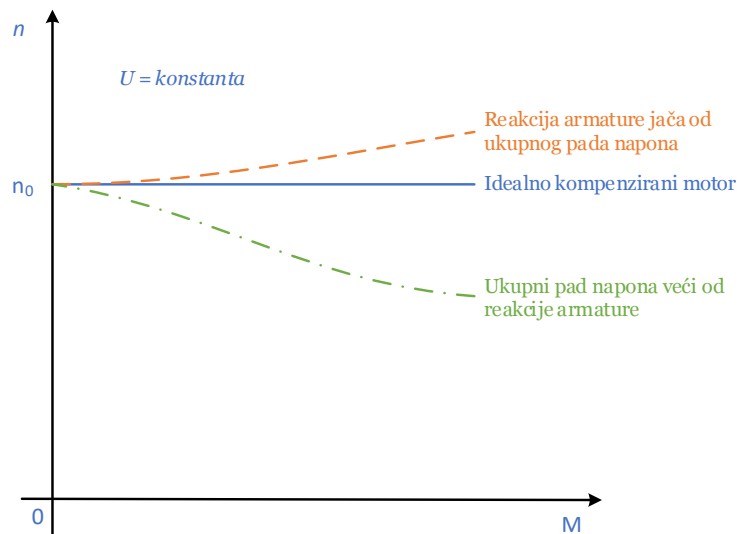
Kod nezavisno uzbuđenog motora uzbudna struja je određena uzbudnim naponom i ukupnim otporom u uzbudnom krugu.

$$I = \frac{U_f}{R_f + R_{fad}}$$

Jednadžba 5.8: Uzbudna struja kod nezavisnog motora

Struja I koju motor uzima iz mreže je struja armature I_a : $I = I_a$

Kod motora je najvažnija vanjska karakteristika, koja je prikazana na slici 5.24. To je funkcija $n = f(M)$.



Slika 5.24: Vanjska karakteristika nezavisno uzbuđenog motora [Izvor: Autorski rad]

Moment stroja M je proporcionalan magnetskom toku Φ i struji armature I_a koja je jednaka struji I :

$$M = k_t * \Phi * I$$

Jednadžba 5.9: Moment stroja

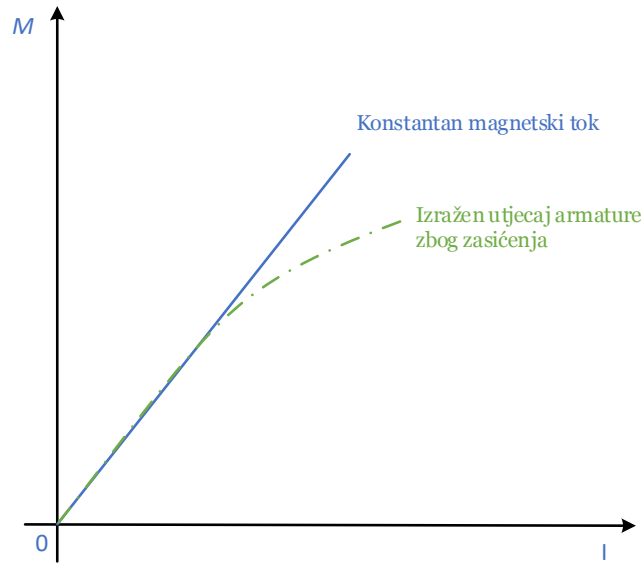
Magnetski tok Φ je konstantan uz konstantnu uzbudnu struju I_f , moment M ovisi samo o struji motora I , a ne o brzini vrtnje n . Motor zadržava konstantni broj okretaja bez obzira na moment. Struja armature $I_a = I$ je proporcionalna momentu.

$$I = \frac{M}{k_t * \Phi}$$

Jednadžba 5.10: Struja motora

Idealno kompenzirani motor ima konstantnu brzinu vrtnje i karakteristika momenta je stabilna. Ako je ukupni pad napona veći od reakcije armature, s porastom momenta M brzina vrtnje n opada i zbog toga je karakteristika momenta također stabilna. Ako je reakcija armature jača od ukupnog pada napona, karakteristika je nestabilna jer s porastom momenta M raste brzina vrtnje n .

Uz vanjsku karakteristiku često se daje i karakteristika momenta u ovisnosti o struji $M = f(I)$. Uz konstantan magnetski tok dobili smo pravac. Međutim, s povećanjem struje magnetski tok opada zbog reakcije armature, odnosno dolazi do zasićenja armature te je stvarna karakteristika nešto svinuta, što je prikazano na slici 5.25.



