

# Pokretanje sinkronih motora

---

**Hrastović, Petar**

**Undergraduate thesis / Završni rad**

**2023**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **Josip Juraj Strossmayer University of Osijek, Faculty of Electrical Engineering, Computer Science and Information Technology Osijek / Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Fakultet elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija Osijek**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:200:641377>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-12-28**

*Repository / Repozitorij:*

[Faculty of Electrical Engineering, Computer Science and Information Technology Osijek](#)



**SVEUČILIŠTE JOSIPA JURJA STROSSMAYERA U OSIJEKU  
FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA I  
INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA OSIJEK**

**Stručni studij elektroenergetika**

**POKRETANJE SINKRONOG MOTORA**

**Završni rad**

**Petar Hrastović**

**Osijek, 2023**

**FERIT**FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA  
I INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA **OSIJEK****Obrazac Z1S: Obrazac za imenovanje Povjerenstva za završni ispit na preddiplomskom stručnom studiju**

Osijek, 16.09.2023.

Odboru za završne i diplomske ispite

**Imenovanje Povjerenstva za završni ispit  
na preddiplomskom stručnom studiju**

<b>Ime i prezime Pristupnika:</b>	Petar Hrastović
<b>Studij, smjer:</b>	Stručni prijediplomski studij Elektrotehnika, smjer Elektroenergetika
<b>Mat. br. Pristupnika, godina</b>	A 4640, 27.07.2020.
<b>OIB Pristupnika:</b>	72109157565
<b>Mentor:</b>	Doc. dr. sc. Venco Ćorluka
<b>Sumentor:</b>	,
<b>Sumentor iz tvrtke:</b>	
<b>Predsjednik Povjerenstva:</b>	dr. sc. Krešimir Miklošević
<b>Član Povjerenstva 1:</b>	Doc. dr. sc. Venco Ćorluka
<b>Član Povjerenstva 2:</b>	dr. sc. Željko Špoljarić
<b>Naslov završnog rada:</b>	Pokretanje sinkronih motora
<b>Znanstvena grana završnog rada:</b>	<b>Elektroenergetika (zn. polje elektrotehnika)</b>
<b>Zadatak završnog rada</b>	
<b>Prijedlog ocjene pismenog dijela ispita (završnog rada):</b>	Vrlo dobar (4)
<b>Kratko obrazloženje ocjene prema Kriterijima za ocjenjivanje završnih i diplomskih radova:</b>	Primjena znanja stečenih na fakultetu: 2 bod/boda Postignuti rezultati u odnosu na složenost zadatka: 2 bod/boda Jasnoća pismenog izražavanja: 3 bod/boda Razina samostalnosti: 2 razina
<b>Datum prijedloga ocjene od strane mentora:</b>	16.09.2023.
<i>Potvrda mentora o predaji konačne verzije rada:</i>	<i>Mentor elektronički potpisao predaju konačne verzije.</i>
	Datum:

**FERIT**FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA  
I INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA OSIJEK**IZJAVA O ORIGINALNOSTI RADA**

Osijek, 28.09.2023.

**Ime i prezime studenta:**

Petar Hrastović

**Studij:**

Stručni prijediplomski studij Elektrotehnika, smjer Elektroenergetika

**Mat. br. studenta, godina upisa:**

A 4640, 27.07.2020.

**Turnitin podudaranje [%]:**

4

Ovom izjavom izjavljujem da je rad pod nazivom: **Pokretanje sinkronih motora**

izrađen pod vodstvom mentora Doc. dr. sc. Venco Ćorluka

i sumentora ,

moj vlastiti rad i prema mom najboljem znanju ne sadrži prethodno objavljene ili neobjavljene pisane materijale drugih osoba, osim onih koji su izričito priznati navođenjem literature i drugih izvora informacija. Izjavljujem da je intelektualni sadržaj navedenog rada proizvod mog vlastitog rada, osim u onom dijelu za koji mi je bila potrebna pomoć mentora, sumentora i drugih osoba, a što je izričito navedeno u radu.

Potpis studenta:

# SADRŽAJ

<b>1. UVOD</b> .....	<b>1</b>
<b>1.1. Zadatak završnog rada</b> .....	<b>1</b>
<b>2. PRINCIP RADA SINKRONIH MOTORA</b> .....	<b>2</b>
<b>2.1. OSNOVNI PRINCIP RADA SINKRONOG MOTORA</b> .....	<b>2</b>
2.1.1. EKVIVALENTNI KRUG SINKRONOG MOTORA .....	3
2.1.2. SINKRONI MOTOR IZ PERSPEKTIVE MAGNETSKOG POLJA .....	4
<b>2.2. RAD SINKRONOG MOTORA U STABILNOM STANJU</b> .....	<b>7</b>
2.2.1. KRIVULJA MOMENTA I BRZINE VRTNJE SINKRONIH MOTORA .....	7
2.2.2. UTJECAJ PROMJENE OPTEREĆENJA NA SINKRONI MOTOR .....	8
2.2.3. UTJECAJ PROMJENE STRUJE MAGNETIZIRANJA NA RAD MOTORA .....	10
2.2.4. KOREKCIJA FAKTORA SNAGE KOD SINKRONOG MOTORA .....	12
2.2.5. SINKRONI KONDENZATOR .....	14
<b>3. POKRETANJE SINKRONIH MOTORA</b> .....	<b>16</b>
<b>3.1. POKRETANJE MOTORA SMANJENJEM FREKVENCije</b> .....	<b>18</b>
<b>3.2. POKRETANJE SINKRONOG MOTORA POMOĆNIM MOTOROM</b> .....	<b>19</b>
<b>3.3. POKRETANJE POMOĆU PRIGUŠNOG NAMOTA (ASINKRONI ZALET)</b> .....	<b>20</b>
3.3.1. UTJECAJ PRIGUŠNIH NAMOTA NA STABILNOST MOTORA .....	24
<b>ZAKLJUČAK</b> .....	<b>27</b>
<b>LITERATURA</b> .....	<b>27</b>
<b>SAŽETAK</b> .....	<b>28</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>29</b>
<b>ŽIVOTOPIS</b> .....	<b>30</b>

# 1. UVOD

Sinkroni motori su električni strojevi razvijeni zbog potreba ostvarenja precizne i stabilne rotacije. Povijest sinkronih motora poseže u ranu fazu električnih strojeva, kada su u 19. stoljeću jedni od najvećih svjetskih izumitelja u području elektrotehnike, Nikola Tesla i Galileo Ferraris, istraživali mogućnosti rotacijskih električnih strojeva. Prvi korak ka razvoju sinkronog motora povukao je Tesla pronalazeći okretno magnetsko polje. Nakon Tesle, Galileo Ferraris, također je odigrao ključnu ulogu u razvoju ovog stroja. Galileo je 1885. godine prvi objavio rad u kojem je objasnio načela rada sinkronih motora. Galileo je uočio važnost okretnog magnetskog polja u sinkronom motoru te dao najvažnije principe koji su kasnije poslužili kao temelj za daljnji razvoj sinkronih motora. U narednom periodu, nakon daljnjeg razvoja sinkronih motora, postali su sve više popularni te su se koristili u različitim industrijama, kao što je energetika, prijevoz i ostali sektori gdje je potrebna precizna i stabilna rotacija. Daljnji tehnološki napredak doveo je do poboljšanja dizajna i povećanja učinkovitosti sinkronih motora te su oni danas široko rasprostranjeni.

U ovom završnom radu istražit će se problemi pokretanja sinkronih motora. Prilikom pokretanja sinkronih motora javljaju se problemi koji mogu utjecati na njihove performanse, stabilnost i izdržljivost odnosno trajnost. Jedan od glavnih problema prilikom pokretanja je veliki početni moment. Za razliku od asinkronih koji proizvode moment već pri pokretanju, sinkroni motori zahtijevaju vanjski izvor za pokretanje. Drugi problem koji se javlja prilikom pokretanja sinkronih motora je održavanje sinkronizacije između magnetskog polja i okretno brzine. Promjene u opterećenju ili nestabilnost mreže mogu također dovesti do gubitka sinkronizacije i oscilacija u radu motora.

## 1.1. Zadatak završnog rada

Zadatak završnog rada bit će nam objasniti načelo rada sinkronih motora te matematički opis istih, ukazati na probleme pri pokretanju sinkronih motora te navesti vrste i načine pokretanja, provesti eksperimente kako bi se potvrdila učinkovitost predloženih metoda za pokretanje sinkronih motora.

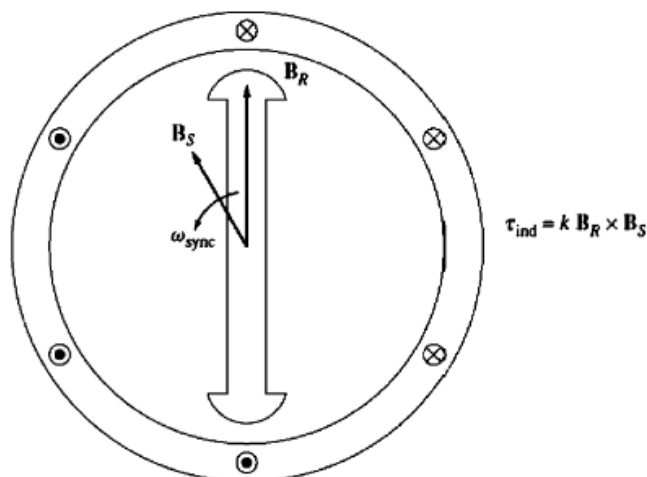
## 2. PRINCIP RADA SINKRONIH MOTORA

Sinkroni motori su sinkroni strojevi koji se koriste kako bi pretvorili električnu ulaznu snagu u izlaznu mehaničku snagu. U ovom poglavlju prikazat ćemo osnove rada sinkronog motora i povezati njihovo ponašanje sa sinkronim generatorom.

