

**INTERNACIONALNI UNIVERZITET TRAVNIK  
FAKULTET POLITEHNIČKIH NAUKA TRAVNIK**

**ZAVRŠNI RAD**

**ISPITIVANJE SINHRONIH MAŠINA**

Mentor:  
Prof. Dr. Saša Đekić

Student:  
Dragan Milanović

Travnik, septembar 2019.

# SADRŽAJ

<b>Uvod .....</b>	<b>4</b>
<b>1. Sinhrone mašine .....</b>	<b>5</b>
<b>1.1. Sinhroni generatori.....</b>	<b>5</b>
<b>1.2. Osnovni elementi konstrukcije .....</b>	<b>7</b>
<b>1.2.1. Stator .....</b>	<b>7</b>
<b>1.2.2. Rotor.....</b>	<b>8</b>
<b>1.3. Pobudni sistem .....</b>	<b>9</b>
<b>1.4. Sinhroni motor .....</b>	<b>10</b>
<b>2. Ispitivanje sinhrone mašine .....</b>	<b>11</b>
<b>2.1. Ispitivanje sinhrone mašine u ogledu praznog hoda.....</b>	<b>12</b>
<b>2.1.1. Karakteristika praznog hoda.....</b>	<b>12</b>
<b>2.1.2. Oblik talasa <i>ems</i> .....</b>	<b>14</b>
<b>2.2. Ispitivanje sinhrone mašine u ogledu kratkog spoja .....</b>	<b>15</b>
<b>2.2.1. Karakteristika ustaljenog (trajnog) kratkog spoja.....</b>	<b>15</b>
<b>2.2.2. Ogled udarnog kratkog spoja .....</b>	<b>18</b>
<b>2.3. Određivanje podataka iz karakteristika praznog hoda i kratkog spoja.....</b>	<b>19</b>
<b>2.4. Karakteristika reaktivnog opterećenja .....</b>	<b>21</b>
<b>2.5. Određivanje promjene napona i pobudne struje .....</b>	<b>24</b>
<b>2.5.1. Ben-Ešenburgova metoda.....</b>	<b>25</b>
<b>2.5.2. Potjeova metoda .....</b>	<b>26</b>
<b>2.5.3. Švedski dijagram.....</b>	<b>28</b>
<b>2.5.4. Američki dijagram .....</b>	<b>29</b>
<b>2.6. Gubici i stepen iskorištenja sinhrone mašine .....</b>	<b>31</b>
<b>2.6.1. Gubici u praznom hodu.....</b>	<b>34</b>
<b>2.6.2. Gubici u kratkom spoju.....</b>	<b>38</b>
<b>2.6.3. Metoda zaustavljanja.....</b>	<b>39</b>
<b>2.6.5. Sinhrono puštanje u rad .....</b>	<b>42</b>
<b>2.7. Reaktanse sinhrone mašine .....</b>	<b>42</b>
<b>2.7.1. Određivanje reaktanse rasipanja .....</b>	<b>43</b>

<b>2.7.2. Određivanje sinhronih reaktansi.....</b>	44
<b>2.8. Ogled zalijetanja .....</b>	46
<b>2.9. Ogled vitlanja .....</b>	47
<b>3. Standard za ispitivanje sinhrone mašine IEEE 115.....</b>	49
<b>3.1. Podužna sinhrona reaktansa (<math>X_d</math>) .....</b>	49
<b>3.2. Poprečna sinhrona reaktansa (<math>X_q</math>).....</b>	50
<b>3.3. Procedure za sprovođenje ogleda metodom klizanja – metod 1 za mjerjenje <math>X_{qs}</math> .....</b>	51
<b>3.3.1. Određivanje parametra <math>X_{qs}</math> iz metode 1 – test klizanja .....</b>	52
<b>3.4. Metod 2 – maksimalna pobudna struja na granici stabilnosti.....</b>	52
<b>3.4.1. Određivanje <math>X_{qs}</math> iz metoda 2.....</b>	53
<b>3.5. Metod 3 – empirijski.....</b>	53
<b>3.6. Kalorimetarska metoda za gubitke .....</b>	53
<b>3.6.1. Mašine sa vodenim hlađenjem .....</b>	53
<b>Zaključak.....</b>	55
<b>Literatura.....</b>	56

## **Uvod**

Jedna od bitnih karakteristika 20. vijeka je svakako upotreba električne energije u mnogim oblastima ljudskog života.

Široku upotrebu električne energije u 20. vijeku omogućio je Teslin trofazni sistem za proizvodnju, prenos i korišćenje električne energije, koga je Tesla razvio krajem 19. vijeka. Električnu energiju moguće je dobiti na razne načine.

Međutim, velika količina električne energije, koja je svakodnevno potrebna, može se proizvesti jedino pomoću sinhronih generatora. Sve električne mašine, samim tim i sinhrone, bilo novoizrađene ili remontovane, prolaze obavezno proces ispitivanja.

Ispitivanje električnih mašina predstavlja posebnu granu elektroenergetike i može se podijeliti na tri kategorije čija je svrha:

- provjera kvaliteta materijala i konstrukcionih pojedinosti,
- određivanje stepena iskorišćenja i
- određivanje radnih karakteristika ispitivanje mašine.

Neizbjježno je da se ove kategorije djelimično poklapaju. Podaci dobijeni ispitivanjem koriste se za razvoj i održavanje električnih mašina, bolje iskorištenje, koordinaciju sistema zaštite itd.

Sva ispitivanja, zatim uslovi pod kojima se obavljaju kao i dozvoljena odstupanja (tolerancije) predviđene su propisima. Cilj ovog diplomskog rada je da se teorijski opiše proces ispitivanja sinhrone mašine.

Rad je tako koncepciran da je u drugom poglavlju data podjela i osnovna konstrukcija sinhronih mašina.

U trećem poglavlju su obrađene neke od karakteristika sinhrone mašine, posebna pažnja posvećena je određivanju promjene napona i pobudne struje, određivanju ukupnih gubitaka u mašini, kao i određivanju reaktansi sinhrone mašine.

U četvrtom poglavlju dat je apstrakt standarda za ispitivanje sinhrone mašine IEEE 115, iz ovog standarda izdvojen je dio vezan za poduznu i poprečnu reaktansu sinhrone mašine i kalorimetarske metode za gubitke.

# 1. Sinhrona mašina

Sinhrona mašina, kao i svaka druga električna mašina, može da radi kao generator i kao motor.

Kada sinhrona mašina mehaničku energiju pretvara u električnu tada ona radi kao generator, u suprotnom, kada električnu energiju pretvara u mehaničku, radi kao motor.

Pored ova dva režima rada sinhrona mašina ima i treći, u kome ona ne proizvodi i ne troši aktivnu energiju, odnosno troši je samo na pokrivanje gubitaka, tada mašina radi kao sinhroni kompezator.

Međutim, kada se govori o sinhronim mašinama, onda se prvenstveno misli na sinhroni generator.

## 1.1. Sinhroni generatori

S obzirom na vrijednost instalisanih snaga sinhroni generator je tipični predstavnik električne mašine velike snage. Jedinične snage generatora prelaze i snagu od 1000 MVA.

Prema pogonskoj mašini sinhroni generatori se dijele na:

- turbogeneratore,
- hidrogeneratore i
- dizel generatore.

Turbogeneratori se grade sa cilindričnim rotorom, obično sa  $p=1$  ( $p$  – broj pari polova), rjeđe  $p=2$ , pri 50Hz, brzine obrtanja su respektivno 3000 ob/min i 1500 ob/min. Za ovako velike brzine obrtanja velike su periferne brzine, pa kod turbogeneratora zbog velike obrtne mase i dužine između ležišta dolazi do velikih mehaničkih naprezanja. To zahtijeva da se ne ide na velike prečnike rotora i da se namot rotora raspodjeljuje što ravnomjernije po obimu rotora. Kao pogonska mašina za ovako velike brzine služi parna ili gasna turbina, pa otuda naziv turbogenerator. Turbogeneratori se uvijek postavljaju horizontalno.



Slika 1.1. Turbogenerator

Hidrogeneratori se grade sa istaknutim polovima na rotoru, od sasvim sporohodnih do brzohodnih sa  $p=2$ . Prelaskom na veći broj pari polova, brzina obrtanja se smanjuje. Što je brzina obrtanja manja, dopušta se veći prečnik rotora, koji je opet ograničen mehaničkim naprezanjima uslijed djelovanja centrifugalnih sila. Međutim, ova mehanička naprezanja su tolika da nije potrebna ravnomjerna raspodjela namota po obimu rotora, pa se onda može koristiti rotor sa istaknutim polovima. Pogonska mašina je hidraulična turbina (Kaplanova i Francisova), pa otuda naziv hidrogenerator.



Slika 1.2. Hidrogenerator

Kao što vidimo hidrogeneratori i turbogeneratori jako se razlikuju u konstrukcionom pogledu. Tako npr. kod turbogeneratora snage 100 MW i 200 MW dužina rotora je 5 do 6 puta veća od prečnika. Međutim kod hidrogeneratora snage 100 MW i 130 MW prečnik rotora je 6 do 7 puta veći od osne dužine magnetskog kola.

Hidrogeneratori čija je brzina obrtanja relativno velika postavljaju se horizontalno, a hidrogeneratori većih snaga, čije su brzine obrtanja relativno male, postavljaju se vertikalno, a hlađenje je kombinovano (voda-vazduh).

Dizel generatori se pokreću dizel motorima, a grade se za široki raspon brzina obrtanja, od  $p=2$  naviše. Snaga dizel generatora ograničenih je mogućnosti izrade motora, pa dostiže najviše desetak MVA.

## 1.2. Osnovni elementi konstrukcije

Magnetsko kolo sinhronog generatora sastoje se iz dva osnovna dijela: statora (nepokretni dio) i rotora (obrtni dio), koji su međusobno razdvojeni međugvožđem.

Kod sinhronih mašina induktor (primar) je uvijek rotor, a indukt (sekundar) je stator.

### 1.2.1. Stator

Stator sinhrone mašine pravi se u obliku šupljeg cilindra i sastavljen je od dinamo limova (debljine 0,5 mm). Ovi limovi su međusobno izolovani da bi se smanjili gubici uslijed vihornih struja. Limovi statora slažu se u paketu, između tih paketa nalaze se promajšta za efikasnije hlađenje. Limovi su takve konstrukcije da kada se slože obrazuju žljebove i zupce na statoru.

Žljebovi statora sinhronih mašina manjih snaga su poluzavoreni, a po obliku trapezni ili pravougaoni. Dok su žljebovi statora sinhronih mašina srednjih i velikih snaga uvijek otvoreni i po obliku trapezni. U žljebove se postavljaju namoti. Kod sinhronih mašina većih snaga u otvorene (trapezne) žljebove stavlju se štapni namoti. Ovi namoti se izrađuju u navojnim dijelovima (sekcijama) a potom ulazu u žljebove.

Prednost otvorenih žljebova, posebno kod generatora za više napone, je u tome što se tada navojni dijelovi u vakuumu natapaju izolacionim materijalima (kompaunduju). Na taj način se odstranjuju mjehurovi vazduha, koji mogu dovesti do tinjavog pražnjenja i oštećenja izolacije.

Pošto se sinhroni generatori velikih snaga na mjesto ugradnje (elektrana), dopremaju u dijelovima, namotaji se djelimično montiraju u fabrici, a djelimično na mjestu ugradnje. Namoti statora najčešće su trofazni, čiji se krajevi (počeci i završeci) izuvode kroz oklop na posebne izolatore i sprežu u zvijezdu. Na slici 1.3. prikazan je stator (segment statora) sinhrone mašine.



Slika 1.3. Stator sinhrone mašine

## 1.2.2. Rotor

Rotor sa vratilom mašine čini cijelinu, on nosi na svojoj periferiji 2p polova koji mogu biti od masivnog gvožđa ili od limova.

Kod sinhronih mašina pobudni namotaj je smješten na rotoru i napajan jednosmjernom strujom. Osim ovog namotaja, kod nekih sinhronih mašina sa istaknutim polovima, na rotoru postoji i dodatni prigušni (amortizacioni) namotaj. Ovaj namotaj ima sledeće uloge: prigušuje elektromehaničke oscilacije rotora i prigušuje inverzne komponente polja koje nastaju pri nesimetričnim opterećenjima, a koje mogu da izazovu neželjene gubitke i prenapone, i omogućuju asinhrono zalijetanje sinhronih maotora i kompenzatora.