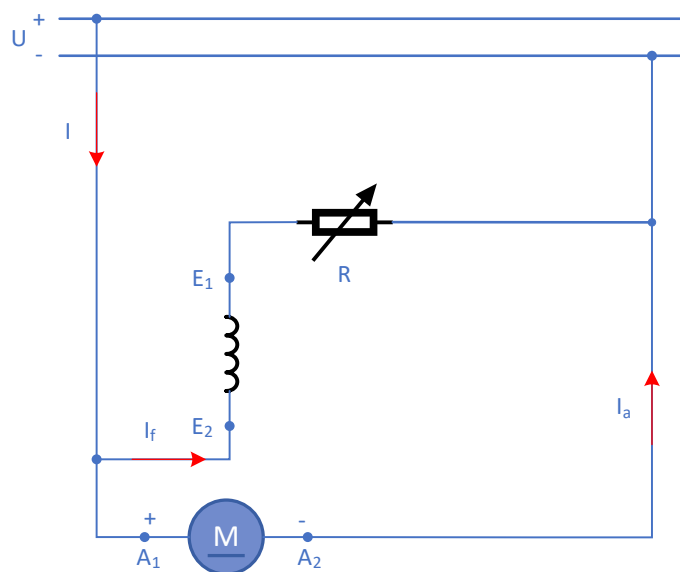
Slika 5.25: Karakteristika momenta nezavisno uzbuđenog motora [Izvor: Autorski rad]

5.4.7. Paralelno uzbuđeni motor

Paralelni motor, kao i generator, dobio je ime zbog toga što mu je uzbudni namot spojen paralelno s armaturnim namotom. Osnovni spoj paralelnog motora prikazan je na slici 5.26. Narinuti napon U na motoru, drži ravnotežu ems u rotoru E_0 i pad napona u armaturi. Zbog toga vrijedi:

$$U = E_a + I_a * R_a$$

Jednadžba 5.11: Narinuti napon na motoru



Slika 5.26: Paralelno uzbuđeni motor [Izvor: Autorski rad]

Za motorski pogon uvijek se pretpostavlja da je mreža kruta. Tada su karakteristike paralelnog motora jednake karakteristikama nezavisnog motora. Jedino je struja I koju motor uzima iz mreže drukčija i jednaka zbroju armature I_a i uzbudne struje I_f .

Kad bi paralelni motor uključili na mrežu napona U direktno preko obične sklopke, u trenutku pokretanja struja bi bila vrlo velika. Inducirana ems ovisna je o veličini magnetskog toka i o broju okretaja vrtnje. Kako je u trenutku priključenja na mrežu napona U brzina vrtnje jednaka nuli, to će inducirati elektromotornu silu koja će biti nula, pa će struja kroz armaturu biti:

$$I_{ap} = \frac{U}{R_a}$$

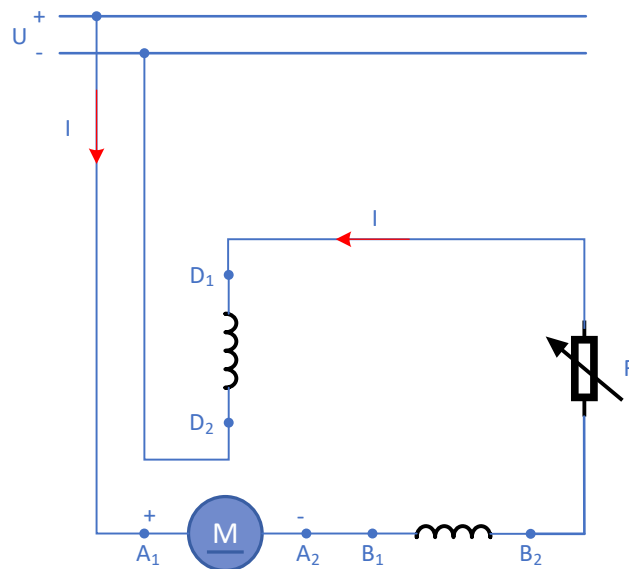
Jednadžba 5.12: Armaturna struja

Kako je otpor armature vrlo malen, struja pokretanja bila bi vrlo velika i može imati i do deset puta veću vrijednost od nazivne struje. Takva bi struja djelovala na zagrijavanje namota motora i izazivala bi jako iskrenje na kolektoru. To bi moglo pod nepovoljnim uvjetima prerasti u tzv. vatru na kolektoru. Zbog toga se paralelni motor upušta pomoću posebnog upuštača. Za svojstva paralelno uzbuđenog istosmjernog motora može se reći:

- da se upuštanje izvodi posebno konstruiranim upuštačem
- da mu je brzina vrtnje malo promjenjiva s opterećenjem
- da mu moment raste s opterećenjem gotovo linearno
- da mu mehanička karakteristika osigurava stabilan rad u svim područjima opterećenjima.

5.4.8. Serijski uzbuđeni motor

Kod serijski uzbuđenog istosmjernog motora također koristimo upuštač iz istih razloga kao i kod paralelnog motora. Osnovni spoj paralelnog motora prikazan je na slici 5.27.