### 2.1. OSNOVNI PRINCIP RADA SINKRONOG MOTORA

Kako bi shvatili osnovni koncept sinkronog motora, potrebno je pogledati sliku 2.1, koja prikazuje dvopolni sinkroni motor. Struja magnetiziranja  $I_F$  kod sinkronog motora proizvodi stabilno magnetsko polje  $B_R$ . Trofazni izmjenični napon je doveden na statorski namot sinkronog motora, koji stvara trofaznu izmjeničnu struju kroz namotaje statora. Trofazna izmjenična struja u armaturnom namotu stvara okretno magnetsko polje  $B_S$ , shodno tome, postoje dva magnetska polja prisutna u stroju, a polje rotora će se poravnati s poljem statora, baš kao što će se dva magneta za šipke poredati ako se postave blizu jedan drugom. Budući da se magnetsko polje statora okreće, magnetsko polje rotora (i sam rotor) će ga stalno pokušati stizati. Što je veći kut između ova dva magnetska polja (do određenog limita), to je veći okretni moment na rotoru sinkronog motora. Osnovni princip sinkronog rada motora je da rotor pokušava „uloviti“ rotirajuće magnetsko polje statora u krugu, iako nikada ne uspijeva [1].

Budući da je sinkroni motor stroj istih fizičkih karakteristika kao i sinkroni generator, sve osnovne jednačbe brzine, snage i okretnog momenta vrijede i kod sinkronih motora.



Slika 2.1: Dvopolni sinkroni motor [1]

### 2.1.1. EKVIVALENTNI KRUG SINKRONOG MOTORA

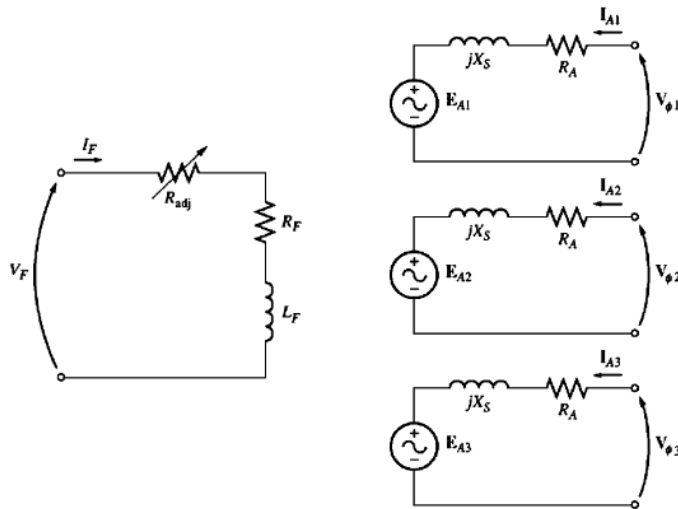
Sinkroni motor je u svakom pogledu jednak kao sinkroni generator, jedina razlika je u tome što je smjer toka snage suprotan. Budući da je smjer toka snage u motoru obrnut, smjer toka struje u statorskom namotu motora bi također trebao biti suprotan. Shodno tome, ekvivalentni krug sinkronog motora je potpuno isti kao ekvivalentni krug sinkronog generatora, osim što je referentni smjer struje  $I_A$  suprotan. Rezultirajući ekvivalentni krug je prikazan na slici 2.2a, a ekvivalentni krug po fazi prikazan je slikom 2.2b. Kao i prije, tri faze ekvivalentnog kruga mogu biti spojene u zvijezdu ili trokut. Zbog promjene smjera struje  $I_A$ , Kirchhoffov zakon za napone za ekvivalentni krug se također mijenja [1]. Iz Kirchhoffove jednadžbe za napone dobivamo sljedeći izraz [1]:

$$V_\phi = E_A + jX_S I_A + R_A I_A \quad 2-1$$

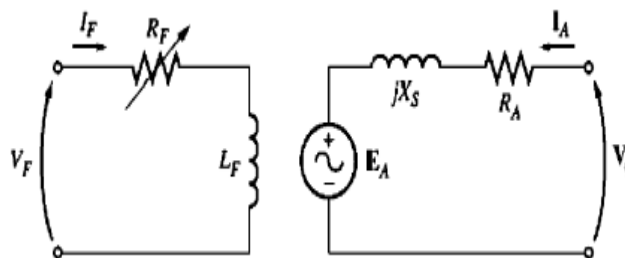
ili

$$E_A = V_\phi - jX_S I_A - R_A I_A \quad 2-2$$

Ovaj izraz je potpuno jednak izrazu za generator, osim što je predznak koji predstavlja smjer struje suprotan.



Slika 2.2a: Ekvivalentni krug trofaznog sinkronog motora [1]

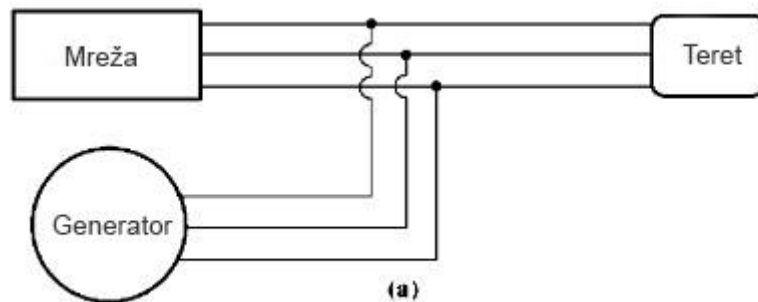


Slika 2.2b: Ekvivalentni krug sinkronog motora po svakoj fazi [1]



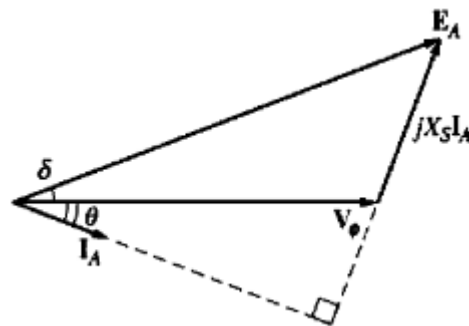
### 2.1.2. SINKRONI MOTOR IZ PERSPEKTIVE MAGNETSKOG POLJA

Kako bi bolje razumjeli rad sinkronog motora, pogledat ćemo sliku 2.3, gdje je sinkroni generator povezan na sabirnicu. Generator ima drugi pogonski stroj koji pokreće njegovu osovinu, uzrokujući njegovo okretanje. Smjer primijenjenog zakretnog momenta od pogonskog stroja je u smjeru kretanja, jer pogonski stroj na prvom mjestu čini da se generator rotira.

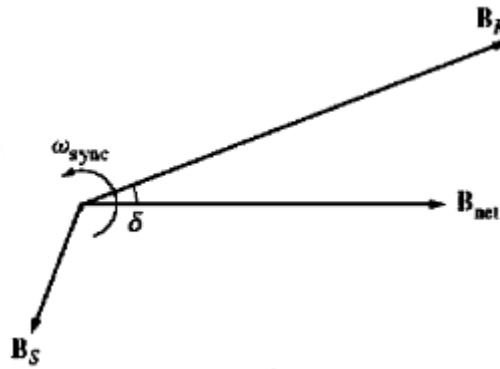


Slika 2.3: Sinkroni generator povezan na sabirnicu sa opterećenjem [1]

Fazorski dijagram sinkronog generatora u radu sa velikom uzbuđnom strujom je prikazan na slici 2.3a, dok je na slici 2.3b prikazan odgovarajući dijagram magnetskog polja. Kao što je ranije objašnjeno,  $B_R$  odgovara (stvara)  $E_A$ ,  $B_S$  odgovara  $E_{stat}$  ( $-jX_S I_A$ ), te ukupni  $B_{uk}$  kao suma  $B_R$  i  $B_S$  odgovara (stvara)  $V_\phi$ . Smjer rotacije oba dijagrama je u smjeru suprotnom od kazaljke na satu na slici, slijedeći standardnu matematičku deklaraciju povećanja kuta.



Slika 2.3a: Fazorski dijagram sinkronog generatora pri radu sa induktivnim faktorom snage [1]



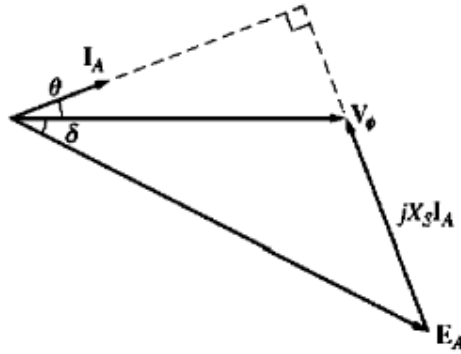
Slika 2.3b: *Odgovarajući dijagram magnetskog polja generatora [1]*

Inducirani moment u generatoru je prikazan na dijagramu magnetskog polja, slika 2.3b. Iz izraza 2-3 i 2-4 inducirani moment dan je kao [1]:

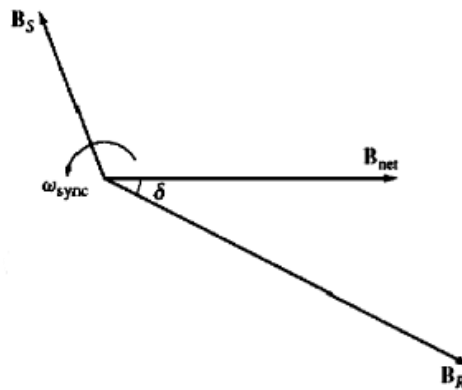
$$M_{ind} = k B_R B_{uk} \quad 2-3$$

ili 
$$M_{ind} = k B_R B_{uk} \sin \delta \quad 2-4$$

Primjećujemo da je iz dijagrama magnetskog polja inducirani okretni moment u ovom stroju u smjeru kazaljke na satu, suprotstavljajući se smjeru rotacije. Drugim riječima, inducirani zakretni moment u generatoru je protumoment, koji se suprotstavlja rotaciji uzrokovanoj vanjskim primijenjenim zakretnim momentima. Pretpostavimo da, umjesto okretanja osovine u smjeru kretanja, pogonski stroj iznenada gubi snagu i počinje vući osovinu stroja. Što se dešava sa strojem tada? Rotor usporava zbog opterećenja na osovini i zaostaje za ukupnim magnetskim poljem u stroju. Kako rotor, a time i  $B_R$ , usporava i zaostaje za  $B_{uk}$ , rad stroja se odjednom mijenja. Prema jednadžbi 2-3, kada  $B_R$  zaostaje za  $B_{uk}$ , smjer induciranoog zakretnog momenta okreće se i postaje suprotan smjeru kazaljke na satu. Drugim riječima, okretni moment stroja sada je u smjeru kretanja, a stroj djeluje kao motor. Povećani kut zakretnog momenta  $\delta$  rezultira sve većim zakretnim momentom u smjeru rotacije sve dok na kraju zakretni moment motora ne bude jednak zakretnom momentu opterećenja na osovini. U tom trenutku, stroj će opet raditi u stabilnom stanju i sinkronoj brzini, ali sada kao motor [1].