Kod mašina sa cilindričnim rotorom ugrađuje se prigušni namotaj kada se očekuju velika nesimetrična opterećenja.

Postoje dvije izvedbe u pogledu oblika rotora:

- Cilindričan rotor, izrađuje se od najkvalitetnijeg, obično masivnog gvožđa, a potom se mehanički obradjuje (kovanjem). Po čitavoj osnoj dužini rotora urezju se žljebovi. Namotaj rotora sastavljen je iz sekcija i raspodijeljen u žljebovima. Kod cilindričnih rotora približno jedna trećina polnog koraka nije ožljebljena i čini zonu velikog zupca. Kroz ovaj veliki zubac prolazi glavni dio magnetnog fluksa. Namoti se prave od bakra koji na radnoj temperaturi, pored velike električne provodnosti, ima i visoku mehaničku čvrstoću. Kod sinhronih mašina sa cilindričnim rotorom međugvožđe je svugdje iste dužine. Ova konstrukcija rotora se gotovo isključivo primjenjuje kod velikih dvopolnih ili četveropolnih turbogeneratora.

- Rotor sa istaknutim polovima sastoji se od: vratila, magnetnog vijenca i magnetskih polova. Kod mašina manjih snaga i manjih brzina magnetni polovi pričvršćuju se za magnetni vijenac pomoću zavrtnja, a kod mašina većih snaga i većih brzina obrtanja pomoću tzv. „lastinog repa“. Na slici 1.4. prikazan je rotor sinhronne mašine sa istaknutim polovima. Kod ovakvih mašina namotaj je koncentrisan oko jezgra polova. Ovakva konstrukcija rotora upotrebljava se kod mašina sa većim brojem pari polova (hidrogeneratori). Za razliku od cilindričnog rotora, rotor sa istaknutim polovima može se postavljati i horizontalno i vertikalno.



Slika 1.4. Rotor sinhronne mašine sa istaknutim polovima

### **1.3. Pobudni sistem**

Sinhrone mašine imaju uglavnom elektromagnetsku pobudu, tj. one se pubuđuju proticanjem jednosmjerne struje kroz pobudni namotaj. Samo se kod sinhronih mašina sa permanentnim magnetima koristi stalni magnet za stvaranje magnetnog polja.

Osnovi element svakog pobudnog sistema je izvor struje pobude, koji se kratko naziva pobudnica. Pobudnica može biti bilo koji izvor jednosmjerne struje: jednosmjerni generator sa sopstvenom ili nehzavisnom pobudom, nezavisni sinhroni generator sa ispravljačem i ispravljač napajan iz spoljne mreže ili sa krajeva sinhronе mašine koja se pobuđuje.

Drugi važan element sistema pobude je automatski regulator pobude (ili regulator napona). Preko njega se spoljna naredba za promjenu pobude sinhronog generatora umjesto na ulaz u regulator, obično daje direktno na pubudnicu.

Pobudni namotaj sinhronog generatora takkođe je važan element sistema za regulaciju pobude. Smješten je na rotor sinhronе mašine, u žljebovima ili na njegovim polovima.

Regulacija pobude u normalnom radnom režimu ima zadatak da promjenom jednosmjerne struje pobude:

- održava napon i/ili reaktivnu snagu na njenom izlazu u željenim gradnicama i da ih mijenja po unapred određenom zakonu i
- realizuje željenu raspodjelu reaktivnog opterećenja između sinhronih mašina koje rade paralelno u elektroenergetskom sistemu.

U radnim režimima koji nisu nominalni, zadatak regulacije pobude se proširuje i na održavanje stabilnosti, odnosno na poboljšanje sigurnosti paralelnog rada elektroenergetskog sistema.

Ove funkcije sistem pobude izvršava zavisno od vrste kvara: forsiranjem pobude ili brzom demagnetizacijom sinhronе mašine.

Prema vrsti upotrebljenih elemenata pobudni sistemi mogu biti:

- elektromašinski,
- statički i
- mješoviti.

Mješoviti pobudni sistemi predstavljaju kombinaciju elektromašinskih i statičkih pobudnih sistema. Tako je npr. pobudni sistem HE „Đerdap“ realizovan kao kombinacija elektromašinskog i statičkog sistema pobude.

Prema načinu pobuđivanja pobudni sistemi mogu biti:

- sa samopobuđivanjem i
- pobuđivanjem iz stranog izvora (nezavisno pobuđivanje).

Prema vrsti izvora koji obezbjeđuje jednosmjernu pobudnu struju sinhronoj mašini, razlikuju se tri osnovna tipa sistema pobude:

- jednosmjerni (DC) sistem pobude,
- nezavisni naizmjenični (AC) sistem pobude i
- statički naizmjenični (ST) sistem pobude.

## 1.4. Sinhroni motor

Kod motora za naizmjeničnu struju najviše je zastupljen, po značaju i masovnosti primjene, asinhroni motor, a poslije njega slijedi sinhroni motor.

U odnosu na asinhronne mašine velikih snaga, bitne prednosti sinhronih motora su bolji stepen iskorišćenja, i to što ne troše reaktivnu energiju (postoji mogućnost proizvodnje reaktivne energije), dok su nedostaci vezani za postojanje pobude i relativno teško puštanje u rad.

U savremenoj praksi, najviše su zastupljeni standardni sinhroni motori sa pobudom, zatim sinhroni motori sa permanentnim magnetima i reluktantini sinhroni motori.

Sinhroni motori se primjenjuju za pokretanje onih elektromotornih pogona i mehanizama kod kojih se zahtijeva konstantna brzina obrtanja. To su npr. veliki ventilatori, veliki kompresori, pumpe itd.

Danas, obično svi sinhroni motori imaju prigušni namot, koji je isti kao vjeveričin kavez kod asinhronih motora, pa se stoga puštaju u rad kao asinhroni motori sa rotorom u kratkom spoju.

Sinhroni motori manjih snaga puštaju se u rad direktnim priključivanjem na mrežu. A ako se radi o motoru veće snage, on se ne smije prključiti direktno na mrežu, jer velika polazna struja izaziva veliki pad napona na mreži, što se nepovoljno odražava na ostale prijemnike. Stoga se za puštanje u rad sinhronih motora velikih snaga koriste prigušnice ili autotransformatori.

## 2. Ispitivanje sinhrone mašine

Svaka sinhrona mašina po završenom procesu proizvodnje podliježe nizu ispitivanja koja su propisana nacionalnim i internacionalnim standardima.

Kada se govori o ispitivanju sinhrone mašine, uglavnom se misli na ispitivanje sinhronih generatora pošto oni imaju znatno veću primjenu nego sinhroni motori.

Za ispitivanje sinhronih motora koriste se iste metode kao i za ispitivanje generatora pri čemu je potrebno voditi računa o specifičnostima gubitaka, načinu puštanja u rad i slično.

Prema jugoslovenskom standardu (JUS) predviđena su sljedeća ispitivanja sinhronne mašine:

- komadna ispitivanja,
- tipska ispitivanja i
- specijalna primopredajna ispitivanja sinhronne mašine.

Komadna ispitivanja se obavljaju na svakom primjerku i tu spadaju:

- mjerjenje otpornosti namota u topлом stanju,
- mjerjenje otpornosti izolacije u hladnom stanju,
- generatorski prazan hod nepobuđen, a rjeđe motorski sa dužim trajanjem zbog mjerena vibracija,
- generatorski kratak spoj,
- zakočeno stanje sa višekratnim uključenjem na mrežu, samo za sinhronne samozaletnne mašine,
- ispitivanje pri povišenoj brzini obrtanja, tzv. ogled vitlanja,
- provjera povišenim indukovanim naponom pri pobudi naznačenom pobudnom strujom (ili barem  $1,3U_n$ ) pri naznačenoj učestanosti tokom 3 minuta i
- provjera dovedenim naponom.

Tipska ispitivanja vrše se na pojedinim primjercima istog tipa osim ako to nije drugačije određeno ugovorom i tu spadaju:

- određivanje pobudne struje, zavisno od struje opterećenja na naznačeni napon i naznačenu učestanost,
- zagrijavanje i hlađenje,
- ogled zalijetanja (za sinhronne mašine sa asinhronim zaletom),
- ogled zaustavljanja,
- mjerjenje ugla gubitaka izolacije,  $tg\delta$  i njegove promjene  $\Delta tg\delta$  zavisno od napona,
- mjerjenje kapacitivnosti namota prema masi i međusobno,
- napon vratila i/ili struje ležaja,
- mjerjenje vremenskih konstanti i reaktansi,
- akustična provjera buke i
- masa ukupna, transportna, rotora.

Specijalna ispitivanja:

- udarni kratak spoj pri sniženom naponu.

## 2.1. Ispitivanje sinhrone mašine u ogledu praznog hoda

Cilj ispitivanja mašine u praznom hodu je da se dobiju sljedeće karakteristike:

- oblik talasa ems,
- karakteristika praznog hoda i
- uži gubici praznog hoda u funkciji ems.

Za ispitivanje sinhrone mašine u ogledu praznog hoda može se koristiti generatorski i motorski postupak. Za određivanje karakteristike praznog hoda obično se koristi generatorski postupak.

### 2.1.1. Karakteristika praznog hoda

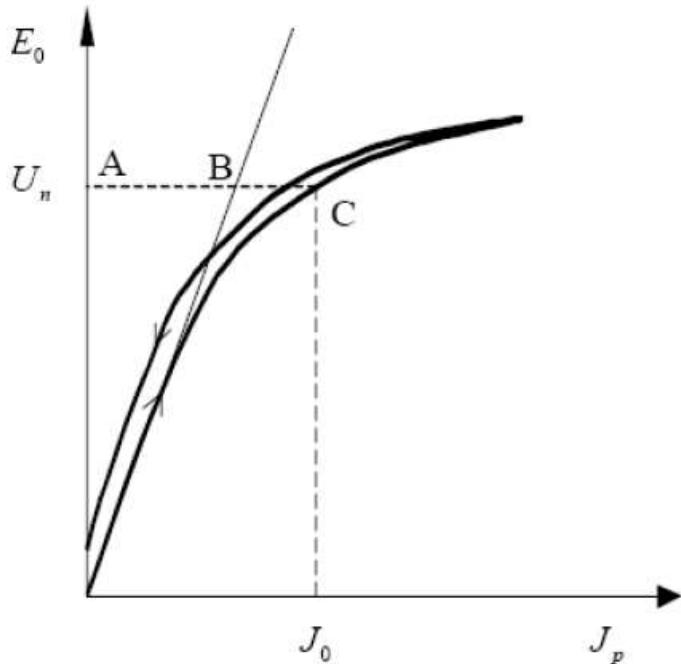
Karakteristika praznog hoda je funkcionalna zavisnost naizmjeničnog napona indukta na priključcima neopterećenog generatora  $E_0$ , od jednosmjerne pobudne struje  $J_P$ , pri konstantnoj brzini obrtanja i naznačenoj učestanosti tj.

$$E_0 = f(J_P) \quad \text{pri } I = 0, n = \text{const} \quad \text{i } f_n.$$

Tokom ogleda, generator se mehanički spoji sa pogonskim motorom (npr. motor jednosmjerne struje). Ovaj motor mora da ima svu potrebnu opremu pomoću koje se brzina ispitivanog generatora dotjeruje na tačno sinhronu brzinu. Pobudni namotaj se napaja iz posebnog izvora.

S pomoćnim motorom polako povećavamo pobudu sinhronog generatora da napon raste. Ovaj napon kontroliše se pomoću voltmetra koji se nalazi na krajevima statorovog namotaja koji su u ovom ogledu otvoreni. Kada se pri pobudnoj struci jednakoj nuli dotjera brzina na sinhronu, stalno je mjerimo tahometrom. Kasnije kada napon poraste brzinu obrtanja koju smo mjerili tahometrom možemo kontrolisati frekvencijometrom koji se nalazi na kraju statorovog namotaja. U prvom dijelu ogleda pobudnoj struci daju se sve veće vrijednosti, pri čemu se mora izbjegavati svako vraćanje pobudnog otpornika unazad da bi se jednoznačno dobitile tačke karakteristike pri porastu pobudne struje. Pri svakoj promjeni vrijednosti pobudne struje kontroliše se brzina, mjeri pobudna struja i *ems* generatora.