Slika 5.27: Serijski uzbuđeni motor [Izvor: Autorski rad]

Kod serijski uzbuđenog motora uzbudni motor je spojen u seriju s namotom armature. Struja I koju motor uzima iz mreže je ujedno i struja armature i isto tako i struja uzbude. Magnetski tok Φ više nije konstantan. Ovisi o uzbuđnoj struji $I_f = I$ koja se mijenja s teretom. Stoga kod serijskog motora na karakteristike utječe stupanj zasićenja magnetskog kruga stroja. Kod nezasićenog stroja magnetski tok je proporcionalan struji.

$$\Phi = k * I$$

Jednadžba 5.13: Magnetski tok kod nezasićenog stroja

Elektromotorna sila ovisi o opterećenju i o brzini vrtnje:

$$E = k_E * k_I * I * n = k_{EI} * I * n$$

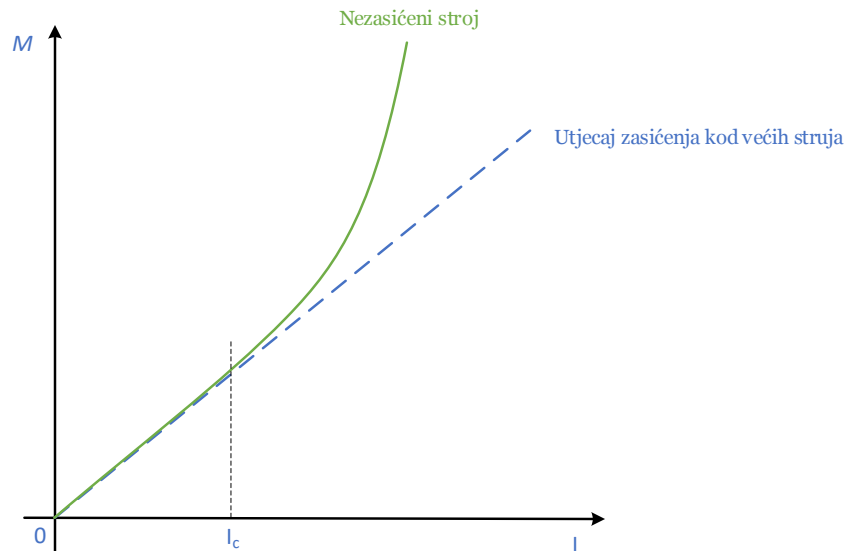
Jednadžba 5.14: Elektromotorna sila ovisna o opterećenju i brzini

Dok je moment nezasićenog motora:

$$M = k_T * \Phi * I = k_T * k_I * I^2 = k_{TI} * I^2$$

Jednadžba 5.15: Moment nezasićenog motora

Dobila se kvadratična ovisnost momenta o struji. Zbog nelinearnosti karakteristike magnetiziranja, nezasićeni stroj će kod većih struja prijeći u zasićenje. Kod zasićenog stroja magnet-ski tok je konstantan. Karakteristika momenta serijskog motora je prikazana na slici 5.28.



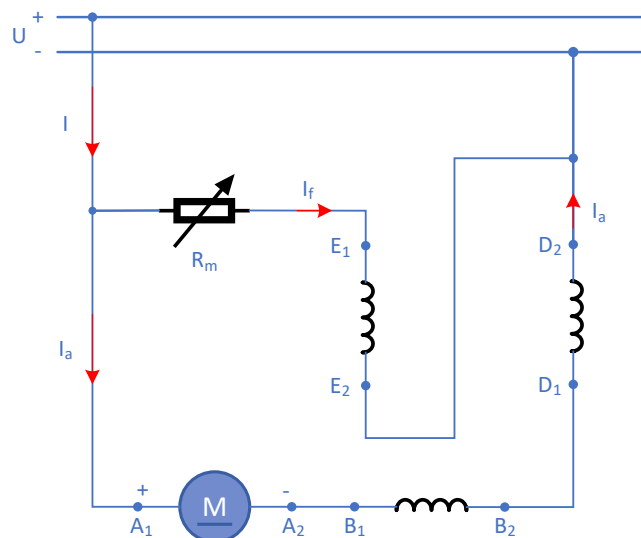
Slika 5.28: Karakteristike momenta serijskog motora [Izvor: Autorski rad]

5.4.9. Složeno uzbuđeni (kompaundirani) motor

Složeni uzbuđeni motor ili kompaundirani motor ima jednu od navedenih uzbuda:

- serijsku i paralelnu uzbudu
- serijsku i nezavisnu uzbudu.

Osnovni spoj kompaundiranog generatora prikazan je na slici 5.29.