Slika 2.4a: Fazorski dijagram sinkronog motora [1]



Slika 2.4b: Dijagram magnetskog polja motora [1]

Fazorski dijagram koji odgovara motoru je prikazan na slici 2.4a dok je fazorski dijagram koji odgovara radu generatora prikazan na slici 2.4b. Razlog zbog kojeg vrijednost  $jX_s I_A$  pokazuje od  $V_\phi$  do  $E_A$  u generatoru i od  $E_A$  do  $V_\phi$  u motoru je u tome što je referentni smjer  $I_A$  bio suprotan u definiciji ekvivalentnog kruga motora. Osnovna razlika između rada motora i generatora u sinkronim strojevima može se vidjeti ili na dijagramu magnetskog polja ili u fazorskom dijagramu. Kod generatora,  $E_A$  „leži“ ispred  $V_\phi$  te  $B_R$  „leži“ ispred  $B_{uk}$ . Kod motora,  $E_A$  „leži“ iza  $V_\phi$  te  $B_R$  „leži“ iza  $B_{uk}$ . U motoru je inducirani zakretni moment u smjeru kretanja, dok je kod generatora inducirani moment tzv. protumoment koji se protivi smjeru kretanja [1].

## 2.2. RAD SINKRONOG MOTORA U STABILNOM STANJU

Ovaj odjeljak istražuje ponašanje sinkronih motora u različitim uvjetima opterećenja i struje magnetiziranja, kao i pitanje korekcije faktora snage sa sinkronim motorima. Sljedeće objašnjenje će zanemariti otpornost motora na armaturu radi jednostavnosti.

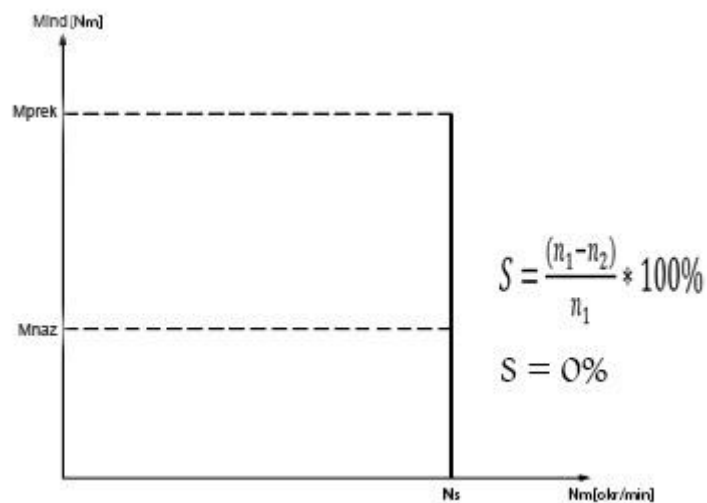
### 2.2.1. KRIVULJA MOMENTA I BRZINE VRTNJE SINKRONIH MOTORA

Sinkroni motori pogone opterećenja koja su u osnovi uređaji za konstantnu brzinu vrtnje. Obično su spojeni na elektroenergetske sustave puno veće od pojedinačnih motora, zbog toga se elektroenergetski sustavi pojavljuju kao beskonačne sabirnice za motore. To znači da će napon i frekvencija sustava biti konstantni bez obzira na količinu snage koju crpi motor. Brzina vrtnje motora „zaključana“ je na primijenjenu električnu frekvenciju, te će brzina motora biti konstantna bez obzira na opterećenje, tada je rezultirajuća krivulja momenta i brzine vrtnje prikazana na slici 2.4. Brzina vrtnje motora u stabilnom stanju konstantna je od stanja bez opterećenja pa sve do maksimalnog zakretnog momenta koji motor može isporučiti (tzv. prekretni moment), te zbog toga nije moguće regulirati brzinu vrtnje ovoga motora. Izraz za inducirani moment [1]:

$$M_{ind} = k B_R B_{uk} \sin \delta \quad 2-5$$

ili

$$M_{ind} = \frac{3 V_{\phi} * E_A * \sin \delta}{\omega_m * X_s} \quad 2-6$$



Slika 2.4: Karakteristika momenta i brzine vrtnje sinkronog motora [1]

Maksimalni ili prekretni moment nastaje kada je kut  $\delta=90^\circ$ . Međutim, uobičajeni okretni moment punog opterećenja je puno manji od prekretnog, zapravo, prekretni moment tipično može biti i do 3 puta veći od okretnog momenta pri punom opterećenju motora.

Kada zakretni moment na osovini sinkronog motora premaši prekretni moment, rotor više ne može ostati „zaključan“ za statorsko i ukupno magnetsko polje, te ispada iz sinkronizma. Umjesto toga, rotor počinje kliziti za njima. Kako se rotor usporava, magnetsko polje statora kruži više puta oko njega, a smjer induciranog zakretnog momenta u rotoru se mijenja svakim okruživanjem magnetskog polja statora rezultirajući ogromnim udarima okretnog momenta, prvo u jednom, a zatim u drugom smjeru uzrokujući velike vibracije u cijelom motoru. Gubitak sinkronizacije nakon prekoračenja prekretnog momenta poznat je kao „klizanje polova“ [1]. Maksimalni tj. prekretni moment dan je izrazom [1]:

$$M_{max} = k B_R B_{uk} \quad 2-7$$

ili

$$M_{max} = \frac{3V_\phi * E_A}{\omega_m * X_S} \quad 2-8$$

Ovi izrazi pokazuju da što je veća struja magnetiziranja (a time i  $E_A$ ), veći je i maksimalni okretni moment motora. Stoga, postoji prednost u stabilnom radu motora kod motora sa velikom strujom magnetiziranja ili velikim induciranim naponom  $E_A$ .

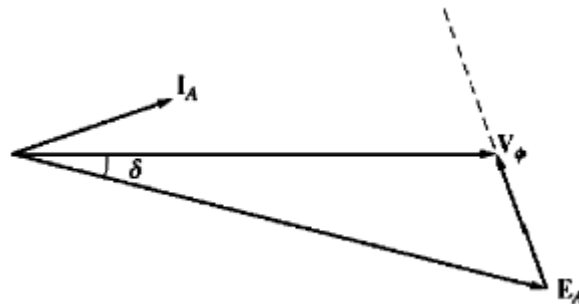
### 2.2.2. UTJECAJ PROMJENE OPTEREĆENJA NA SINKRONI MOTOR

Ako postoji opterećenje na osovini sinkronog motora, motor će razviti dovoljnu količinu okretnog momenta da se motor i njegovo opterećenje nastave rotirati sinkronom brzinom. No, što se događa kada se opterećenje na osovini sinkronog motora promjeni?

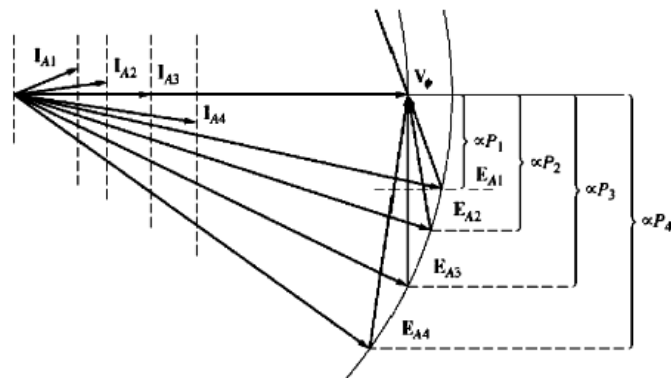
Kako bismo to saznali, zamislimo sinkroni motor koji u početku radi sa najvećim faktorom snage. Ako se poveća opterećenje na osovini motora, rotor će u početku usporiti. Dok to čini, kut zakretnog momenta  $\delta$  postaje veći, a inducirani okretni moment se povećava. Povećanje induciranog zakretnog momenta ubrzava rotor na početnu vrijednost, te se motor ponovno vrti sinkronom brzinom ali uz puno veći kut okretnog momenta  $\delta$ .

Kako bi u tom trenutku izgledao fazorski dijagram? Kako bismo saznali, pogledajmo ograničenja na stroju tijekom promjene opterećenja. Slika 2.5a prikazuje fazorski dijagram motora

prije povećanja opterećenja. Unutarnji inducirani napon  $E_A$  jednak je  $K\phi\omega$  i tako ovisi samo o struji magnetiziranja u stroju i brzini stroja. Brzina je ograničena ulaznim naponom i frekvencijom da bude konstantna, a budući da je struja magnetiziranja nepromijenjena, ona je konstantna također. Stoga  $E_A$  mora ostati konstantan kako se opterećenje mijenja. Udaljenost proporcionalna snazi ( $E_A \sin \delta$  i  $I_A \cos \varphi$ ) će se povećati, ali veličina  $E_A$  mora ostati konstantna. Kako se povećava opterećenje, tako inducirani napon  $E_A$  sve više raste prema dolje kako je prikazano na slici 2.5b. Kako  $E_A$  opada sve više i više, vrijednost  $jX_S I_A$  se mora povećati kako bi dosegla od vrha  $E_A$  do  $V_\phi$ , te se samim time i struja armature  $I_A$  također povećava. Primijetimo da se kut faktora snage  $\varphi$  također mijenja, gdje struja magnetiziranja prethodi naponu sve manje i manje te počinje kasniti za naponom sve više i više [1].