U drugom dijelu ogleda postupak je isti, samo pobudnoj struci dajemo manje vrijednosti. Na osnovu dobijenih rezultata nacrtava se karakteristika praznog hoda (slika 2.1.).



Slika 2.1. Karakteristika praznog hoda

Kao što se vidi sa slike 2.1. karakteristika praznog hoda je dvoznačna kriva. Dio karakteristike koji se dobije pri smanjenju pobudne struje, malo je viši od onog dijela karakteristike koji se dobije u prvom dijelu ogleda, pri povećanju pobudne struje.

Površina oivičena sa ove dvije grane karakteristike praznog hoda predstavlja histerezisne gubitke sinhronog generatora.

Kao stvarna karakteristika praznog hoda uzima se donja karakteristika, koja polazi iz koordinatnog početka i koja se dobija u prvom dijelu ogleda pri povećanju pobudne struje.

Tangenta na slici 2.1. predstavljava bi karakteristiku praznog hoda kada ne bi bilo zasićenja. Takva karakteristika bi se imala u vazduhu pa ovu pravu nazivamo karakteristikom međugvožđa.

Kod nominalnog napona glavni dio pobudne struje AB pripada *mps* međugvožđa, a dio BC *mps* magnetnog kola. Značajan podatak sa karakteristike praznog hoda je vrijednost pobudne struje  $J_0$ , pri kojoj se ima linijska *ems* po vrijednosti jednaka nominalnom naponu  $E_0 = U_n$ .

Kod sinhronih generatora velikih snaga čije se ispitivanje vrši na mjestu ugradnje tj. u elektrani, pogonski motor je vodena ili parna turbina, a uz generator je prigradjena i pobudna mašina sa samopobuđivanjem ili sa nezavisnom pobudom.

U ovom slučaju, pobudnu struju regulišemo grubim otpornikom sinhronog generatora ili finostepenim pobudnim otpornikom glavne ili pomoćne pobudne mašine.

Pri ispitivanju ovakvih sinhronih generatora u ogledu praznog hoda provjerava se i ispravnost podjele na stepene pobudnih otpornika.

Smatra se da je pobuda ispravno podešena ako se pri praznom hodu može podesiti 80% vrijednosti naznačenog napona, zatim 100% naznačenog napona kada je klizač pobudnog

otpornika zaokrenut za oko  $1/3$  i kada se pri praznom hodu postiže puna pobudna struja kada je klizač pobudnog otpornika zaokrenut za oko  $2/3$  svoga hoda.

### 2.1.2. Oblik talasa *ems*

Ispitivanjem sinhrone mašine u ogledu praznog hoda potrebno je pomoću oscilografa kontrolisati oblik talasa *ems* odnosno napona.

Potrebno je da oblik krive *ems* bude što je moguće više sinusni. Postoji niz konstrukcijskih mjera kojima se to postiže (različita dužina međugvožđa kod hidrogeneratora koja se mijenja po određenom zakonu, oblik i zakošenost polnih nastavaka, skraćenje namota itd.).

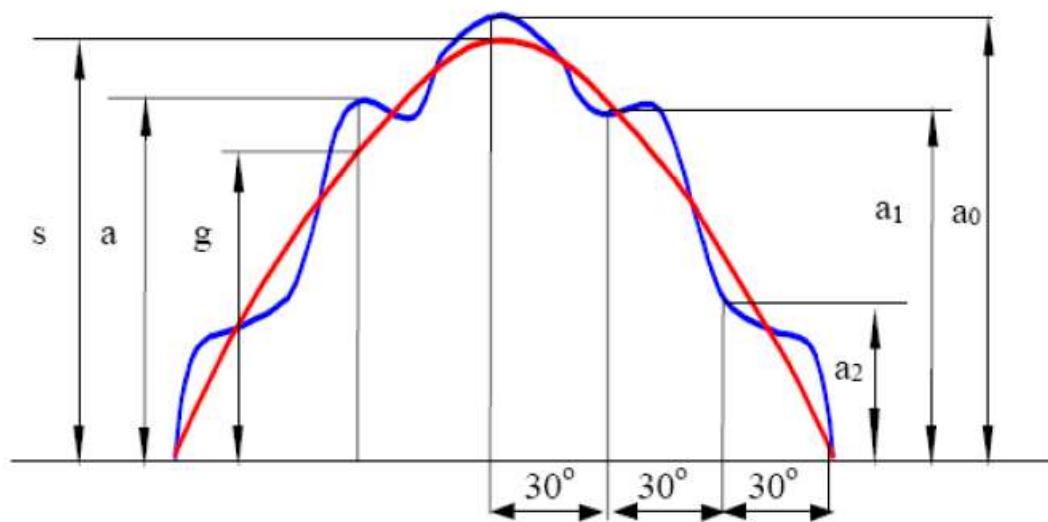
Da bi se izbjegao uticaj trećeg harmonika iz istih razloga, namoti statora se sprežu u zvijezdu i time se treći harmonik koji postoji u faznom naponu gubi u linijskom.

Ako je namot statora spojen u trougao što je slučaj kod mašina sa preklopom zvijezda-trougao, treći harmonik se izbjegava tako što se statorski namot izvodi od svitaka koji obuhvataju  $60^\circ$  statorskog oboda.

Pojava viših harmonika napona (zbog međuindukcije između dalekovoda i telekomunikacionog voda) nepovoljno utiče i na telekomunikacione vodove.

Kod generatora visokog napona oblik krive *ems* ispitujemo preko naponskih mjernih transformatora. Moraju se upotrebljavati mjerni transformatori dobre klase da oni ne bi izobličili oblik krive *ems*.

Prema propisima, oblik krive *ems* smatra se praktično sinusnim, ako najveće odstupanje trenutne vrijednosti,  $a$ , od stvarne vrijednosti sinusoide,  $g$ , ne iznosi više od  $5\%$  njene maksimalne vrijednosti.



Slika 2.2. Oblik talasa *ems*

Prema slici 2.2. maksimalna vrijednost izračunava se po obrascu:

$$S = \frac{a_0 + \sqrt{3}a_1 + a_2}{3}$$

## 2.2. Ispitivanje sinhrone mašine u ogledu kratkog spoja

Ogled kratkog spoja obično se izvodi poslije ogleda praznog hoda, jer tada temperatura namota odgovara pogonskim prilikama. Ovaj ogled se najčešće izvodi u režimu generatora (generatorski postupak).

Ispitivanjem sinhrone mašine u ogledu kratkog spoja određujemo:

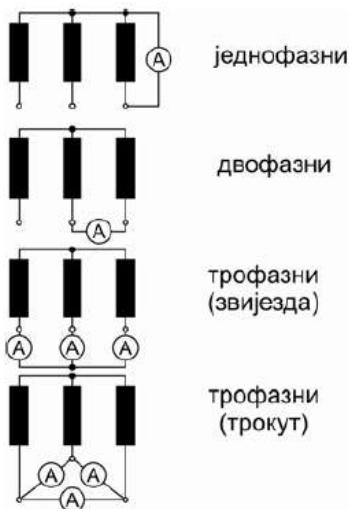
- karakteristiku kratkog spoja i
- dopunske i Džulove gubitke u namotu statora.

### 2.2.1. Karakteristika ustaljenog (trajnog) kratkog spoja

Karakteristika ustaljenog kratkog spoja pokazuje zavisnost naizmjenične struje na kratkospojenim priključcima statora  $I_K$ , kada je brzina obrtanja naznačena tj.

$$I_K = f(J_P) \text{ pri } U = 0 \text{ i } n = n_n .$$

Kod trofaznih mašina može da postoji jednopolni, dvoljni i tropolni kratki spoj u zvijezdi i trouglu (slika 2.3.).



Slika 2.3. Kratki spoj

Tropolni kratak spoj u trouglu nikad se ne koristi, jer ako bi ampermetre vezali u trougao imali bi linijske struje, koje mogu biti veoma različite zbog nejednakih otpora veza.

Trofazni kratak spoj u zvijezdi je simetričan, dok su jednofazni i dvofazni kratak spoj tipični primjeri nesimetričnog opterećenja sinhrone mašine.

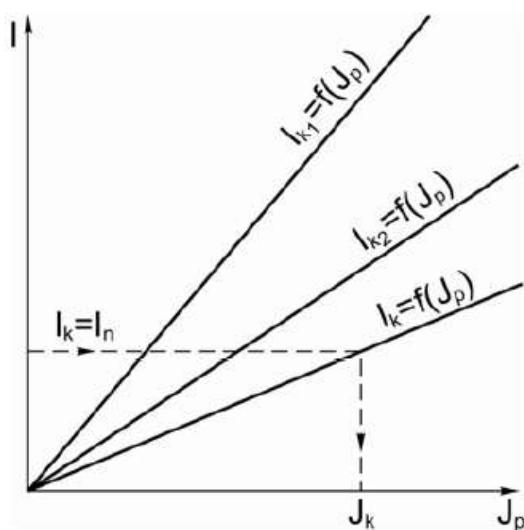
Kada govorimo o karakteristici kratkog spoja obično mislimo na tropolni kratak spoj.

Šema ispitivanja sinhrone mašine u ogledu kratkog spoja prikazana je na slici 2.21.

Tokom ogleda generator se preko tri ampermeta dovodi u kratak spoj. Kada se brzina dovede na naznačenu vrijednost, pobudna struja koja je do tada obavezno bila jednaka nuli postepeno se povećava. Za svaku vrijednost promjene pobudne struje potrebno je bilježiti pokazivanje tri ampermeta.

Mjerenje se vrši do vrijednosti struje kratkog spoja koja je nešto veća od nominalne struje generatora.

Na osnovu dobijenih rezultata nacrtat će karakteristika kratkog spoja predstavljena na slici 2.4. koja je prava linija.



Slika 2.4. Karakteristike kratkog spoja

Mogu se dobiti karakteristike pri dvopolnom  $I_{k2} = f(J_p)$  i jednopolnom kratkom spoju  $I_{k1} = f(J_p)$ .

Sa slike 2.4. može se vidjeti da su i ove karakteristike prave linije i da karakteristika jednopolnog kratkog spoja ima najveći nagib pa se može zaključiti da je jednopolni kratak spoj sinhrone mašine najteži.

Karakteristika kratkog spoja ne mora polaziti iz početka koordinatnog sistema već može biti pomjerena malo naviše uslijed remanentnog magnetizma.

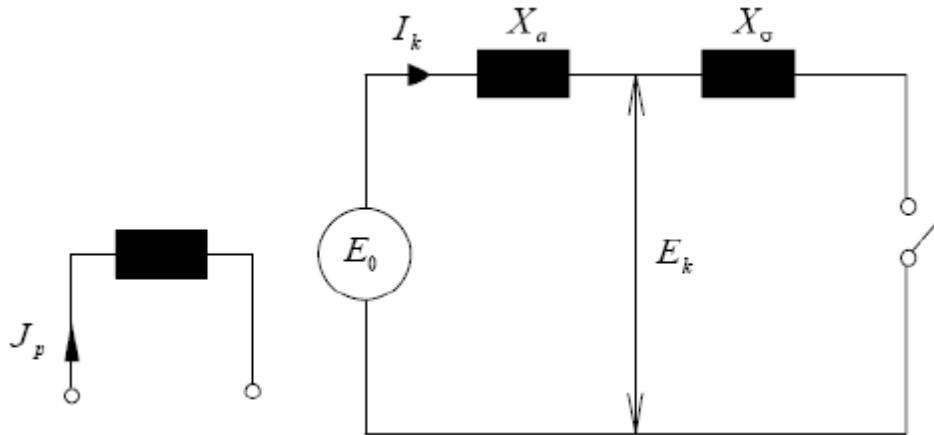
Jedan od važnih podataka o sinhranoj mašini pomoću kojeg se ocjenjuje uticaj reakcije indukta, a time i mogućnost promjene napona je tzv. odnos kratkog spoja  $K_k$ . On se definiše kao odnos pobudne struje  $J_0$ , pri kojoj se ima na karakteristici praznog hoda *ems* po vrijednosti

jednaka nominlnom naponu  $E = U_n$  i pobudne struje  $J_K$ , pri kojoj se ima na karakteristici kratkog spoja struja po vrijednosti jednaka nominalnoj struji  $I_K = I_n$  tj.:

$$K_k = \frac{J_0}{J_K} .$$

Značajan dodatak sa karakteristike ustaljenog kratkog spoja je vrijednost struje kratkog spoja  $J_K$ , pri kojoj se ima linijska struja kratkog spoja, po vrijednosti jednaka nominalnoj struji  $I_K = I_n$ .