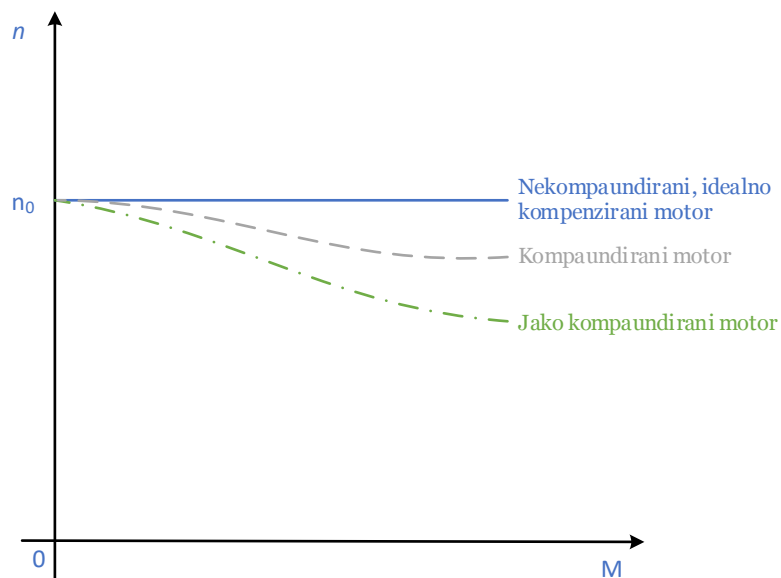
Slika 5.29: Kompaundirani motor s pomoćnim polovima [Izvor: Autorski rad]

Serijski uzбудni namot uvijek potpomaže djelovanje paralelne ili neovisne uzbude. Kroz namot paralelne ili neovisne uzbude teče struja uzbude I_f .

Kod kompaundiranog motora s paralelnom uzbudom struja I , koju motor uzima iz mreže, jednaka je prema izrazu:

Ako kompaundirani motor ima nezavisnu uzbudu, struja I je kao i kod nezavisno uzbuđenog motora jednaka armaturnoj struji. Ovisno o stupnju kompaundancije, vanjska će karakteristika biti slična serijskom ili paralelnom motoru.

Ako je stroj nekompandiran, odnosno nema serijskog namota, brzina vrtnje je konstantna kao i kod paralelnog i nezavisnog motora. Kod kompaundiranog motora ne dolazi do pobjega motora. Vanjska karakteristika kompaundiranog motora prikazana je na slici 5.30.



Slika 5.30: Vanjske karakteristike kompaundiranog motora [Izvor: Autorski rad]

5.5. Gubitci istosmjernog stroja

Sve gubitke koji nastaju u istosmjernom stroju za vrijeme njegova rada već smo upoznali kod izmjeničnih strojeva, osim gubitaka na kolektoru i gubitaka na četkicama, koji su specifični upravo za kolektorske strojeve.

Od mehaničkih gubitaka važni su gubitci u trenju i ventilaciji, te mehanički gubitci na kolektoru.

Gubitci u trenju i ventilaciji sastoje se od gubitaka u ležajevima, trenja rotirajućih dijelova i ventilacijskih gubitaka. Svi gubitci trenja i ventilacije zagrijavaju dijelove stroja, osim

ventilacijskih kinetičkih gubitaka koji se predaju okolini u obliku kinetičke energije čestica zraka. Ti su gubitci ovisni o brzini vrtnje i konstrukcijskim dijelovima stroja.

Mehanički gubitci na kolektoru P_{kmeH} nastaju radi trenja četkica o kolektor. Oni također zagrijavaju stroj. Obično su konstantni za konstantnu brzinu vrtnje.

Kod gubitaka u željezu P_{Fe} značajniji su gubitci u zubovima armature, u jarmu armature i površinski gubitci u glavnim polovima. Gubitci u željezu zuba armature isti su kao i kod izmjeničnih strojeva. Ovisi o kvaliteti i debljini lima armature, a proporcionalni su kvadratu maksimalne indukcije u zubu B_{zmax}^2 i približno frekvencije od $f^{1,3}$ gdje je f frekvencija. Oni su kod konstantnog napona, odnosno magnetskog toka, konstantni, ali pod uvjetom da je stroj kompenziran.

Gubitci u jarmu armature identični su kao i kod izmjeničnih strojeva. Ovisnost o frekvenciji i maksimalnoj indukciji je ista kao i kod gubitaka u zubovima. Kako reakcija armature ne povećava maksimalni iznos indukcije u jarmu, gubitci ne ovise o teretu ako su napon i brzina vrtnje stroja konstantni.

Dodatni gubitci u bakru armature nastaju uslijed potiskivanja struje. Uzrokuje ih izmjenični karakter struje u vodičima armature. Potiskivanje struje i povećani gubitci mogli bi se točno izračunati analizom krivulje struje koja će biti jednim dijelom konstantna, a jednim dijelom promjenjiva.