Slika 2.5a: *Fazorski dijagram motora pri radu sa kapacitivnim faktorom snage [1]*

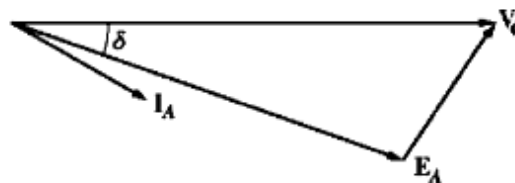


Slika 2.5b: *Utjecaj povećanja opterećenja na rad sinkronog motora [1]*

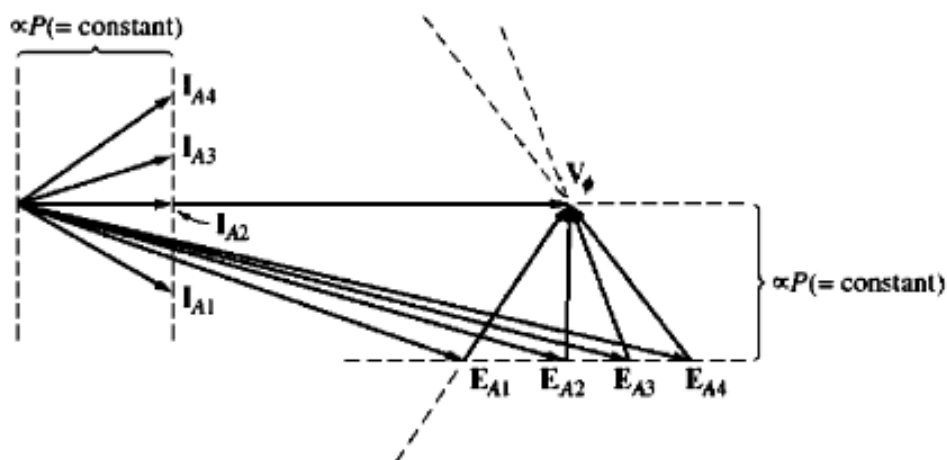
### 2.2.3. UTJECAJ PROMJENE STRUJE MAGNETIZIRANJA NA RAD MOTORA

Vidjeli smo kako promjena opterećenja na osovini sinkronog motora utječe na sami motor. Postoji još jedna vrijednost na sinkronom motoru koja se može lako prilagoditi-struja magnetiziranja. Kakav utjecaj promjena struje magnetiziranja ima na rad sinkronog motora?

Kako bismo saznali, pogledat ćemo slike 2.7a te 2.7b. Slika 2.7a prikazuje sinkroni motor inicijalno u radu sa induktivnim faktorom snage. Sada, povećavši struju magnetiziranja pogledajmo što se događa sa motorom. Primijetimo da povećanjem struje magnetiziranja raste i vrijednost napona  $E_A$  ali ne utječe na stvarnu snagu koju isporučuje motor. Snaga koju isporučuje motor se mijenja samo u slučaju kada se promjeni zakretni moment opterećenja osovine. Budući da promjena  $I_F$  ne utječe na brzinu osovine  $n_m$  i budući da opterećenje na osovini ostaje nepromijenjeno, djelatna snaga koju motor isporučuje ostaje nepromijenjena. Naravno, napon  $V\phi$  je također konstantan, budući da je održan konstantnim uz pomoć mreže koja napaja sam motor. Udaljenosti proporcionalne snazi na fazorskom dijagramu ( $E_A \sin\delta$  te  $I_A \cos\phi$ ) moraju također biti konstantne. Kada se poveća struja magnetiziranja, poveća se i napon  $E_A$ , ali samo uz klizanje duž linije konstantne snage, ovaj utjecaj se prikazan na slici 2.7b [1].



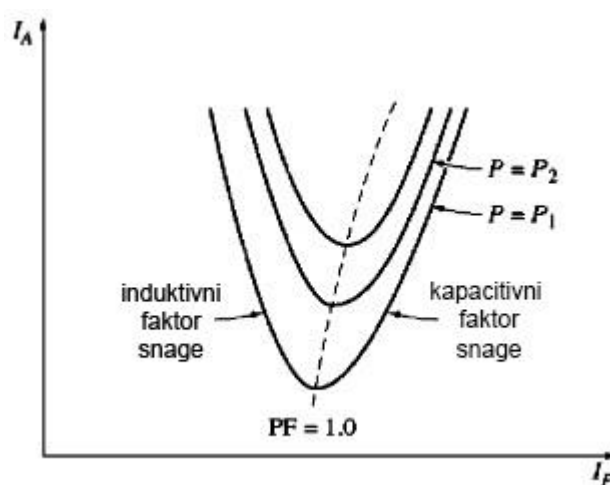
Slika 2.7a: Sinkroni motor u radu sa induktivnim faktorom snage [1]



Slika 2.7b: Utjecaj povećanja struje magnetiziranja na rad motora [1]

Primijetimo da se uslijed povećanja vrijednosti napona  $E_A$ , vrijednost struje armature  $I_A$  prvo smanjila te se povećala ponovno. Pri malom naponu  $E_A$ , struja armature kasni, te motor radi induktivno opterećen, zapravo, ponaša se kao kombinacija induktivno-omskog otpora, trošeći jalovu snagu  $Q$ . Kada se struja magnetiziranja poveća, struja armature se na kraju poravnava sa  $V_\phi$ , te motor troši čisto djelatno opterećenje. Nakon što se struja magnetiziranja poveća dodatno, struja armature počne prethoditi naponu te motor postaje kapacitivno opterećen, zapravo, ponaša se kao kombinacija kapacitivno-omskog otpora, trošeći negativnu jalovu snagu  $Q$  ili alternativno, isporučujući reaktivnu snagu  $Q$  u mrežu.

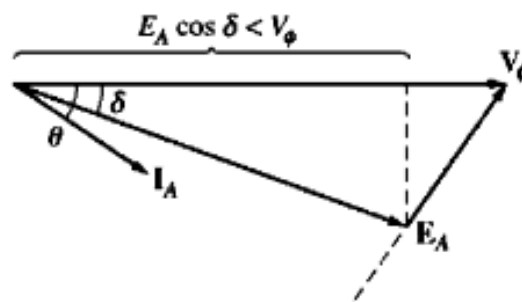
Graf ovisnosti struje  $I_A$  o struji  $I_F$  za sinkroni motor je prikazan na slici 2.8. Takav graf još se naziva i „V krivulje“, zbog toga što izgleda kao slovo V. Na grafu se nalazi nekoliko „V krivulja“, koje odgovaraju različitim stvarnim razinama snage. Za svaku krivulju, minimalna struja armature se pojavljuje samo kada je faktor snage idealan, odnosno 1, kada se samo djelatna snaga isporučuje motoru. Pri bilo kojoj drugoj točki krivulje, određena količina reaktivne snage je isporučeno do ili od motora također. Za vrijednosti struje magnetiziranja manje od vrijednosti koju daje minimalna struja  $I_A$ , struja armature kasni za naponom, trošeći reaktivnu snagu  $Q$ . Za vrijednosti struje magnetiziranja veće od vrijednosti koju daje minimalna struja  $I_A$ , struja armature prethodi naponu te isporučuje reaktivnu snagu  $Q$  u mrežu, kao što bi i kondenzator isporučivao. Stoga se kontroliranjem struje magnetiziranja sinkronog motora može kontrolirati jalova snaga  $Q$  koju sinkroni motor koristi ili koja se isporučuje u mrežu [1].



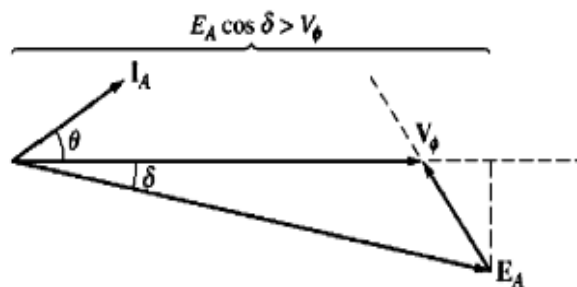
Slika 2.8: Graf „V krivulje“ sinkronog motora [1]



Kada je projekcija fazora  $E_A$  na fazor  $V_\phi$  ( $E_A \cos \delta$ ) kraća od samog fazora  $V_\phi$ , struja sinkronog motora kasni za naponom te motor troši jalovu snagu  $Q$ . Budući da je struja magnetiziranja mala u ovom slučaju, kažemo da je motor nedovoljno uzbuđen. S druge strane, kada je projekcija fazora  $E_A$  na fazor  $V_\phi$  duža od samog fazora  $V_\phi$ , struja sinkronog motora prethodi naponu te isporučuje jalovu snagu  $Q$  u mrežu. Budući da je struja magnetiziranja velika u ovom slučaju, kažemo da je motor previše uzbuđen. Fazorski dijagram koji prikazuje oba slučaja prikazan je na slikama 2.9a i 2.9b [1].



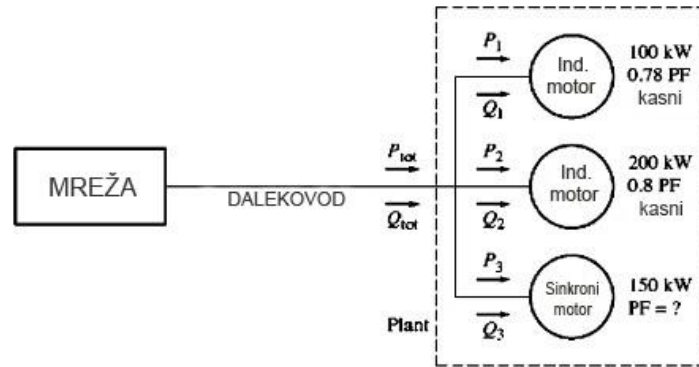
Slika 2.9a: Fazorski dijagram poduzbuđenog sinkronog motora [1]



Slika 2.9b: Fazorski dijagram preuzbuđenog sinkronog motora [1]

#### 2.2.4. KOREKCIJA FAKTORA SNAGE KOD SINKRONOG MOTORA

Slika 2.10 prikazuje mrežu čiji je izlaz povezan dalekovodom sa industrijskim pogonom na određenoj udaljenosti. Prikazani industrijski pogon sadrži tri opterećenja. Dva opterećenja su asinkroni indukcijski motori sa faktorom snage u kašnjenju, te treće opterećenje je sinkroni motor sa promjenjivim faktorom snage [1].