Na slici 2.5. predstavljena je ekvivalentna šema sinhrone mašine u kojoj je zanemarena otpornost po fazi statora R.



Slika 2.5. Pojednostavljena šema sinhrone mašine u kratkom spoju

Kada je prekidač zatvoren, sinhroni generator je u kratkom spoju. Kada se pomoću pobudne struje podesi da je struja indukta jednaka nominalnoj struji  $I_K = I_n$ , rezultantna *ems* biće jednaka naponu rasipanja:

$$E_K = X_\sigma I_n .$$

Ovaj napon iznosi 10 do 20% nominalnog napona pa će prema karakteristici praznog hoda mašina biti sigurno u nezasićenom stanju.

Reaktansa reakcije indukta  $X_\sigma$ , biće nezasićena pa i zbir  $X_a + X_\sigma = X_S$  nazivamo nezasićenom reaktansom indukta.

Kod nezasićene mašine važi linearan odnos:

$$E_0 = X_{I2} J_P .$$

Prema ekvivalentnoj šemi sa slike 2.5. imamo da je:

$$E_0 = X_S I_K .$$

Kada se izjednače ove dvije jednačine dobija se:

$$X_{12}J_P = X_S I_K \text{ i}$$

$$I_K = \frac{X_{12}}{X_S} J_P = \frac{L_{12}}{L_S} J_P \sim J_P .$$

Pri kratkom spoju i mala vrijednost  $ems$  daje znatnu vrijednost struje indukta, magnetno kolo mašine nije zasićeno, pa su pobudna struja i struja indukta direktno srazmjerne. Pa je zbog toga karakteristika ustaljenog kratkog spoja prava linija kao što je prikazano na slici 2.6.

Pri eksperimentalnom određivanju karakteristike ustaljenog spoja brzina obrtanja ne mora biti tačno naznačena (nominalna). Pošto je odnos struja  $I_k / I_p$  jednak odnosu induktivnosti (ako je  $R$  malo). Dovoljno je da se brzina tokom ogleda ne razlikuje mnogo od naznačene.

## 2.2.2. Ogled udarnog kratkog spoja

Pored navedenog ispitivanja u ustaljenom kratkom spoju, sinhrone mašine se ispituju i u ogledu udarnog kratkog spoja. Ovim ogledom se pokazuju radne osobine sinhrone mašine u neuobičajenim pogonskim uslovima kada se očekuju razne prelazne pojave.

Cilj ovog ogleda je da odredimo strujni udar i tok svih struja u mašini tokom iznenadnog kratkog spoja, pri punom naponu na priključcima i pri naznačenoj učestanosti. Pored toga ovim ogledom provjeravamo mehaničku čvrstoću cijele konstrukcije ispitivane sinhrone mašine. Ogled udarnog kratkog spoja izvodi se iz prethodnog ogleda praznog hoda.

Naponi praznog hoda prije trenutka kratkog spoja mogu biti različiti. VDE propisi zahtijevaju da se struje kratkog spoja određuju za napon koji je za 5% veći od naznačenog napona mašine pa ispitivana mašina mora i mehanički podnijeti takav ogled.

Međutim, razni autori zastupaju različita mišljenja. Tako se sinhroni generatori snage do 60 MW ispituju naznačenim ili  $1,05 U_n$  naponom. U praksi je skoro nemoguće da u takvim uslovima dođe do kratkog spoja na priključcima mašine. Zbog toga su preporuke mnogih autora da se ogled izvodi sa 75% naznačenog napona, time se istovremeno smanjuje mogućnost oštećenja ili slabljenja izolacije.

Sinhroni generatori velikih snaga u pogonu se nalaze uvijek u bloku sa svojim transformatorom i svi rasklopni uređaji se nalaze tek iza transformatora. U tom slučaju svi kratki spojevi nastaju iza transformatora pa pored sinhrone reaktanse generatora na struju kratkog spoja utiče i reaktansa transformatora.

Zbog toga neki autori preporučuju da se sinhroni generatori snage iznad 60 MW i generatori u bloku sa transformatorom ispituju s polovinom naznačenog napona. Najbolje je da se prije ispitivanja s naručiocem dogovori o visini napona.

Za ogled s iznenadnim trofaznim kratkim spojem potrebno je na priključcima mašine obezbijediti jaku sklopku, čijim uključenjem kratko spajamo priključke ispitivane mašine. Ova sklopka se mora ispitati da li istovremeno zatvara sva tri kontakta.

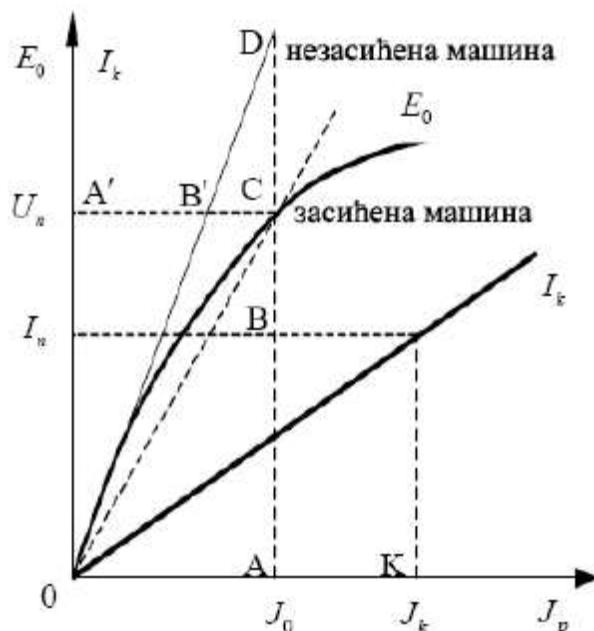
Za ispitivanje sinhronog generatora, u ogledu s iznenadnim kratkim spojem potrebno je da imamo pomoćni motor kojim tjeramo sinhroni generator do naznačene brzine obrtanja. Pomoćni motor se neposredno prije kratkog spoja odvoji od izvora energije. Pošto su u ovom ogledu sve pojave relativno brze za njihovo registrovanje koristimo oscilograf. On se aktivira istim impulsom kao i sklopka, na taj način oscilograf registruje i nekoliko perioda prije nego što se pojavi kratki spoj, jer sklopka uvijek zakasni.

Kod sinhronog motora cijeli ogled se izvodi na isti način.

Motor zaletimo do brzine nešto iznad sinhronih i pod punom pobudom odvojimo od izvora. Kada pri zaustavljanju ispitivani motor postigne sinhronu brzinu obrtanja, priključci mašine se kratko spajaju. Pomoću oscilografa registrujemo struju u sve tri faze, napon između dva priključka statorskog namota i struju rotora.

### 2.3. Određivanje podataka iz karakteristika praznog hoda i kratkog spoja

Na slici 2.6. zajedno su prikazane karakteristika praznog hoda i kratkog spoja.



Slika 2.6. Karakteristike praznog hoda i kratkog spoja

Sa ove slike mogu se odrediti neki veoma značajni podaci.

Sinhrona reaktansa nezasaćene mašine:

$$X_S = \frac{AD}{AB}$$

Ona predstavlja odnos napona praznog hoda sa tangente OD (mašina nezasićena) pri otvorenom prekidaču i struje kratkog spoja pri zatvorenom prekidaču (slika 2.5) za jednu istu, bilo koju, vrijednost pobudne struje.

Sinhrona reaktansa zasićene mašine:

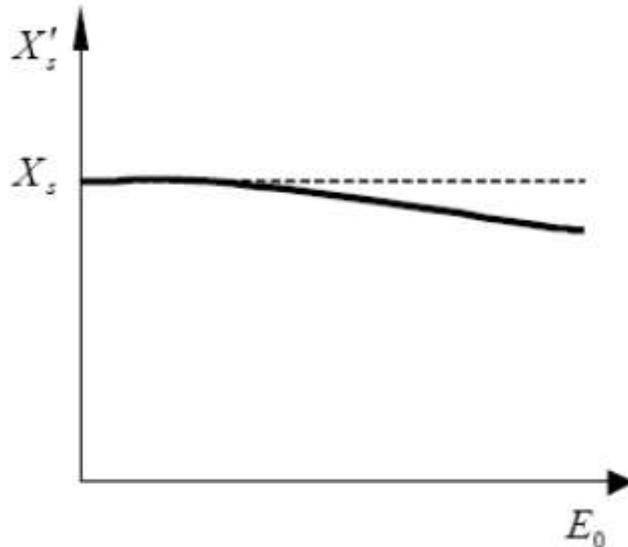
$$X'_S = \frac{AC}{AB} = \frac{U_n}{AB}$$

Ova reaktansa predstavlja odnos napona praznog hoda sa tangente OC (mašina zasićena) pri otvorenom prekidaču i struje kratkog spoja pri zatvorenom prekidaču (slika 2.5) za vrijednost pobudne struje  $J_0$ , koja odgovara naznačenom naponu.

Pojam ove sinhrone reaktanse je teorijski, pri čemu se za karakteristiku praznog hoda uzima prava OC.

Očigledno je  $X'_S < X_S$ .

Na slici 2.7 prikazana je zavisnost sinhrone reaktanse zasićene mašine  $X'_S$  u funkciji *ems* praznog hoda  $E_0$ .



Slika 2.7. Promjena sinhrone reaktanse u funkciji *ems* praznog hoda

Ova zavisnost se dobija iz odnosa  $\frac{AC}{AB}$  za razne vrijednosti pobudnih struja, pri čemu se tačka C kreće po karakteristici praznog hoda.

Sačinilac zasićenja:

$$K_Z = \frac{A'C}{A'B'} = \frac{AD}{AC} = \frac{X_S}{X'_{S'}}$$

Sačinilac zasićenja predstavlja odnos sinhrone reaktanse, nezasićene i zasićene mašine, i odgovara nezasićenom naponu ( $U_n$ ). Ima vrijednost veću od jedinice, prosječno 1,2.

Odnos kratkog spoja:

$$K_k = \frac{J_0}{J_k} = \frac{OA}{OK} \leq ili \geq 1 .$$

Mašine sa većim odnosom kratkog spoja mogu da izdrže veća preopterećenja, ali su takve mašine skuplje.

Kod hidrogeneratora odnos kratkog spoja se kreće od 0,8 do 1,8, a kod turbogeneratora od 0,5 do 1,0.

## 2.4. Karakteristika reaktivnog opterećenja

Karakteristika opterećenja je kriva koja pokazuje kako se mijenja napon na krajevima generatora u zavisnosti od pobude struje pri stalnoj struci opterećenja i kada je brzina obrtanja naznačena. Međutim, od svih mogućih karakteristika opterećenja najvažnija je ona koja se dobija pri nominalnom opterećenju i pri  $\cos\phi = 0(ind)$ , pa se ona naziva karakteristika reaktivnog opterećenja tj.

$$U = f(J_P), \quad I = const, \quad \cos\phi = 0(ind) \quad \text{pri } n = n_n .$$

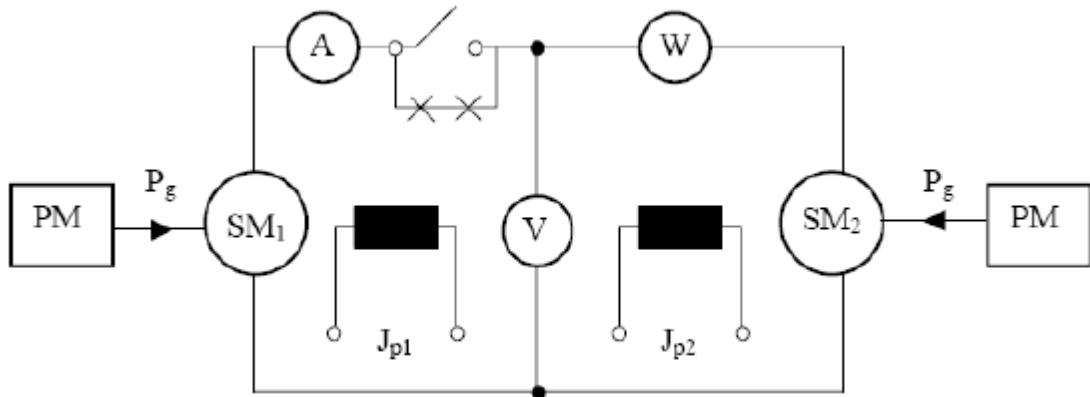
Iz ove karakteristike može se odrediti tzv. Potjeov trougao koji je osnova za određivanje promjene napona i pobudne struje po Potjeovoj metodi.