Električni gubitci na kolektoru su gubitci koji nastaju pri prolazu struje kroz prijelazni otpor četkica. Izračunavaju se pomoću prijelaznog otpora četkica ili pomoću poznate karakteristike pada napona na četkicama u ovisnosti o gustoći struje te se ti gubitci mogu izraziti:

$$P_{elč} = \Delta U_{\xi} * I$$

Jednadžba 5.16: Gubitci u četkicama

Gubitci uzbude paralelne ili nezavisne jednaki su umnošku napona i struje uzbude:

$$P_u = u_u * i_u$$

Jednadžba 5.17: Gubitci uzbude paralelne ili nezavisne

5.6. Snaga istosmjernog stroja i korisnost

Kada se govori o snazi stroja, onda se redovito misli na izlaznu snagu stroja, odnosno na snagu koju generator predaje u električnu mrežu

$$P_2 = U * I [W]$$

Jednadžba 5.18: Snaga generatora predane u mrežu

ili na snagu koju motor predaje pogonjenom stroju ili nekom radnom mehanizmu:

$$P_2 = 1,028 * M * n [W]$$

Jednadžba 5.19: Snaga motora uzeta iz mreže

Ulaznom snagom P_1 nazivamo snagu koju generator na osovini prima od pogonskog stroja. To može biti turbina u elektrani ili koju motor na ulaznim stezaljkama uzima iz mreže. Razlika ovih snaga $P_g = P_1 - P_2$ predstavlja gubitke u stroju, odnosno „uže“ gubitke stroja. Postoje dvije vrste gubitaka u stroju, tzv. „uže“ i „šire“. Uži gubitci su zapravo definirani, a širi gubitci su oni koji nisu opisani za stroj već nekim drugim putem. Korisnost stroja definira se omjerom predane i primljene snage.

$$\eta = \frac{P_2}{P_2 + P_g}$$

Jednadžba 5.20: Korisnost stroja

Također razlikujemo korisnost u „užem“ i „širem“ smislu. Za svaki stroj je važno da su mu gubitci što manji, odnosno da ima što veću korisnost. Kako se istosmjerni stroj jednake snage može graditi na više načina s većim gubitcima u bakru, a manjim gubitcima u željezu ili obrnuto, korisnost možemo određivati po povoljnijom metodi. Kao i kod ostalih strojeva, istosmjerni stroj se izrađuje tako da ima optimalnu korisnost u području opterećenja od 75 % do 100 % nominalne struje.

Pitanja za provjeru znanja

1. Navedi glavne dijelove istosmjernog stroja.
2. Koji dio istosmjernog stroja čini armatura, koji dio nosi magnetske polove s uzbudnim namotom te gdje je učvršćen kolektor?
3. Od kojih se materijala izrađuju stator i ležajni štitovi?
4. Objasni zašto su magnetski polovi učvršćeni na stator?
5. Zašto se ugrađuju pomoćni polovi, kompenzacijski i mješoviti namoti?
6. Napiši oznake stezaljki namota istosmjernog stroja.
7. Za koju vrstu opterećenja je pogodan neovisno uzbuđen generator?
8. Nacrtaj shemu serijskog generatora i objasni njegova pogonska svojstva.
9. Koje spojeve namota koristimo kod motora istosmjerne struje?
10. Koje su karakteristike paralelnog motora?