Slika 2.10: Elektroenergetski sustav koji se sastoji od beskonačne sabirnice koja putem dalekovoda napaja industrijski pogon [1]

Mogućnost prilagođavanja faktora snage na jednom ili više opterećenja u elektroenergetskom sustavu može znatno utjecati na radnu efikasnost elektroenergetskog sustava. Što je niži faktor snage sustava, to su veći gubici u dalekovodu koji ga napaja. Većina opterećenja u elektroenergetskom sustavu su induktivni asinkroni motori, te su zbog toga elektroenergetski sustavi u većini slučajeva induktivnog faktora snage. Imajući jedno ili više kapacitivnih opterećenja (preuzbuđenih sinkronih motora) u sustavu može biti korisno iz sljedećih nekoliko razloga [1]:

1. Kapacitivno opterećenje može isporučiti određenu jalovu snagu  $Q$  bližu induktivnom opterećenju, umjesto da dolazi iz generatora. Budući da jalova snaga ne mora putovati preko dugih i visoko otpornih dalekovoda, struja kroz dalekovod je smanjena i gubici u elektroenergetskom sustavu su puno manji

2. Budući da kroz dalekovode teče manja struja, oni mogu biti dimenzionirani za manji nazivni protok snage. Oprema za nižu vrijednost protoka snage znatno smanjuje troškove u elektroenergetskom sustavu.

3. Zahtijevanje sinkronog motora da radi sa kapacitivnim faktorom snage znači da motor mora biti previše uzbuđen. Ovaj način rada povećava maksimalni okretni moment motora i smanjuje mogućnost slučajnog prekoračenja prekretnog momenta.

Korištenje sinkronog motora ili ostale opreme za povećanje ukupnog faktora elektroenergetskog sustava zove se korekcija faktora snage. Budući da sinkroni motor može pružiti korekciju faktora snage i smanjiti troškove u elektroenergetskom sustavu, mnoga opterećenja koja mogu prihvatiti motor stalne brzine vrtnje (iako im nije nužno potreban) su pokretana sinkronim motorom. Unatoč tome što sinkroni motori mogu koštati više od asinkronih motora na

pojedinačnoj osnovi, mogućnost rada sinkronog motora pri kapacitivnom faktoru snage koji koristimo za korekciju faktora snage štedi novac za elektroenergetska postrojenja. Rezultat toga je kupovina i korištenje sinkronog motora.

Bilo koji sinkroni motor koji postoji u postrojenju radi previše uzbuđen kako bi postigao korekciju faktora snage i povećanje prekrtnog momenta. Međutim, pokretanje previše uzbuđenog motora zahtjeva veliku struju magnetiziranja i magnetski tok, što uzrokuje znatno zagrijavanje rotorskog namota. Operater u tom slučaju mora paziti da ne pregrije namote prekoračivanjem nazivne struje magnetiziranja.

### 2.2.5. SINKRONI KONDENZATOR

Sinkroni motor kupljen za pogon tereta može raditi previše uzbuđen kako bi isporučio reaktivnu snagu  $Q$  za elektroenergetsko postrojenje. Preciznije, u nekim trenucima u prošlosti sinkroni motori su kupovani i pokretani bez opterećenja, samo za korekciju faktora snage. Fazorski dijagram previše uzbuđenog sinkronog motora u radu bez opterećenja prikazan je na slici 2.11. Budući da se iz motora ne crpi snaga, pravac proporcionalan snazi ( $E_A \sin \delta$  i  $I_A \cos \varphi$ ) ima vrijednost 0. S obzirom da jednačba Kirchoffova zakona za napone za sinkrone motore glasi [1]:

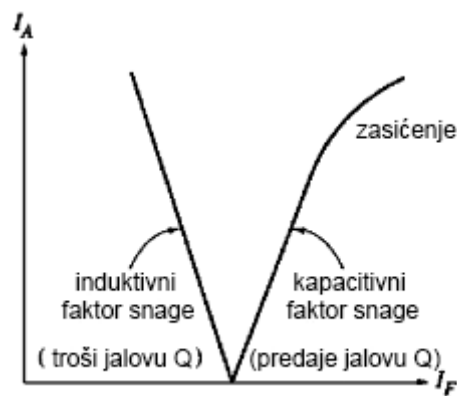
$$V_\phi = E_A + jX_S I_A \quad 2-9$$



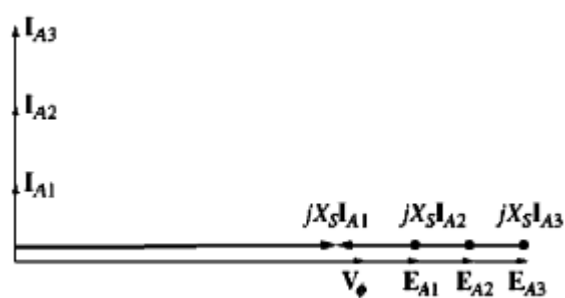
Slika 2.11: Fazorski dijagram sinkronog kondenzatora [1]

Vrijednost  $jX_S I_A$  na grafu ima smjer prema lijevo na X-osi, dok fazor struje  $I_A$  ima smjer prema gore na Y-osi. Ako se pogledaju napon  $V_\phi$  i struja  $I_A$ , odnos napona i struje između njih predstavlja kondenzator (trokut otpora s kapacitivnim otporom). Previše uzbuđen sinkroni motor bez opterećenja na osovini izgleda kao jedan ogromni kondenzator u elektroenergetskom postrojenju.

Neki sinkroni motori su se prodavali samo zbog korekcije faktora snage, takvi motori su imali osovine koje su bile unutar motora te nisu prolazile kroz kućište motora-fizički se nije mogao spojiti nikakav teret na osovinu motora. Takvi sinkroni motori specijalne namjene još su se često zvali i sinkroni kondenzatori. Graf „V krivulje“ za sinkroni motor je prikazana na slici 2.12a. Budući da djelatna snaga isporučena motoru iznosi 0 (osim gubitaka), pri idealnom faktoru snage struja  $I_A$  iznosi također 0. Kako se struja magnetiziranja povećava iznad te točke, linijska struja (te reaktivna snaga koju troši motor) povećava se gotovo linearno sve dok ne dođe do zasićenja. Slika 2.12b prikazuje utjecaj povećanja struje magnetiziranja na fazorskom dijagramu motora. Danas, konvencionalni statički kondenzatori su ekonomičniji za nabavu te korištenje od sinkronih kondenzatora. Međutim, neki sinkroni kondenzatori još uvijek se mogu naći u uporabi u nekim starim industrijskim postrojenjima [1]



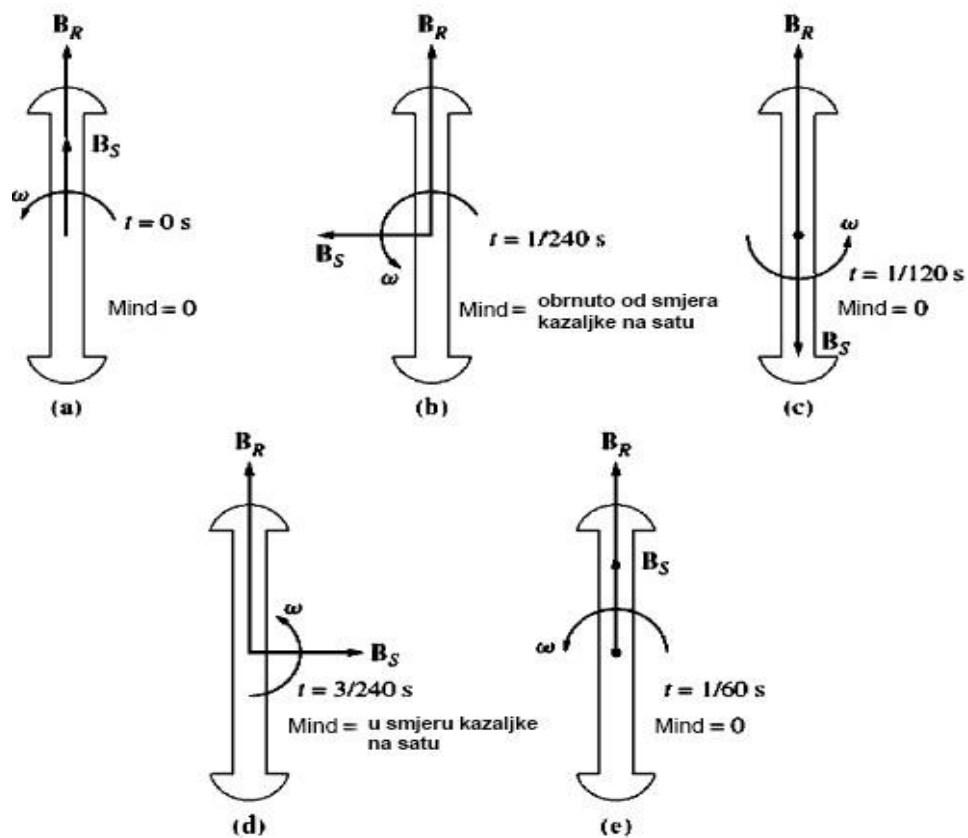
Slika 2.12a: „V krivulja“ sinkronog kondenzatora [1]



Slika 2.12b: Pripadajući fazorski dijagram [1]

### 3. POKRETANJE SINKRONIH MOTORA

Poglavlje 2.2 objašnjava rad sinkronog motora u stabilnom stanju. U tom području, pretpostavljalo se da se motor u početku okreće sinkronom brzinom. No, ono što još nije razmotreno je pitanje: Kako motor uopće dolazi do sinkrone brzine? Da bi razumjeli tematiku problema pokretanja motora, referirat ćemo se na sliku 3.1, koja prikazuje američku verziju sinkronog motora nazivne frekvencije 60Hz u trenutku kada je doveden napon na statorski namot. Rotorski namot motora je nepomičan i stoga magnetsko polje  $B_R$  također miruje. Magnetsko polje statora  $B_S$  počinje se kretati oko motora sinkronom brzinom.