U principu reaktivno opterećenje sinhrone mašine može se dobiti priključivanjem na generator transformatora u praznom hodu, asinhronog motora u praznom hodu ili kondenzatora. Međutim, ne primjenjuje se u praski, ali se primjenjuje samo za generatore malih snaga koji se danas ne upotrebljavaju.

Najbolje je reaktivno opterećenje postići pomoću dvije sinhrone mašine. Na slici 2.8 prikazana je jednopolna šema za ovaj ogled.

U ogledu, kao što smo rekli, kristi se dvije sinhrone mašine od kojih jedna npr.  $SM_1$  proizvodi, a druga  $SM_2$  troši reaktivnu energiju.

Svaka od ovih mašina ima pogonsku mašinu koja pokriva gubitke pojedinih mašina u radu.



Slika 2.8. Dobijanje karakteristike reaktivnog opterećenja

Tokom ogleda, prvo se dotjeravanjem pobudne struje postigne naznačena brzina obrtanja, a potom se obe mašine pobude tako da im se naponi dotjeraju na nominalne vrijednosti.

Pomoću sinhronizacionih sijalica izvrši se sinhronizacija mašina, nakon čega se prekidačem zatvori strujno kolo.

Za dobijanje reaktivne karakteristike povećavamo pobudnu struju jedne mašine, a smanjujemo pobudnu struju druge mašine.

To se ponavlja dok se ne postigne napon nešto viši od naznačenog napona, a struja  $I = I_h$ .

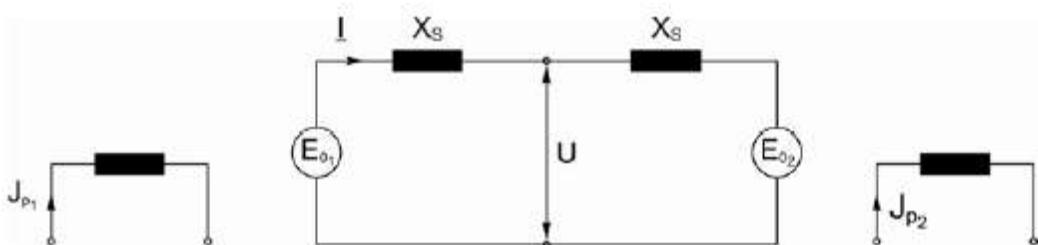
Na taj način dobijamo jednu tačku karakteristike reaktivnog opterećenja. Da bi dobili druge tačke karakteristike, smanjujemo pobudnu struju jedne mašine, a pobudnu struju druge mašine za onoliko koliko je potrebno da struja bude nominalna, tada se smanji i napon.

Tokom ogleda mora se stalno kontrolisati da učestanost bude nominalna (djelovanjem na brzinu pogonskih motora) i da vatmetar pokazuje snagu jednaku nuli (djelovanjem na pobudne struje sinhronih mašina), kako bi se imao  $\cos\phi = 0$ .

Kada se smanjivanjem vrijednosti pobudnih struja dođe na suviše male vrijednosti, a time i do male vrijednosti napona, dolazi do njihanja sinhronne mašine.

Instrumenti to registruju oscilovanjem kazaljki, njihovo očitanje više nije moguće i potrebno je odmah isključiti sve prekidače.

Ekvivalentna šema koja odgovara spregnutim dviju mašina prikazan je na slici 2.9.



Slika 2.9. Ekvivalentna šema dviju spregnutih mašina

Struja opterećenja (prepostavlja se da su mašine nezasićene):

$$I = \frac{E_{01} - E_{02}}{2X_S},$$

a napon:

$$U = \frac{E_{01} + E_{02}}{2}.$$

Pri reaktivnom opterećenju imamo jednostavnu aritmetičku relaciju između pobudnih struja:

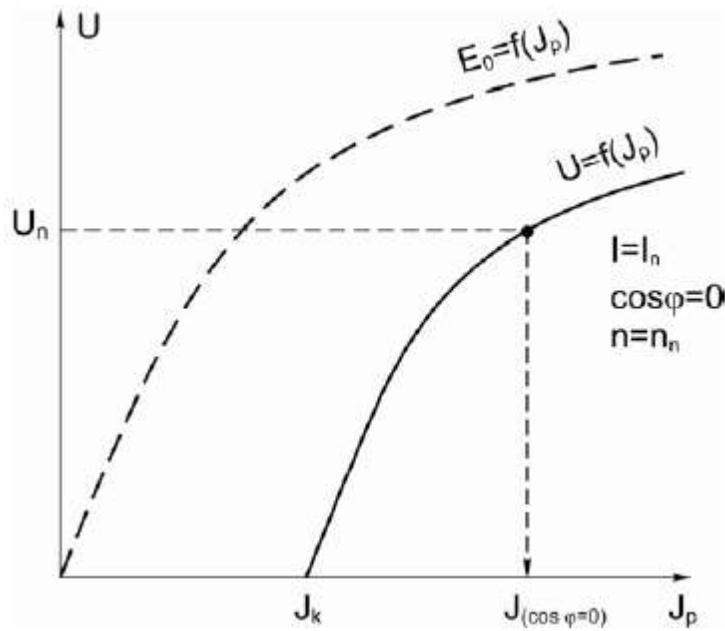
$$J_p = J + J_a,$$

kao i između ems E i napona U:

$$E = U + X_\sigma I.$$

Na osnovu dobijenih rezultata nacrtan je karakteristika reaktivnog opterećenja.

Na slici 2.10. prikazana je karakteristika reaktivnog opterećenja sinhronne mašine SM<sub>1</sub>, pored nje zbog sličnosti, prikazana je i karakteristika praznog hoda.



Slika 2.10. Karakteristika reaktivnog opterećenja

Dva su značajna podatka sa karakteristike reaktivnog opterećenja. Prvi je vrijednost pobudne struje  $J_{\cos\varphi=0}$  koja odgovara nominalnom naponu, a drugi podatak je vrijednost pobudne struje  $J_k$  koja odgovara naponu jednakom nuli (ista pobudna struja koja se dobije iz karakteristike kratkog spoja).

Karakteristika reaktivnog opterećenja je skoro paralelna sa karakteristikom praznog hoda. Karakteristike opterećenja se mogu dobiti i za druge faktore snage, ali one nisu „paralelne” sa karakteristikom praznog hoda.

## 2.5. Određivanje promjene napona i pobudne struje

Određivanje promjene napona i pobudne struje spada u veoma važne zadatke analize rada i ispitivanja sinhronih generatora. U slučaju naglog rasterećenja mašine od mreže mogu se pojaviti velike promjene napona. Promjena napona može da se zahtjeva i određuje poslije različitih opterećenja (po vrijednosti i karakteru), ali se ona najčešće posmatra poslije nominalnog opterećenja.

Sinhroni generator najčešće radi sa induktivnim sačiniocem snage, tako da pri naglom rasterećenju sa mreže dolazi do povećanja napona. Kada bi generator radio pri kapacitivnom opterećenju onda bi pri naglom rasterećenju od mreže moglo doći do smanjenja napona.

Kada je sinhrona mašina nominalno opterećena ( $In$ ) pri naznačenom naponu ( $Un$ ), onda pri naglom rasterećenju od mreže, napon koji je tada jednak  $ems$  naglo će porasti. Ta razlika između  $ems$  praznog hoda i naznačenog napona pri istoj brzini mašine i istoj pobudnoj struji, kao i pri nominalnom opterećenju naziva se promjena napona tj.

$$\Delta U = E_0 - U_n .$$

Ova promjena napona, obično se izražava u procentima u odnosu na nominalni napon:

$$u = \frac{E_0 - U_n}{U_n} \cdot 100\% .$$

Kod rasterećenja sa naznačenog opterećenja na opterećenje nula (prazan hod), napon kod naznačene učestanosti i odgovarajuće pobudne struje koja ostaje konstantna, ne smije da poraste više od 50% pri  $\cos\varphi=0,8$  kod mašina malih snaga, odnosno 30% kod mašina srednjih snaga.

Ako je za dato opterećenje sinhronog generatora  $U$ ,  $I$  i  $\cos\varphi_{(ind)}$  potrebno odrediti promjenu napona  $\Delta U$ , i pobudne struje služimo se sljedećim posrednim metodama:

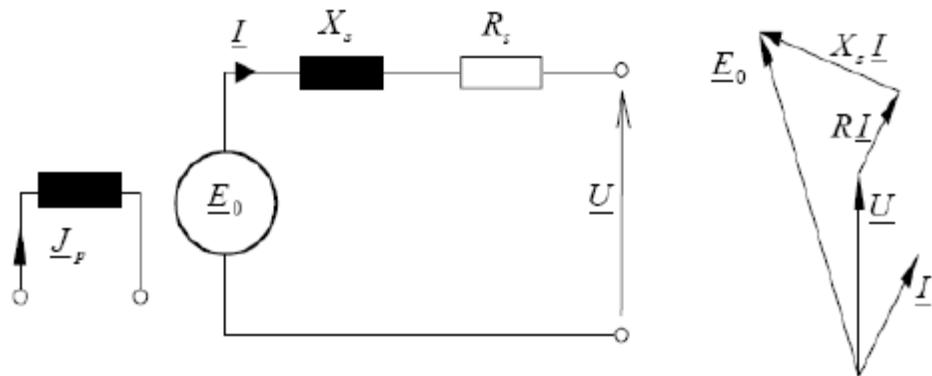
- Ben-Ešenburgova,
- Potjeova i
- Blondelova.

Ni jedna od ovih metoda nije savršena. U praksi se najviše koristi Potjeova metoda, a pri orijentacionim postupcima Ben-Ešenburgova metoda. Zbog toga će ove dvije metode biti posebno obrađene.

### 2.5.1. Ben-Ešenburgova metoda

Ovo je najjednostavnija metoda, ali pretpostavlja da mašina nije zasićena i da je sa cilindričnim rotorom. Za primjenu ove metode potrebno je poznavati vrijednost otpora statorskog namota  $R$  (koji se dobija u posebnom ogledu mjerjenja pomoću  $U-I$  metode) i sinhrone reaktanse  $X_s$ . Ova sinhrona reaktansa određuje se iz karakteristika kratkog spoja i praznog hoda kako što je opisano u 2.3.

Mašina se smatra nezasićenom ( $X_s=\text{const.}$ ), pa se koristi ekvivalentna šema sa konstantnim parametrima slika 2.11.



Slika 2.11. Ekvivalentna šema i fazorski dijagram nezasićene sinhrone mašine

Računski pomoću jednačine:

$$\underline{E}_0 = \underline{U} + R\underline{I} + jX_s\underline{I},$$

odredi se *ems*  $E_0$ , a pomoću nje izračuna promjena napona:

$$\Delta U = E_0 - U_n.$$

Potrebna pobudna struja  $J_P$  odredi se koristeći karakteristiku praznog hoda nezasićene mašine (pravac OD na slici 2.6.).