Popis elemenata korištenih u sadržaju

Slika 1.1: Magnetske silnice elektromagneta [Izvor: Autorski rad]	13
Slika 1.2: Oblik i određivanje smjera magnetskog polja ravnog vodiča [Izvor: Autorski rad]	13
Slika 1.3: Oblik i smjer magnetskog polja: a) zavoja, b) svitka protjecanog električnom strujom [Izvor: Autorski rad]	14
Slika 2.1: Magnetsko polje zavojnice [Izvor: Autorski rad]	18
Slika 2.2: Energetski transformator (Izvor: https://www.shutterstock.com/image-photo/three-phase-630-kva-corrugated-fin-1134674537)	19
Slika 2.3: Jezgra transformatora (Izvor: https://www.indiamart.com/proddetail/transformer-core-fixtue-14858240862.html , Autorski rad)	20
Slika 2.4: Tipovi jezgre jednofaznog transformatora a) jezgrasti - dvostupni, b) oklopljeni [Izvor: Autorski rad]	21
Slika 2.5: Tipovi jezgre trofaznog transformatora a) jezgrasti - trostupni, b) oklopljeni - 5-stupni [Izvor: Autorski rad]	21
Slika 2.6: Osnovna slika idealnog transformatora [Izvor: Autorski rad]	23
Slika 2.7: Prazni hod jednofaznog transformatora [Izvor: Autorski rad]	24
Slika 2.8: Vremenski dijagrami sinusoidnih veličina idealnog transformatora [Izvor: Autorski rad]	25
Slika 2.9: Opterećenje idealnog transformatora [Izvor: Autorski rad]	26
Slika 2.10: Fazorski dijagram opterećenja idealnog transformatora [Izvor: Autorski rad]	26
Slika 2.11: Nadomjesna shema transformatora u praznom hodu [Izvor: Autorski rad]	29
Slika 2.12: Fazorski dijagram transformatora u praznom hodu [Izvor: Autorski rad]	31
Slika 2.13: Nadomjesna shema transformatora u kratkom spoju [Izvor: Autorski rad]	31
Slika 2.14: Fazorski dijagram transformatora u kratkom spoju [Izvor: Autorski rad]	33
Slika 2.15: Nadomjesna shema pri realnom opterećenju [Izvor: Autorski rad]	34
Slika 2.16: Fazorski dijagram opterećenja realnog transformatora [Izvor: Autorski rad]	35
Slika 2.17: Krivulja korisnosti [Izvor: Autorski rad]	38
Slika 2.18: Američka izvedba transformatora [Izvor: Autorski rad]	39
Slika 2.19: Europska izvedba transformatora [Izvor: Autorski rad]	39
Slika 2.20: Osnovni spojevi trofaznih transformatora [Izvor: Autorski rad]	40
Slika 2.21: Određivanje odnosa faznih i linijskih napona [Izvor: Autorski rad]	41
Slika 2.22: Prikaz istovrsnih i raznovrsnih spojeva transformatora [Izvor: Autorski rad]	43
Slika 2.23: Paralelni rad dva transformatora [Izvor: Autorski rad]	43
Slika 3.1: Osnovni tipovi sinkronih strojeva: a) sinkroni stroj s neistaknutim polovima, b) sinkroni stroj s istaknutim polovima [Izvor: Autorski rad]	47
Slika 3.2: Segment statora [Izvor: Autorski rad]	48
Slika 3.3: Dvopolni turborotor [Izvor: https://motionelectric.com/ac-synchronous-machines/]	50
Slika 3.4: Sastavni dijelovi rotora s istaknutim polovima [Izvor: Autorski rad]	51
Slika 3.5: Dobivanje elektromagneta [Izvor: Autorski rad]	52
Slika 3.6: Magnetski tok dvopolnog turbogeneratora [Izvor: Autorski rad]	53
Slika 3.7: Magnetski tok hidrogeneratora [Izvor: Autorski rad]	53
Slika 3.8: Sinkroni stroj za tumačenje dobivanja inducirano napona [Izvor: Autorski rad]	54
Slika 3.9: Induciranje napona u jednom zavoju: a) induciranje pozitivnog poluvala, b) induciranje negativnog poluvala [Izvor: Autorski rad]	54
Slika 3.10: Inducirani napon sinusoidnog oblika [Izvor: Autorski rad]	55
Slika 3.11: Shema spoja pokusa praznog hoda generatora [Izvor: Autorski rad]	57

Slika 3.12: Karakteristika praznog hoda [Izvor: Autorski rad]	58
Slika 3.13: Shema spoja pokusa kratkog spoja sinkronog generatora [Izvor: Autorski rad]	60
Slika 3.14: Nadomjesna shema kratkog spoja sinkronog generatora [Izvor: Autorski rad]	61
Slika 3.15: Karakteristika praznog hoda i kratkog spoja [Izvor: Autorski rad]	61
Slika 3.16: Opterećenje sinkronog generatora [Izvor: Autorski rad]	63
Slika 3.17: Energetski dijagram sinkronog generatora [Izvor: Autorski rad]	64
Slika 3.18: Fazorsko - vektorski dijagram motora [Izvor: Autorski rad]	65
Slika 3.19: Fazorski dijagram opterećenog motora [Izvor: Autorski rad]	66
Slika 3.20: Ovisnost elektromagnetskog momenta (M) o kutu opterećenja [Izvor: Autorski rad]	67
Slika 3.21: Radne karakteristike sinkronog motora [Izvor: Autorski rad]	67
Slika 3.22: Sinkronizacija - tamni spoj [Izvor: Autorski rad]	69
Slika 3.23: Sinkronizacija - svijetli spoj [Izvor: Autorski rad]	70
Slika 4.1: Asinkroni motor [Izvor: https://www.shutterstock.com/image-illustration/blue-electric-engine-isolated-on-white-459215131]	74
Slika 4.2: Konstruktivni dijelovi asinkronog motora [Izvor: https://www.freepik.com/premium-photo/electric-motor-parts-structure-isolated-white-background_33994277.htm#query=induction%20motors&position=10&from_view=search&track=ais , autorski rad]	75
Slika 4.3: Stator asinkronog motora [Izvor: https://www.shutterstock.com/image-photo/stator-electric-motor-isolated-on-white-1147922336]	76
Slika 4.4: Rotorski paket limova [Izvor: https://www.shutterstock.com/image-photo/electric-motor-rotor-497171659]	77
Slika 4.5: Statorski namot u spoju zvijezda i trokut i spoj stezaljki u priključnoj kutiji [Izvor: Autorski rad]	78
Slika 4.6: Spojna shema kolutnih motora [Izvor: Autorski rad]	79
Slika 4.7: Djelovanje magnetskog polja statora na vodič rotora [Izvor: Autorski rad]	80
Slika 4.8: Grafički prikaz brzine [Izvor: Autorski rad]	83
Slika 4.9: Fazorsko-vektorski prikaz magnetskih tokova i struja i napon u sinkronom motoru [Izvor: Autorski rad]	86
Slika 4.10: Nadomjesna shema praznog hoda [Izvor: Autorski rad]	87
Slika 4.11: Fazorski dijagram za stanje praznog hoda [Izvor: Autorski rad]	87
Slika 4.12: Nadomjesna shema kratkog spoja [Izvor: Autorski rad]	88
Slika 4.13: Fazorski dijagram za stanje kratkog spoja [Izvor: Autorski rad]	88
Slika 4.14: Nadomjesna shema stacionarnog stanja [Izvor: Autorski rad]	89
Slika 4.15: Fazorski dijagram za opterećenje [Izvor: Autorski rad]	89
Slika 4.16: Momentna karakteristika asinkronog motora [Izvor: Autorski rad]	90
Slika 4.17: Momentna karakteristika jednofaznog asinkronog motora [Izvor: Autorski rad]	92
Slika 4.18: Pokretanje pomoću uključivanja djelatnog otpora i fazorski prikaz [Izvor: Autorski rad]	93
Slika 4.19: Pokretanje pomoću uključivanja induktivnog otpora i fazni prikaz [Izvor: Autorski rad]	93
Slika 4.20: Pokretanje pomoću uključivanja kapacitivnog otpora i fazni prikaz [Izvor: Autorski rad]	94
Slika 4.21: Grafički prikaz brzina u asinkronom generatoru [Izvor: Autorski rad]	95
Slika 4.22: Momentna karakteristika asinkronog motora za rad u generatorskom, motorskom i kočnom području [Izvor: Autorski rad]	95
Slika 5.1: Istosmjerni stroj [Izvor: https://www.shutterstock.com/image-photo/dc-motor-machine-isolated-on-white-267800240]	98
Slika 5.2: Rastavljeni istosmjerni stroj [Izvor: https://www.shutterstock.com/image-photo/electric-dc-motor-stator-rotor-plastic-2109041753]	99
Slika 5.3: Konstruktivni dijelovi istosmjernog stroja [Izvor: https://www.shutterstock.com/image-illustration/direct-current-motor-3d-rendering-isolated-2185345831]	99