Slika 3.1: Problemi pokretanja sinkronog motora: okretni moment se brzo izmjenjuje po veličini i smjeru, stoga je ukupni početni moment jednak nula [1]

Slučaj 3.1a prikazuje motor za vrijeme  $t=0$ s, kada su  $B_R$  i  $B_S$  gotovo u ravni. Iz izraza za inducirani moment [1]:

$$M_{ind} = kB_R B_S \quad 3-1$$

inducirani moment na osovini rotora iznosi 0. Slučaj 3.1b prikazuje situaciju za vrijeme  $t=1/240s$ . U tako kratkom vremenu, rotor se jedva pomakao, ali magnetsko polje statora  $S_a$  ima smjer prema lijevo pomaknuto za  $90^\circ$  nad magnetskim poljem rotora. Iz izraza za inducirani moment, moment na osovini rotora je sada u smjeru obrnutom od smjera kazaljke na satu. Slučaj 3.1c prikazuje situaciju za  $t=1/120s$ . U toj točki  $B_R$  i  $B_s$  su u različitim smjerovima, te je  $M_{ind}$  ponovno jednako 0. Za  $t=3/240s$ , magnetsko polje statora sada pokazuje prema desno pomaknuto za  $90^\circ$  nad magnetskim poljem rotora, rezultirajući smjerom momenta u smjeru kazaljke na satu. Konačno, za  $t=1/60s$ , magnetsko polje statora je ponovno u ravnini sa magnetskim poljem rotora, te je  $M_{ind} = 0$ . Tijekom jednog električnog ciklusa zakretni moment je prvo bio u smjeru suprotnom od kazaljke na satu, a zatim u smjeru kazaljke na satu, dok je prosječni moment tijekom cijelog ciklusa iznosio 0. Ono što se događa motoru je da svakim električnim ciklusom jako vibrira te se konačno i pregrijava. Takav pristup sinkronom pokretanju motora nije zadovoljavajući; operateri obično prilikom takvog pokretanja unište skupu opremu te se postavlja pitanje, kako spriječiti uništavanje skupocjene opreme te olakšati pokretanje sinkronog motora?

Postoje tri načina pokretanja koja se mogu koristiti kako bi na siguran način pokrenuli sinkroni motor:

1. Smanjiti brzinu vrtnje magnetsko polja statora na dovoljno nisku vrijednost tako da rotor može ubrzati te se „zaključati“ sa magnetskim poljem statora u trajanju jednog polu-ciklusa rotacije magnetskog polja. Ova metoda još se naziva i sinkroni zalet.

2. Koristiti vanjski pogonski stroj (pomoćni motor) za zalet sinkronog motora do sinkronog broja okretaja, proći kroz postupak paralelnog povezivanja i dovesti stroj u fazu rada kao generator. Nakon toga, gašenjem ili odspajanjem vanjskog pogonskog stroja sinkroni stroj počinje raditi kao motor.

3. Uz pomoć asinkronog zaleta pokreniti motor pomoću prigušnog kaveza ugrađenog u polne papuče, bitno je priključiti sinkroni motor na mrežu bez uzbudne struje te ga zaletiti kao asinkroni kavezni motor do približno brzine jednake sinkronoj. Nakon toga, motoru se dovede uzbuđa te motor počne raditi sinkronizirano. Ova metoda je najjednostavnija metoda pokretanja uz uvjet da motor ima prigušni kavez koji mora biti pravilno dimenzioniran.

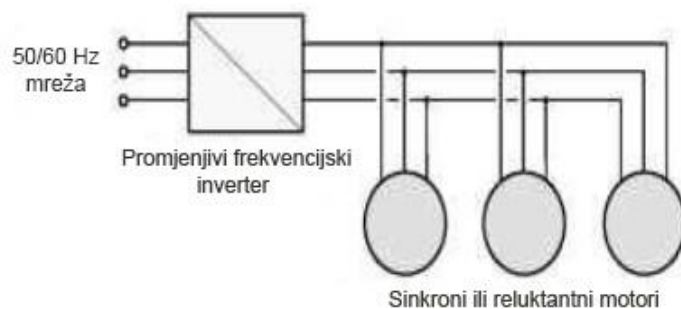
U današnje novije vrijeme postoje također i druge metode pokretanja sinkronog motora kao što je pokretanje uz pomoć elektroničkog uređaja za usporeni zalet (soft startera), te kao i na različite načine asinkronog zaleta koji nisu navedeni prethodno kao što su: direktno priključivanje na mrežu, preko blok transformatora, preko prigušnice te preko autotransformatora

### 3.1. POKRETANJE MOTORA SMANJENJEM FREKVENCIJJE

Ako se magnetsko polje statora u sinkronom motoru okreće dovoljno malo brzinom, neće postojati problem da rotor ubrza te da se „zaključa“ sa magnetskim poljem statora. Brzina magnetskog polja statora se može povećati na radnu brzinu postepenim povećanje frekvencije na standardnu vrijednost od 50/60 Hz.

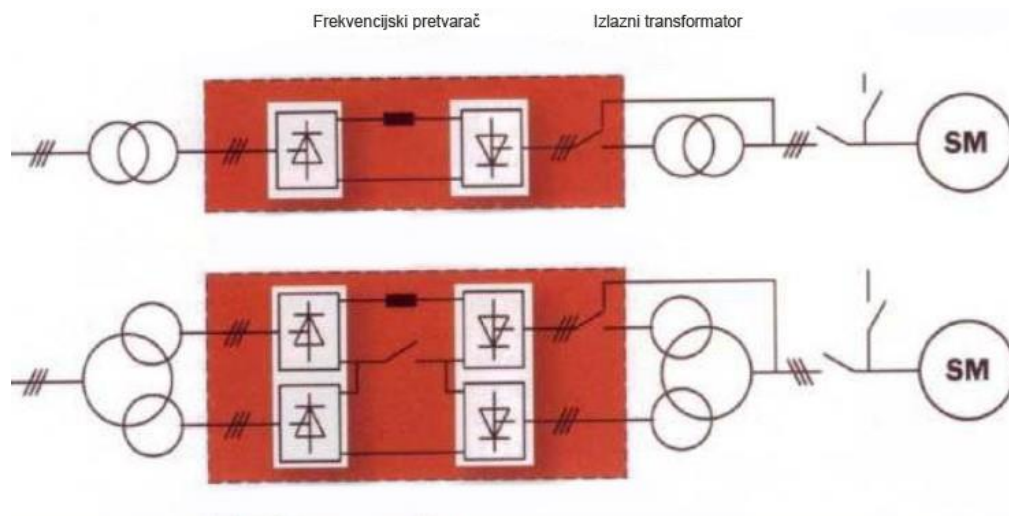
Ovaj pristup pokretanju sinkronih motora ima smisla, ali postoji jedan veliki problem: Na koji način te kojim putem dovesti varijabilnu vrijednost električne frekvencije? Uobičajeni elektroenergetski sustavi su vrlo pažljivo regulirani na 50 ili 60 Hz, Dakle, donedavno je bilo koji izvor napona promjenjive frekvencije morao dolaziti iz posebnog (namjenskog) generatora. Takva je situacija bila nepraktična, osim u vrlo neobičnim okolnostima [1].

Danas su stvari drugačije, postoje ispravljač-pretvarač te ciklopretvarač, koji se koriste za pretvaranje konstantne ulazne frekvencije u bilo koju željenu izlaznu frekvenciju. S razvojem takvih modernih poluvodičkih pretvarača napona i frekvencije, moguće je kontinuirano kontrolirati električnu frekvenciju koja se primjenjuje na motor sve od djelića herca do i iznad pune nazivne frekvencije. Ako je takva pogonska jedinica promjenjive frekvencije uključena u krug upravljanja motora kako bi se postigla regulacija brzine, pokretanje motora je vrlo jednostavno – prilagoditi frekvenciju na vrlo nisku vrijednost za pokretanje, a zatim podići na željenu radnu frekvenciju za normalan rad. Kada sinkroni motor radi brzinom manjom od nazivne, njegov unutarnji inducirani napon  $E_A = K\phi\omega$  će biti manji nego uobičajeno. Ako je inducirani napon  $E_A$  smanjene vrijednosti, onda i priključni napon isporučen motoru mora biti smanjen kako bi zadržali struju statora na sigurnosnoj razini. Napon u bilo kojem pogonu promjenjive frekvencije ili početnom krugu promjenjive frekvencije mora varirati otprilike linearno s primijenjenom frekvencijom [1].



Slika 3.3: Pokretanje sinkronog motora uz pomoć promjenjivog frekvenzijskog invertera

[2]

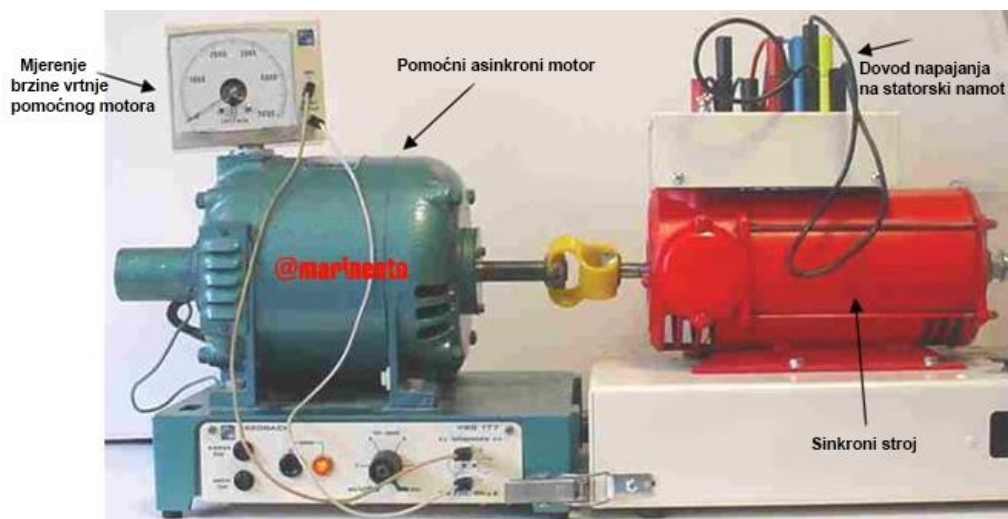


Slika 3.4: Konfiguracija za pokretanje sinkronih motora najvećih snaga (frekvencijski zalet, Megadrive-LCI) [3]