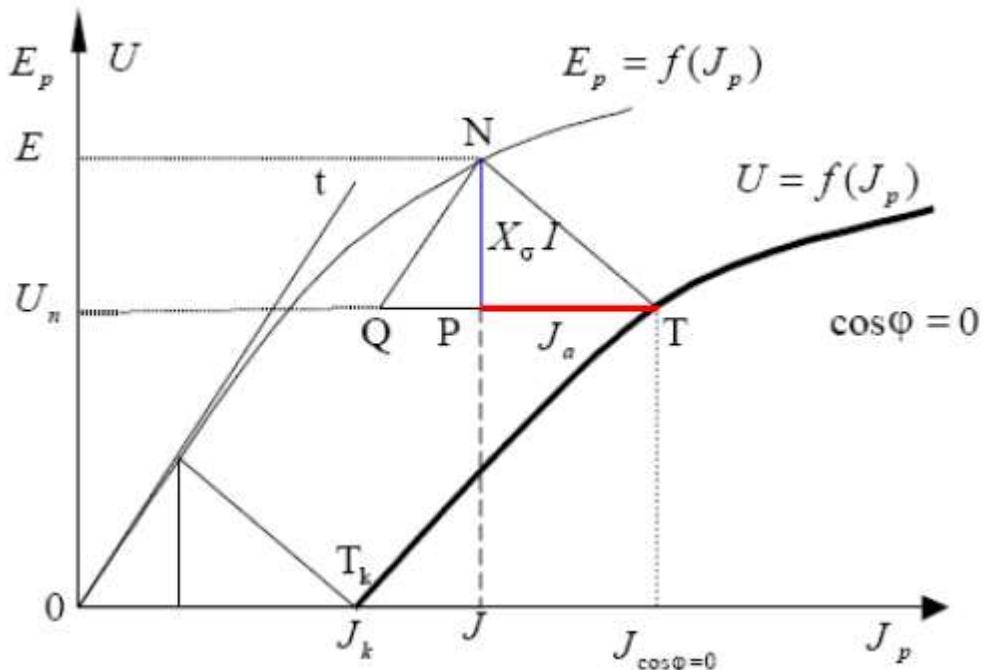
Uticaj zasićenja može se procijeniti uzimanjem u računski postupak zasićenje sinhrone reaktanse  $X_s'$  i koristeći karakteristiku praznog hoda zasićene mašine (pravac OC na slici 2.6.).

## 2.5.2. Potjeova metoda

Ova metoda, za razliku od Ben-Ešenburgove uzima u obzir zasićenje mašine, ali ne i istaknutost polova.

Ona se bazira na sabiranju mps odnosno pobudnih struja. Za ovu metodu potrebno je poznavati vrijednost otpora statorskog namota  $R$ , vrijednost rasipne reaktanse  $X_\sigma$ , (Potjeova reaktansa) ili pad napona na rasipnoj (Potjeovoj) reaktansi  $X_\sigma I$ , i struju statora svedenu na rotora  $J_a$ .

Otpor namota statora  $R$  određujemo u posebnom ogledu, a pad napona  $X_\sigma I$ , i struju  $J_a$ , određujemo iz Potjeovoj trougla.



Slika 2.12. Konstrukcija Potjeovog trougla

Za konstrukciju Potjeovog trougla (slika 2.12) potrebno je poznavati: karakteristiku praznog hoda, kratkog spoja i karakteristiku reaktivnog opterećenja. Nije potrebna cijela karakteristika reaktivnog opterećenja, već samo tačka koja je određena naznačenom strujom, naznačenim naponom i sačiniocem snage  $\cos\varphi_{(ind)}=0$ , a kod karakteristike kratkog spoja dovoljna je samo tačka za nazivnu struju. Na istom dijagramu nacrtata se karakteristika praznog hoda i reaktivnog opterećenja, a potom sljedećim postupkom konstruiše Potjeov trougao:

- na početni dio karakteristike praznog hoda povuče se tangenta Ot;
- na apscisu se ucrtava tačka  $T_k$ , koja je dobijena iz karakteristike kratkog spoja pri datoј struci i  $I_k=I_n$ ;

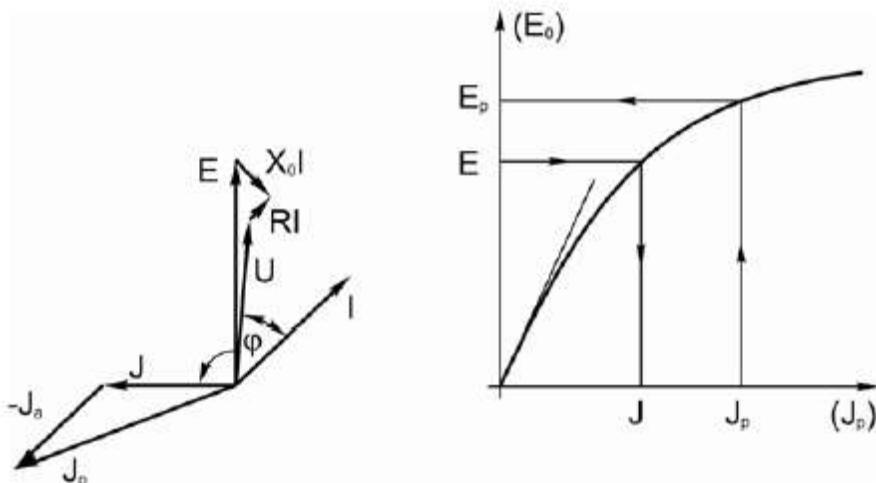
- za napon  $U_n$ , povuče se prava paralelna sa apscisnom osom i na karakteristici reaktivnog opterećenja odredi tačka T, pobudna struja u tački T označena je sa  $J_{cos\varphi=0}$ ;
- od tačke T na lijevo po toj pravoj nanese se duž  $\overline{OT_k}$  i tako odredi tačka Q ( $\overline{OT_k} = \overline{TQ}$ );
- iz tačke Q povuče se prava paralelna sa tangentom na početni dio karakteristike praznog hoda (Ot). Ova prava će karakteristiku praznog hoda sjeću u tački N;
- iz tačke N spusti se vertikala koja presjeca duž  $\overline{TQ}$  u tački P, koja predstavlja treći vrh Potjeovog trougla;
- trougao NTP predstavlja Potjeov trougao čije su katete:
  - $\overline{NP} = X_\sigma I = E - U$  - pad napona na rasipnoj reaktansi (napon rasipanja), tzv. Potjeov napon  $U_{Pot}$  i
  - $\overline{PT} = J_a = J_p - J$  - pobudna struja koja odgovara struji indukta  $I$ .

Potjeova metoda se bazira na primjeni stvarne karakteristike praznog hoda, vektorskog dijagrama (slika 2.13) i sljedećih jednačina:

$$\underline{E} = \underline{U} + R\underline{I} + jX_\sigma \underline{I}$$

$$\underline{I} = \underline{J}_p - \underline{J}_a$$

uz pretpostavku da je Potjeov trougao nepromjenjiv sa zasićenjem.



Slika 2.13. Vektorski dijagram i karakteristika praznog hoda

Iz Potjeovog trougla odredi se pad napona  $X_\sigma I$ , i struja  $J_a$ , pa se iz jednačine:

$$\underline{E} = \underline{U} + R\underline{I} + jX_\sigma \underline{I}$$

može izračunati rezultantna *ems*  $E$ .

Prema ovoj *ems*  $E$  iz stvarne karakteristike praznog hoda očita se pobudna struja  $J$  (slika 2.13 ) koja je pomjerena ispred *ems*  $E$  za  $90^\circ$ .

Pobudna struja rotora  $J_p$ , određuje se grafički sabiranjem vektora  $\underline{J}$  i  $\underline{J}_a$  ( $J_p = \underline{J} - \underline{J}_a$ ), s tim da je vektor  $-\underline{J}_a$ , paralelan sa vektorom struje opterećenja  $\underline{I}$ . Dalje se prema pobudnoj strui  $J_p$ , iz karakteristike praznog hoda očita odgovarajuća *ems* uslijed pobude  $E_p$ .

Sada, kada je izračunata *ems*  $E_0$  može se izračunati promjena napona:

$$\Delta U = E_0 - U_n .$$

Potjeova metoda se po pravilu primjenjuje samo za sinhrone generatore sa cilindričnim rotorom (turbogeneratori), pošto tada nije potrebno reaktansu indukta  $X_a$ , razlagati na podužnu (uzdužnu)  $X_{ad}$ , i poprečnu  $X_{aq}$ , komponentu.

Međutim, primjena Potjeove metode na mašine sa istaknutim polovima (hidrogeneratori) daje prilično zadovoljavajuće rezultate. U tom slučaju, treba voditi računa da je karakteristika reaktivnog opterećenja ( $\cos\phi_{ind}=0$ ) za hidrogeneratore pomjerena nešto u desno pa se dobija i nešto veća vrijednost *mps* indukta.

Pošto se podaci za hidrogeneratore dobijeni iz karakteristike praznog hoda i reaktivnog opterećenja, ipak razlikuju od onih dobijenih neposredno iz opterećenja generatora i njegovog naglog rasterećenja, predloženo je više načina za dobijanje potrebne promjene napona i pobudne struje, koji predstavljaju neku modifikaciju Potjeove metode.

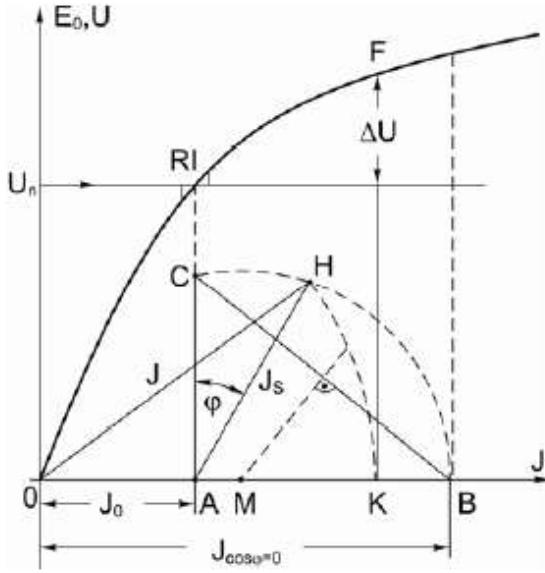
Ovdje su obrađena dva načina: švedski i američki dijagram.

### 2.5.3. Švedski dijagram

Švedanin Vanerberg predložio je uprošćen dijagram za određivanje pobudne struje  $J$  i promjene napona  $\Delta U$  pri raznim opterećenjima.

Za konstrukciju švedskog dijagrama, pored karakteristike praznog hoda potrebno je poznavati vrijednost pobudne struje pri kratkom spoju  $J_k$  i vrijednost pobudne struje pri reaktivnom opterećenju i nominalnom naponu  $J_{\cos\phi=0}$ .

Pri konstrukciji švedskog dijagrama prvo se na karakteristici praznog hoda  $E_0=f(J_p)$  odredi, kao što je prikazano na slici 2.14., potrebna pobudna struja  $J_0$  koja odgovara nominalnom naponu ( $J_0 = \overline{OA}$ ). Zatim se na apscisu nanese pobudna struja pri reaktivnom opterećenju  $J_{\cos\phi=0}$  koja odgovara nominalnom naponu ( $J_{\cos\phi=0} = \overline{OB}$ ). U krajnjoj tački pobudne struje pri praznom hodu (tačka A) povuče se normala jednaka struji kratkog spoja  $J_k$ , tako se dobija tačka C. Za mašine čija je snaga ispod 100kW ova vrijednost se povećava za oko 10%, za mašine srednje snage (nekoliko stotina kW) za 5%, a za mašine većih snaga do 2%.