Slika 5.4: Kućište istosmjernog stroja [Izvor: Autorski rad]	100
Slika 5.5: Glavni magnetski pol istosmjernog stroja [Izvor: Autorski rad]	101
Slika 5.6: Glavni magnetski pol od dinamo limova [Izvor: Autorski rad]	101
Slika 5.7: Rotorski paket istosmjernog stroja [Izvor: https://www.shutterstock.com/image-photo/electrical-armature-assembly-isolated-on-white-1440377432]	103
Slika 5.8: Komutator [Izvor: https://www.shutterstock.com/image-photo/commutator-385950718]	104
Slika 5.9: Raspored magnetske indukcije u zračnom rasporu i oblik induciranog napona u vodiču [Izvor: Autorski rad]	104
Slika 5.10: Dobivanje pulsirajućeg istosmjernog napona na četkicama [Izvor: https://www.shutterstock.com/image-vector/dc-generator-cross-diagram-illustration-simple-2158091041 , Autorski rad]	105
Slika 5.11: Princip rada istosmjernog motora [Izvor: https://www.shutterstock.com/image-vector/basics-direct-current-motordc-motor-vector-2378402299 , Autorski rad]	106
Slika 5.12: Karakteristika magnetiziranja i praznog hoda [Izvor: Autorski rad]	107
Slika 5.13: Nezavisno uzbuđeni generator [Izvor: Autorski rad]	108
Slika 5.14: Vanjska karakteristika nezavisno uzbuđenog generatora [Izvor: Autorski rad]	109
Slika 5.15: Paralelno uzbuđeni generator [Izvor: Autorski rad]	110
Slika 5.16: Karakteristike napona u ovisnosti o uzbudnoj struji paralelno uzbuđenog generatora [Izvor: Autorski rad]	110
Slika 5.17: Vanjska karakteristika paralelnog generatora [Izvor: Autorski rad]	111
Slika 5.18: Serijski uzbuđeni generator [Izvor: Autorski rad]	112
Slika 5.19: Vanjska karakteristika serijskog generatora [Izvor: Autorski rad]	113
Slika 5.20: Kompaundirani generator s pomoćnim polovima [Izvor: Autorski rad]	114
Slika 5.21: Vanjske karakteristike kompaundiranih generatora [Izvor: Autorski rad]	115
Slika 5.22: Uobičajena karakteristika kompaundiranog generatora [Izvor: Autorski rad]	115
Slika 5.23: Nezavisno uzbuđeni motor s pomoćnim polovima [Izvor: Autorski rad]	116
Slika 5.24: Vanjska karakteristika nezavisno uzbuđenog motora [Izvor: Autorski rad]	117
Slika 5.25: Karakteristika momenta nezavisno uzbuđenog motora [Izvor: Autorski rad]	118
Slika 5.26: Paralelno uzbuđeni motor [Izvor: Autorski rad]	118
Slika 5.27: Serijski uzbuđeni motor [Izvor: Autorski rad]	120
Slika 5.28: Karakteristike momenta serijskog motora [Izvor: Autorski rad]	121
Slika 5.29: Kompaundirani motor s pomoćnim polovima [Izvor: Autorski rad]	121
Slika 5.30: Vanjske karakteristike kompaundiranog motora [Izvor: Autorski rad]	122
Tablica 1.1: Strojevi pomoću kojih se obavlja pretvorba energije [Izvor: Autorski rad]	12
Tablica 2.1: Podjela izolacijskih materijala na toplinske klase [Izvor: Jureković, J. Električni strojevi. 2003]	22
Jednadžba 1.2: Jakost magnetskog polja	15
Jednadžba 2.1: Zakon elektromagnetske indukcije	25
Jednadžba 2.2	27
Jednadžba 2.3	27
Jednadžba 2.4	27