### 3.2. POKRETANJE SINKRONOG MOTORA POMOĆNIM MOTOROM

Drugi način pokretanja sinkronog motora se vrši tako što se na osovinu sinkronog motora spoji drugi tj. vanjski motor koji služi kao pokretač koji dovodi sinkroni stroj na punu brzinu vrtnje. Tada se sinkroni stroj može spojiti paralelno sa generatorom, te se pogonski motor može maknuti sa osovine sinkronog stroja. Jednom kada je pogonski motor ugašen, osovina sinkronog stroja usporava, magnetsko polje rotora  $B_R$  zaostaje za  $B_{uk}$  i sinkroni stroj počinje raditi kao motor. Nakon završetka paralele, sinkroni motor može biti opterećeni na uobičajeni način. Također, startni motor samo treba prevladati inerciju sinkronog stroja bez opterećenja koje nije dodano dok motor nije spojen paralelno sa mrežom. Budući da se mora savladati samo inercija motora, pomoćni motor može imati puno manje nazivne vrijednosti od sinkronog kako bi ga pokrenuo. Budući da većina veliki sinkronih motora ima sustave uzbude bez četkica montiranih na njihovim osovinama, često je moguće koristiti ove pobudnike kao startne motore. Za mnoge sinkrone motore srednje veličine, vanjsko pokretanje pomoću pomoćnog motora može biti jedino moguće rješenje, jer elektroenergetski sustavi za koje su vezani možda neće moći upravljati početnim strujama potrebnim za uporabu pokretanja sa prigušnim kavezima [4].

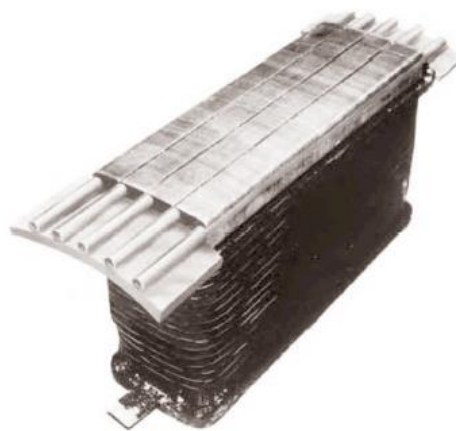




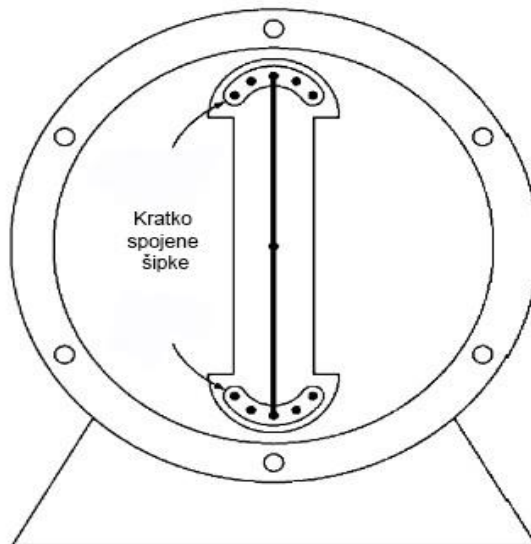
Slika 3.5: Pokretanje sinkronog motora pomoćnim motorom [2]

### 3.3. POKRETANJE POMOĆU PRIGUŠNOG NAMOTA (ASINKRONI ZALET)

Najpopularnije i najkorištenija metoda pokretanja sinkronog motora je korištenje prigušnog kaveznog namota. To su posebne šipke položene u zarezima urezane na „glavu“ svakog pola. Glava pola sa više šipki u cijeli prikazana je na slici 3.6. Da bi se razumjelo koja je uloga prigušnih kaveza u sinkronom motoru potrebno je pogledati sliku 3.7 na kojoj je istaknuti dvopolni rotor motora. Rotor na slici prikazuje kavezni namot dva pola rotora kratko spojena šipkama na krajevima dva kraja polova [1]. (To nije uobičajeni način na koji su konstruirani strojevi ali će poslužiti za ilustraciju svrhe tih namota.)



Slika 3.6: Rotor sinkronog motora koji prikazuje kavezni namot kratko spojen na kraju pola [1]



Slika 3.7: Rotor sinkronog stroja sa istaknutim prigušnim kavezima na krajevima polova [1]

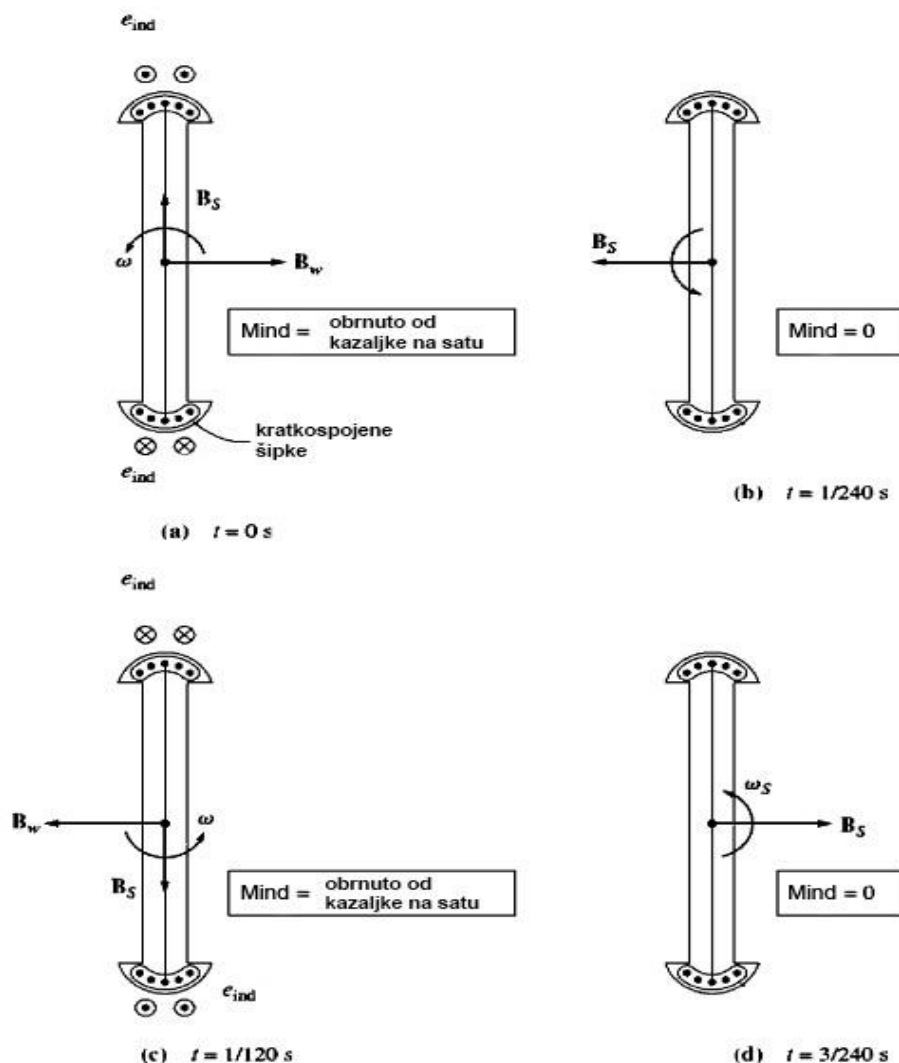
Pretpostavljamo u početku da glavni namot magnetskog polja rotora nije spojen te da su tri faze trofazne mreže dovedene na stator ovog stroja. Kada se napon prvi put primjenjuje za vrijeme  $t=0s$ , pretpostavimo da je magnetsko polje okomito, kako je i prikazano u slučaju 3.8a. Kako se magnetsko polje  $B_s$  kreće u smjeru suprotnom od kazaljke na satu, inducira se napon u šipkama kaveznog namota dan izrazom [1]:

$$e_{ind} = (v * B) * l \quad 3-2$$

gdje je:  $v$  = brzina šipki u odnosu na magnetsko polje

$B$  = vektor gustoće magnetskog toka

$l$  = duljina vodiča u magnetskom polju



Slika 3.8: Razvoj jednosmjernog zakretnog momenta uz pomoć prigušnog kavezno namota [1]

Šipke na vrhu gornjeg pola pomiču se udesno u odnosu na magnetsko polje, tako da je rezultatni smjer inducirano napona „prema van“. Slično tome, inducirani napon na šipkama koje se nalaze na vrhu donjeg pola je „prema unutra“. Ovi naponi stvaraju struju koja teče iz gornjih šipki u donje šipke, što rezultira magnetskim poljem namota  $B_W$  usmjerenim udesno. Iz izraza za inducirani moment [1]:

$$M_{ind} = kB_W B_S \quad 3-3$$

Rezultantni zakretni moment na šipkama (i rotoru) je u smjeru suprotnom od kazaljke na satu.

Slučaj 3.8b prikazuje trenutak  $t=1/240s$ , u kojem se magnetsko polje statora rotiralo za  $90^\circ$  dok se rotor jedva pomakao (ne može ubrzati u kratkom vremenu). U ovom trenutku, napon inducirani u prigušnim namotima iznosi 0, jer je  $v$  paralelna sa  $B$ . Bez inducirano napona, nema struje u prigušnim namotima te je zbog toga inducirani moment 0.

Slučaj 3.8c prikazuje situaciju za  $t=1/120s$  u kojem se magnetsko polje statora rotiralo za  $90^\circ$ , ali se rotor još uvijek nije pomakao. Inducirani napon na šipkama koje se nalaze na vrhu donjeg rotora dan relacijom 3-2, djeluje „prema unutra“ rezultirajući tokom struje kroz šipke na vrhu donjeg pola „prema van“ te „prema unutra“ kroz šipke na vrhu gornjeg pola, što rezultira magnetskim poljem  $B_w$  usmjernim ulijevo. Rezultantni inducirani moment dan izrazom [1]:

$$M_{ind} = kB_w B_s \quad 3-4$$

je u smjeru obrnutom od kazaljke na satu.