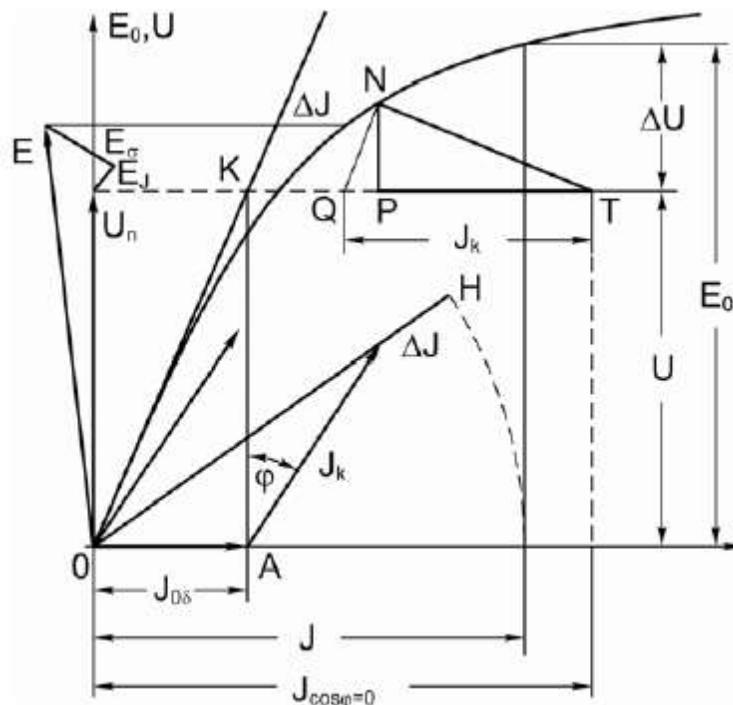
Slika 2.14. Švedski dijagram

Kroz tako dobijenu tačku C i tačku B (krajnja tačka struje  $J_{cos\varphi=0}$ ) konstruišemo krug čiji se centar M nalazi na apscisi. Sad se za nominalnu struju opterećenja pri ma kome sačiniocu snage, nanese duž  $\overline{AH}$  pod uglom  $\varphi$  na  $\overline{AC}$ . Tako se dobija duž  $\overline{OH}$  koja predstavlja pobudnu struju pri opterećenju ( $J=\overline{OH}$ ). Kad se ova pobudna struja prenese na apscisu dobija se duž  $\overline{OK}$ , njoj odgovara ems  $E_0$  ( $E_0=\overline{OK}$ ), odnosno pad napona  $\Delta U$ , za odgovarajući sačinilac snage.

Švedski dijagrami vode računa i o omskom padu napona, pa se za pobudnu struju prema slici 2.14. dobijaju male razlike u zavisnosti da li mašina radi u režimu motora ili generatora. Pošto je omski pad napona mnogo manji od induktivnog, o ovim razlikama nije potrebno voditi računa.

#### 2.5.4. Američki dijagram

Prema američkim standardima za određivanje promjene napona i pobudne struje pri opterećenju potrebno je imati: karakteristiku praznog hoda  $E_0=f(J_p)$ , vrijednost pobudne struje pri kratkom spoju  $J_k$ , i vrijednost pobudne struje pri reaktivnom opterećenju  $J_{cos\varphi=0}$  za naznačeni napon  $U_n$ , i naznačenu struju ( $I=I_n$ ).



Slika 2.15. Američki dijagram

Pri konstrukciji (slika 2.15.) američkog dijagrama prvo se nacrtava karakteristika praznog hoda, zatim se na apscisi nanese pobudna struja pri reaktivnom opterećenju ( $J_{\cos\varphi=0}$ ) i na taj način dobije tačka T. Ova tačka predstavlja tačku karakteristike reaktivnog opterećenja. Od nje se u lijevo nanese pobudna struja pri kratkom spoju  $J_k$ , koja odgovara struju statora  $I_k=I_n$  i na taj način dobije tačka Q. Iz ove tačke se povuče prava paralelno sa tangentom na početni dijagram karakteristike praznog hoda i dobije tačka N. Duž  $\overline{NP}$  predstavlja *ems rasipanja*  $E_\sigma$ . Sada se na  $U_n$  (koji je na ordinati) povuku vektori  $R\bar{I}$  i  $E_\sigma$  pa se dobije rezultantna *ems* E. Ona se prenese na ordinatu, a odatle povuče prava paralelno sa apscisom do presjeka sa karakteristikom praznog hoda. Na taj način se dobije dužina  $\Delta J$  koja predstavlja porast pobudne struje uslijed zasićenja. Na apscisi se uzima dio struje praznog hoda koji bi odgovarao linearnom dijelu karakteristike praznog hoda (međugvožđu), koja se dobija spuštanjem normale iz tačke K. Njoj se vektorski, doda pod uglom  $\varphi$  na normalu pobudna struja pri kratkom spoju  $J_k$ , a njihovoj rezultanti doda se algebarski porast pobudne struje uslijed zasićenja ( $\Delta J$ ). Tako dobijena duž predstavlja ukupnu pobudnu struju J. Ova pobudna struja prenosi se na apscisu i njoj odgovara, na karakteristici praznog hoda, *ems*  $E_0$ , odnosno promjena napona  $\Delta U$ .

## 2.6. Gubici i stepen iskorištenja sinhrone mašine

Stepen iskorištenja (snage) predstavlja jednu od najbitnijih karakteristika svake električne mašine pa i sinhrone.

Propisi zahtjevaju da se stepen iskorištenja sinhrone mašine određuje isključivo po metodi odvojenih gubitaka.

Za generatorski režim rada stepen iskorištenja je:

$$\eta_G = \frac{P}{P_1} = \frac{P}{P + P_g}, \quad P = \sqrt{3}UI \cos \varphi,$$

a za motorski režim rada:

$$\eta_M = \frac{P_1 - P_g}{P_1} = 1 - \frac{P_g}{P_1}, \quad \text{gdje je:}$$

$P_1$  - ulazna (uložena) snaga,

$P$  - korisna (odvedena, izlazna) snaga i

$P_g$  - ukupni gubici u mašini.

Kao što se vidi, za određivanje stepena iskorištenja sinhrone mašine, bilo da ona radi kao generator ili motor neophodno je poznavati ukupne gubitke u mašini. Ovi gubici su isti i za generatorski i za motorski režim rada. Ukupni gubici u mašini predstavljaju razliku između uložene i korisne snage, kod sinhrone mašine mogu se predstaviti na sljedeći način:

$$P_g = P_f + P_{Fe} + P_{Cus} + P_p + P_d.$$

Gubici uslijed obrtanja (tzv. uži gubici praznog hoda) određuju se iz ogleda praznog hoda u režimu generatora ili motora ili po metodi zaustavljanja. Sastoje se od:

- mehaničkih gubitaka  $P_f$
- gubitaka u gvožđu  $P_{Fe}$ .

Mehanički gubici sadrže:

- Gubitke na trenje u ležištima. Ovi gubici zavise od brzine obrtanja  $n$ , vrste i veličine ležišta kao i od načina izvođenja generatora, odnosno da li je položaj horizontalan ili vertikalnan;
- Gubitke na trenje dirki o prstenove koji zavise od pritiska kojim dirke naliježu na prstenove, od ukupne površine dirki, od koeficijenta trenja i brzine kojom se prstenovi obrću;
- Ventilacione gubitke, a oni sadrže gubitke na trenje rotora o vazduh i gubitke na provjetravanje. Pošto se sam rotor ponaša kao ventilator, i na to se troši jedan dio snage. Kod svih sinhronih generatora velikih snaga neophodno je pomoću posebnog ventilatora hlađenje sa zatvorenom cirkulacijom rashladnog fluida, odnosno odvođenje većeg dijela gubitaka koji nastaju u mašini.

Svi mehanički gubici u zavisnosti od opterećenja su konstantni pošto je brzina obrtanja stalna.

Gubici u gvožđu po svojoj prirodi spadaju u magnetne gubitke. Prema lokaciji ovi gubici mogu se podijeliti na gubitke u zupcima  $P_{FeZ}$  i gubitke u jezgru statora  $P_{Fej}$ . Gubici snage u zupcima iznose:

$$P_{FeZ} = p(\eta f + \sigma f^2)m_{FeZ}B_{mz}^2 , \quad \text{gdje su:}$$

$\eta$  - histerezisni sačinilac,

$\sigma$  - sačinilac vihornih struja,

$m_{FeZ}$  - masa zubaca,

$p$  - koficijent uslijed obrade limova ( koji se kreće do 1,2) i

$B_{mz}$  - indukcija na dvije trećine visine zuba.

Gubici snage u jezgru statora su:

$$P_{Fej} = p(k_H\eta f + k_F\sigma f^2)m_{Fej}B_{mj}^2 , \quad \text{gdje su:}$$

$m_{Fej}$  - masa jezgra statora,

$B_{mj}$  - indukcija u jezgru,

$k_H$  - sačinilac popravke za histerezisni dio gubitaka i

$k_F$  - sačinilac popravke za dio gubitaka uslijed vrtložnih struja.

Histerezisni gubici rastu približno proporcionalno s frekvencijom, dok su gubici uslijed vrtložnih struja proporcionalni kvadratu frekvencije:

$$P_{Fe} = P_{Feh} + P_{FeVS} = C_1f + C_2f^2 .$$

Gubici u bakru (Džulovi gubici u namotu statora)  $P_{CuS}$  , određuju se računski

$$P_{CuS} = 3R_f I_f^2 = 1,5R_j I^2$$

iz izmjerenoj otpora  $R$  i poznate struje  $I$ . Prilikom mjerjenja otpora namota  $R$  upotrebljavaju se instrumenti za jednosmjernu struju. Ako je omski otpor namota pri proticanju jednosmjerne struje  $R_j$ , onda je zbog nejednakosti gustine struje po presjeku provodnika  $R > R_j$ .

O ovome se vodi računa uvođenjem Fildovog koeficijenta  $k_F$  , pa je:

$$R = k_F R_j \quad \text{i} \quad P_{Cu} = 1,5k_F R I^2 .$$

Kod sinhronih mašina velikih snaga velike su i struje statora pa je potrebno da provodnici budu velikog presjeka. Zbog nejednake raspodjele gustine struje kod provodnika većih presjeka dolazi do povećanja Fildovog koeficijenta odnosno do povećanja otpora  $R$ .

Da bi se smanjio Fildov koeficijent, potrebni veliki presjeci za provodnike statora ne prave se od jednog masivnog provodnika nego od većeg broja djelimičnih provodnika.

Ovi provodnici se upredaju tako da jednakim dijelovima svakog djelimičnog provodnika zauzimaju sve položaje po dužini žlijeba tzv. Röbel-ov provodnik.

Pobudni gubici ili gubici snage u bakru rotora  $P_P$ , određuju se na osnovu pobudnog napona  $U_P$ , i pobudne struje  $J_P$ , koja se može dobiti pomoću Potjećeve metode:

$$P_P = U_P J_P .$$

Pošto svi sinhroni generatori većih snaga imaju prigradene pobudne mašine onda su pobudni gubici jednakim korisnoj snazi pobudne mašine. U tom slučaju potrebno je znati stepen iskorištenja pobudne mašine. Ovi gubici zajedno sa Džulovim gubicima u namotaju statora pripadaju električnim gubicima. Dopunski gubici  $P_d$ , dijele se na dva dijela: gubitke koji se javljaju na površinama zubaca i polnih nastavaka, uslijed vihornih struja koji su posljedica kolebanja magnetnog fluksa u međugvožđu.

Pošto magnetni fluks u međugvožđu zavisi od toga da li se naspram neke posmatrane tačke u međugvožđu nalazi zubac ili žlijeb, drugi dio dopunskih gubitaka čine tzv. pulsacioni gubici. Ovi gubici javljaju se u unutašnjosti zubača uslijed pulsacije (kolebanja) indukcije u zubcima. Zbog velike dužine međugvožđa kod sinhronih mašina ovi gubici čine znatno manji dio dopunskih gubitaka.

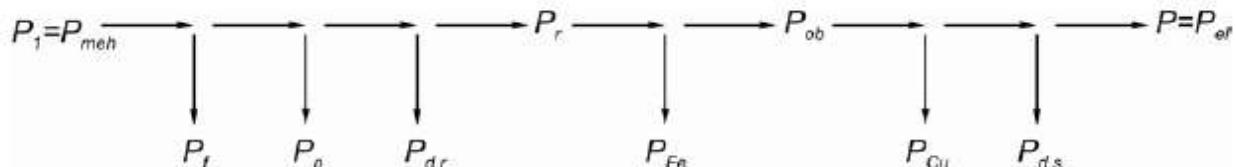
Za dopunske gubitke smatramo da su poput gubitaka u bakru proporcionalni kvadratu struje što znači da ovi gubici zavise od opterećenja.