Jednadžba 2.5	27
Jednadžba 2.6	27
Jednadžba 2.7	27
Jednadžba 2.8	28
Jednadžba 2.9	28
Jednadžba 2.10	29
Jednadžba 2.11	29
Jednadžba 2.12	29
Jednadžba 2.13	30
Jednadžba 2.14	30
Jednadžba 2.15	30
Jednadžba 2.16	30
Jednadžba 2.17	30
Jednadžba 2.18	30
Jednadžba 2.19	32
Jednadžba 2.20	32
Jednadžba 2.21	32
Jednadžba 2.22	32
Jednadžba 2.23	33
Jednadžba 2.24	33
Jednadžba 2.25	33
Jednadžba 2.26	34
Jednadžba 2.27	34
Jednadžba 2.28	34
Jednadžba 2.29	37
Jednadžba 2.30	37
Jednadžba 2.31	37
Jednadžba 2.32	37
Jednadžba 2.33	41
Jednadžba 2.34	41
Jednadžba 3.1	56
Jednadžba 3.2	56
Jednadžba 3.3	57
Jednadžba 3.4	58
Jednadžba 3.5	59
Jednadžba 3.6	60
Jednadžba 3.7	64
Jednadžba 3.8	65
Jednadžba 3.9	66
Jednadžba 4.1	81
Jednadžba 4.2	81
Jednadžba 4.3	82
Jednadžba 4.4	82
Jednadžba 4.5	83
Jednadžba 4.6	83

Jednadžba 4.7	84
Jednadžba 4.8	84
Jednadžba 4.9	84
Jednadžba 4.10	84
Jednadžba 4.11	84
Jednadžba 4.12	85
Jednadžba 4.13	85
Jednadžba 4.14	85
Jednadžba 4.15	88
Jednadžba 4.16	91
Jednadžba 4.17	91
Jednadžba 4.18	94
Jednadžba 5.1: Elektromotorna sila (ems)	105
Jednadžba 5.2: Sila na vodiče	105
Jednadžba 5.3: Uzbudna struja kruga	109
Jednadžba 5.4: Ukupni protunapon u stroju	109
Jednadžba 5.5: Ukupni otpor strujnog kruga	112
Jednadžba 5.6: Samouzbuda	112
Jednadžba 5.7: Ukupna struja kompaudnog generatora	114
Jednadžba 5.8: Uzbudna struja kod nezavisnog motora	116
Jednadžba 5.9: Moment stroja	117
Jednadžba 5.10: Struja motora	117
Jednadžba 5.11: Narinuti napon na motoru	118
Jednadžba 5.12: Armaturna struja	119
Jednadžba 5.13: Magnetski tok kod nezasićenog stroja	120
Jednadžba 5.14: Elektromotorna sila ovisna o opterećenju i brzini	120
Jednadžba 5.15: Moment nezasićenog motora	120
Jednadžba 5.16: Gubitci u četkicama	123
Jednadžba 5.17: Gubitci uzbude paralelne ili nezavisne	123
Jednadžba 5.18: Snaga generatora predane u mrežu	124
Jednadžba 5.19: Snaga motora uzeta iz mreže	124
Jednadžba 5.20: Korisnost stroja	124

Popis literature

- 1 Bhag, S. Guru, Huseyin R. Hizigoglu. (2001). New York
- 2 Jureković, J. (2003). Električni strojevi.
- 3 Krčum, M. (2009). Električni strojevi II. Split. Sveučilišni studijski centar za stručne studije
- 4 Sahdev, S. K. (2018). Electrical Machines



EduSplit Obrtna tehnička škola
Regionalni centar kompetentnosti Split



Projekt je sufinancirala Europska unija iz Europskog socijalnog fonda.

Za više informacija o EU fondovima molimo pogledajte web-stranicu
Ministarstva regionalnoga razvoja i fondova Europske unije.
www.strukturnifondovi.hr