Konačno, slučaj 3.8d prikazuje situaciju za  $t=3/240s$ , gdje je kao i za  $t=1/240s$ , inducirani moment 0. (Potpuno se razlikuje od pokretanja sinkronog motora sa nazivnom strujom polja, jer je u tom slučaju okretni moment najprije u smjeru kazaljke na satu, a zatim u smjeru suprotnom od kazaljke na satu, u prosjeku vrijednosti 0. U ovom slučaju moment je uvijek istog smjera te nema prosječne vrijednosti momenta koja iznosi 0.)

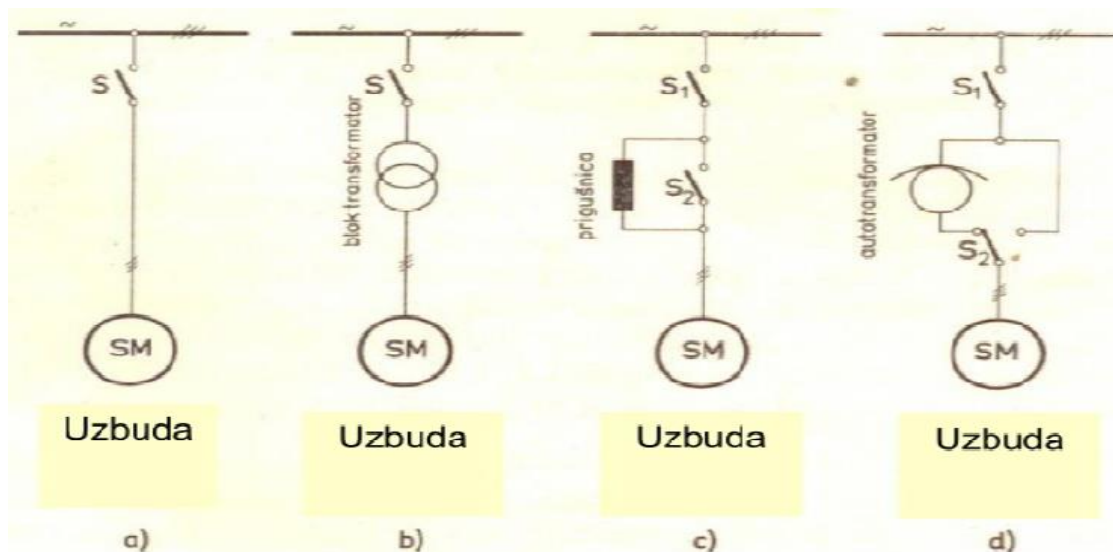
Iako će se motor ubrzati, nikada ne može postići sinkronu brzinu. Pretpostavlja se da se rotor okreće sinkronom brzinom. Tada je brzina magnetsko polja statora  $B_s$  jednaka brzini rotora i nema relativnog kretanja između magnetskog polja  $B_s$  i rotora. Ako nema relativnog kretanja, inducirani napon u prigušnim kavezima namotima iznositi će 0, rezultirajući da neće biti protjecanja struje kroz namote te će i magnetsko polje prigušnog namota iznositi 0. Stoga, neće se inducirati moment na rotoru koji bi ga nastavio vrtiti. Iako rotor ne može ubrzati do sinkrone brzine, može doći vrlo blizu sinkronoj brzini. Motor dođe do brzine približne sinkronoj dovoljnoj da može poteći nazivna struja magnetskog polja, a rotor će stupiti u korak s magnetskim poljem statora. U stvarnom stroju, namoti polja nisu „otvorenog kruga“ tijekom postupka pokretanja, zato što bi se u slučaju „otvorenog kruga“ namota inducirali vrlo visoki naponi tijekom pokretanja. Zbog toga se prigušni kavezni namoti kratko spajaju na krajevima uz pomoć prstena, te sprečavaju stvaranje opasnih napona po stroj, te u tom slučaju inducirana struja magnetskog polja doprinosi dodatnom početnom momentu motora [1].

Zaključno, ako stroj posjeduje prigušne namote, može biti pokrenut prateći sljedeću proceduru:

1. Odspojiti prigušne napona sa njihovog istosmjernog naponskog izvora te ih kratko spojiti.

2. Dovedi trofazni izmjenični napon na statorski namot motora te pustiti da se rotor zavrti na brzinu približnu sinkronoj. Prilikom pokretanja motor ne bi trebao imati spojen nikakav teret na osovinu da bi se postigla brzina što bliža sinkronoj.

3. Spojiti krug istosmjernog polja na mrežu, nakon toga motor će stupiti u korak sa sinkronom brzinom te se nakon toga može dodavati teret na osovinu.



Slika 3.2: Vrste i načini asinkronog zaleta prilikom pokretanja sinkronog motora: a) direktno priključivanje na mrežu, b) preko blok transformatora, c) preko prigušnice i d) preko [5]

### 3.3.1. UTJECAJ PRIGUŠNIH NAMOTA NA STABILNOST MOTORA

Prilikom dodavanja prigušnih namota sinkronom motoru za pomoć pri pokretanju, postoji također još jedna njihova prednost – povećanje stabilnosti stroja. Magnetsko polje statora okreće se sinkronom brzinom koja varira jedino u slučaju kada i frekvencija mreže varira. Ako se rotor okreće sinkronom brzinom, tada na prigušnim namotima nema induciranog napona. Ako motor uspori na brzinu nižu od sinkrone, tada postoji relativno kretanje između rotora i magnetsko polja statora te će se u prigušnim namotima inducirati napon. Taj inducirani napon uzrokuje da struja poteče te stvori magnetsko polje. Ulančavanjem ta dva magnetsko polja inducira se okretni moment koji teži da ubrza stroj na sinkronu brzinu. U drugom slučaju, ako se rotor okreće brže od magnetskog polja statora, inducirat će se okretni moment koji pokušava usporiti motor. Dakle, okretni moment koji proizvode prigušni namoti ubrzava spore strojeve i usporava brze strojeve.

Prigušni namoti stoga imaju tendenciju prigušivanja opterećenja. Iz te svrhe namota dolazi i ime „prigušni namoti“. Prigušni namoti se također koriste i kod sinkronih generatora, gdje služe sličnoj stabilizacijskoj funkciji kada generator radi paralelno s drugim generatorima na beskonačnoj sabirnici. Ako se na sinkronom generatoru pojavi varijacija zakretnog momenta na osovini, rotor će se trenutno ubrzati ili usporiti, a tim će se promjenama suprotstaviti prigušni namoti. Prigušni namoti poboljšavaju sveukupnu stabilnost elektroenergetskog sustava smanjivanjem vrijednosti snage i prolaznog momenta. Prigušni namoti su odgovorni za manje-više sve subtranzijentne struje prilikom kvara sinkronog motora. Kratki spoj na spojevima između statorskog namota i opterećenja je privremena oscilacija, te prigušni namoti reagiraju vrlo brzo u sprječavanju havarije [4].

## ZAKLJUČAK

U ovom završnom radu objašnjene su osnove sinkronih strojeva i njihov princip rada. Prikazan je ekvivalentni krug sinkronog motora te sinkroni motor iz perspektive magnetskog polja. Zatim, obrađen je rad sinkronog motora u stabilnom stanju te krivulja momenta i brzine vrtnje u stabilnom stanju, gdje se nakon toga prikazuje utjecaj promjene opterećenja na sinkroni motor a zatim i utjecaj promjene struje magnetiziranja. Iz detaljnog principa rada zaključeno je da se sinkronim motorom može lako vršiti korekcija faktora snage te da su se nekada koristili za korekciju faktora snage zbog čega su po tome dobili i ime kao „sinkroni kondenzatori“. Nakon opisivanja sinkronih motora analizirao se njihov najveći problem a to je pokretanje i dovođenje u stabilno stanje (da se rotor vrti sinkronom brzinom), kako bi se to postiglo bilo je potrebno obraditi tri načina pokretanja sinkronih motora. U ovom radu su objašnjena sva tri načina pokretanja te njihove prednosti i mane.

## LITERATURA

- [1] Stephen J. Chapman, Electric Machinery Fundamentals fourth edition, 2005.
- [2] Synchronous Motor and Methods of Starting a Synchronous Motors, <https://learn4electrical.altervista.org/synchronous-motor-and-methods-of-starting-a-synchronous-motors> (26.6.2022)
- [3] V Indragandhi, V. Subramaniaswamy and R Selvamathi, Electric Motor Drives and their Applications with Simulation Practices, 2022.
- [4] Milica Pužar, Ivan Mandić i Veselko Tomljenović, Sinkroni i asinkroni električni strojevi, 2012.
- [5] Elektrotehnički fakultet Osijek, Statička stanja elektromotornog pogona sa sinkronim strojevima



## SAŽETAK

U radu su objašnjeni principi rada sinkronih motora kao i primjena sinkronih motora u različitim postrojenjima, te njihov rad u stabilnom stanju pri sinkronoj brzini. Uvidom u princip rada shvatili smo da postoji problem pokretanja kod sinkronih motora te da problem pokretanja rješavamo različitim načinima pokretanja motora koji uvelike mogu olakšati pokretanje sinkronom motoru do ostvarenja sinkronizma.

Ključne riječi: Sinkrona brzina, pokretanje, princip rada, sinkroni motor

## **ABSTRACT**

### **STARTING A SYNCHRONOUS MOTOR**

This paper explains the principles of operation of synchronous motors as well as the application of synchronous motors in different plants, and their operation in a stable state at synchronous speed. By examining the principle of operation, we realized that there is a problem of starting in synchronous motors and that the problem of starting is solved by different ways of starting the engine, which can greatly facilitate the start of the synchronous motor to the realization of synchronism.

Key words: synchronous motors, synchronous speed, starting, principles of operation

## **ŽIVOTOPIS**

Autor ovog završnog rada, Petar Hrastović, rođen je 20. srpnja 2001. u Vinkovcima. U Županji završava osnovnu školu Mate Lovraka te upisuje Tehničku školu Županja u Županji, smjer elektrotehničar. Nakon završetka srednje škole upisuje Fakultet elektrotehnike, računarstva i informacijski tehnologija u Osijeku, smjer elektroenergetika. U slobodno vrijeme bavi se malim nogomet, gledanjem filmova te kuhanjem.

---

Potpis autora