Ovi gubici se mijere u ogledu kratkog spoja u režimu generatora pri reaktivnom opterećenju mašine u režimu motora u praznom hodu ili po metodi zaustavljanja mašine u kratkom spoju.

Ukupni gubici u mašini:

$$P_g = P_{fv} + P_{Fe} + 1,5RI^2 + P_d + U_P J_P .$$

Struktura gubitaka sinhronog generatora prikazana je na slici 2.16.



Slika 2.16. Struktura gubitaka sinhronog generatora

Sa slike 2.16. možemo vidjeti da je utrošena snaga generatora mehanička. Od nje se prvo odbijaju mehanički gubici, dalje se snaga troši na pobudu i na dopunske gubitke u rotoru. Tako dolazimo do korisne snage rotora:

$$P_r = P_1 - P_f - P_p - P_{d,r} .$$

Ova snaga se putem obrtnog polja prenosi na stator i predstavlja utrošenu snagu statora. Od ove snage jedan dio se troši na gubitke u gvožđu, a ostatak snage predstavlja snagu obrtnog polja  $P_{ob}$ :

$$P_{ob} = P_r - P_{Fe} .$$

Ova snaga se u namotima statora pretvara u električnu. Jedan dio ove električne snage se dalje troši na gubitke u bakru i na dopunske gubitke u statoru. Tako da na izlazu dobijamo korisnu električnu snagu generatora, koja predstavlja razliku između uložene mehaničke snage i ukupnih gubitaka u generatoru:

$$P = P_1 - P_f - P_p - P_{d,r} - P_{Cu} - P_{d,S} = P_1 - P_g .$$

## 2.6.1. Gubici u praznom hodu

Moguća su dva postupka za ispitivanje sinhrone mašine u praznom hodu:

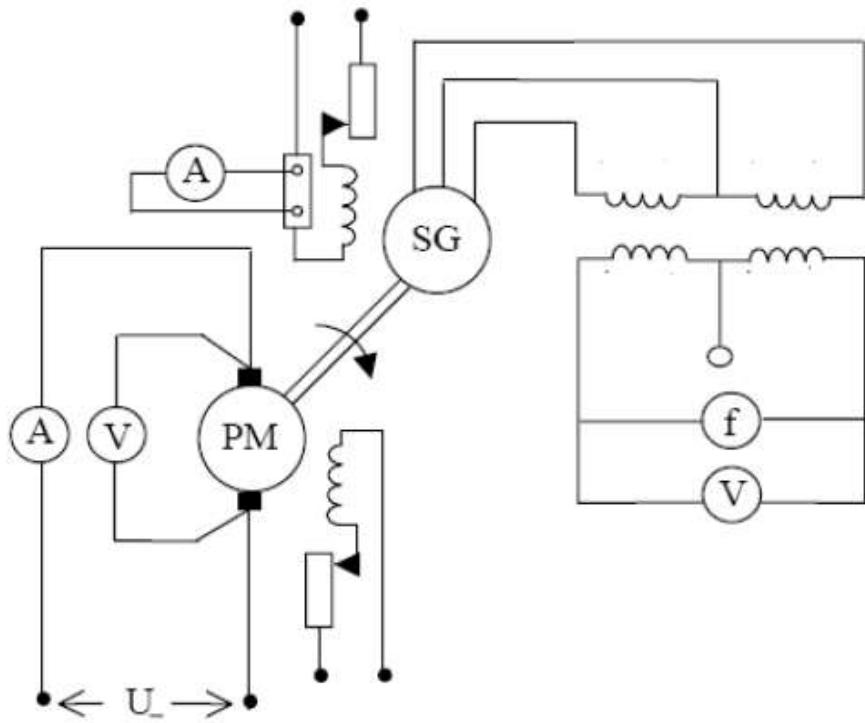
- generatorski i
- motorski.

Ako se za vrijeme ispitivanja sinhrone mašine u praznom hodu mjeri mehanička snaga potrebna za njen pogon, mogu se dobiti gubici uslijed obrtanja u praznom hodu. Ukupni gubici praznog hoda, za generatorski postupak sadrže gubitke uslijed obrtanja (tzv. uže gubitke praznog hoda) i gubitke pobude. Pored ovih gubitaka u motorskom postupku javljaju se i Džulovi gubici u namotu statora.

Pobudni gubici često se izdvajaju iz ukupnih gubitaka praznog hoda, jer se pokrivaju snagom pobude i mogu se odvojeno mjeriti za bilo koje pogonsko stanje mašine.

### 2.6.1.1. Generatorski postupak

Kod generatorskog postupka pored ispitivane sinhrone mašine potrebno je imati i pogonsku mašinu PM koja je sa ispitivanom mašinom mehanički spregnuta kao na slici 2.17.



Slika 2.17. Šema ispitivanja za generatorski postupak praznog hoda

Zahvaljujući ovoj mehaničkoj vezi pogonska mašina predaje ispitivanoj mehaničku snagu. Korisna snaga pogonske mašine treba da odgovara samo gubicima ispitivane mašine.

Pošto je cilj ogleda odrediti gubitke u ispitivanoj mašini neophodno je izmjeriti korisnu snagu pogonske mašine  $P_0$ .

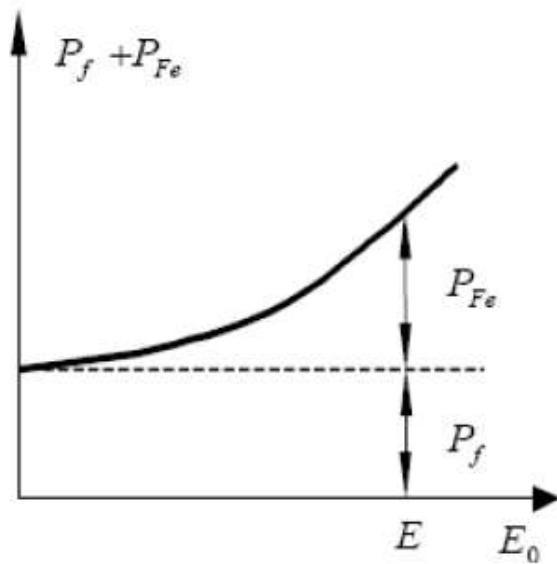
Pri sinhronoj brzini i različitim vrijednostima struje pobude mjeri se korisna snaga  $P_0$  koju pogonska mašina predaje ispitivanoj, a koja se nalazi u praznom hodu. To znači da je pogonska mašina po konstrukciji elektrodinamometar, torziometar ili električna mašina sa poznatim gubicima. Ako se u ovom ogledu kao pogonska koristi baždarena mašina, korisna snaga pogonske mašine određuje se:

$$P_0 = U_{PM} I_{PM} - P_{g,PM} .$$

Ova snaga odgovara užim gubicima praznog hoda:

$$P_0 = P'_0 = P_f + P_{Fe} .$$

Kao što je prikazano na slici 2.18. moguće je razdvojiti uže gubitke praznog hoda. Gubici pri nominalnom naponu očitaju se sa slike 2.18. prema *ems*  $E$  (iz Potjeove metode) ili jednostavno prema nominalnom naponu.



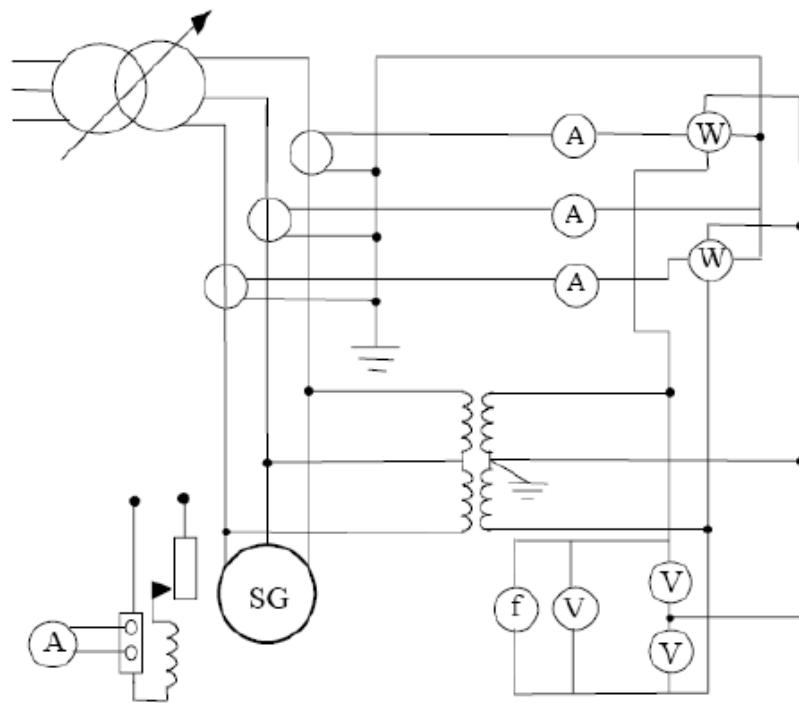
Slika 2.18. Karakteristika užih gubitaka praznog hoda

Generatorski postupak za razliku od motorskog ne upotrebljava mrežu s mogućnošću regulacije napona što predstavlja veliku prednost ovog postupka. Pored toga za određivanje karakteristike praznog hoda sinhronne mašine najčešće se koristi generatorski postupak.

### 2.6.1.2. Motorski postupak

Kod ovog postupka ulazna snaga ispitivane mašine je električna i mnogo lakše se mjeri u odnosu na generatorski gdje je ulazna snaga mehanička.

Sinhrona mašina napaja se iz mreže preko regulacionog transformatora (slika 2.19.), a frekvencija se održava konstantnom.

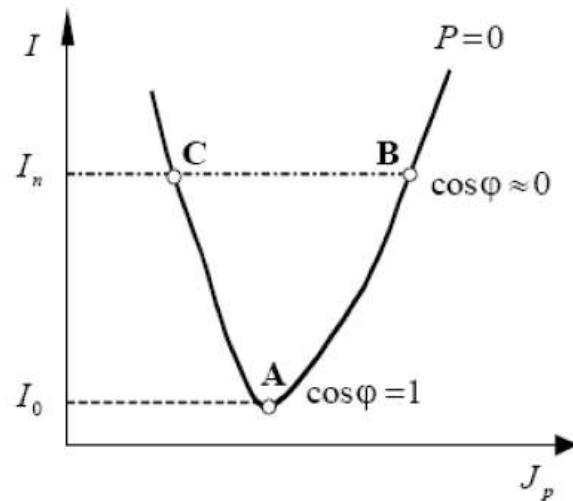


Slika 2.19. Šema ispitivanja u motorskom praznom hodu

Tokom ogleda regulacionim transformatorom postepeno se povećava napon, kada brzina poraste skoro do sinhronog uključuje se pobuda i ispitivana mašina sinhronizuje (asinhroni zalet).

Korištenjem odgovarajućih instrumenata mjeri se frekvencija i napon na priključcima, struja u sve tri faze, pobudna struja i snaga koju ispitivana mašina uzima iz mreže na koju je priključena.

Praktikuju se dva mjerenja pri nominalnoj  $I_n$ , i minimalnoj struji statora  $I_0$ , (slika 2.20.).



Slika 2.20. Zavisnost struje opterećenja od struje pobude u motorskom praznom hodu

Željeni režimi A, B ili C ostvaruju se regulisanjem pobude. Mjeranjem u režimu koji odgovara minimalnoj struji statora (tačka A) vatmetar pokazuje snagu odnosno gubitke:

$$P_W = P_f + P_{Fe} + 1,5RI_0^2 .$$

Iz ovog režima određujemo uže gubitke praznog hoda,  $P_f + P_{Fe}$ .

Dodatne gubitke koji zavise od kvadrata struje, koja je u ovom režimu mala, možemo zanemariti.

Pošto je  $\cos\phi = 1$  nema poteškoća mjernja snage vatmetrom.

Mjeranjem u režimu koji odgovara nominalnoj struji (tačka B ili C), vatmetar pokazuje gubitke:

$$P_W = P_f + P_{Fe} + 1,5RI_n^2 + P_d .$$

Kao što vidimo, u ovom režimu prisutni su svi gubici osim pobudnih. Dopunski gubici su jedini nepoznati, od prisutnih gubitaka u ovom režimu, ako je potrebno mogu se odrediti.

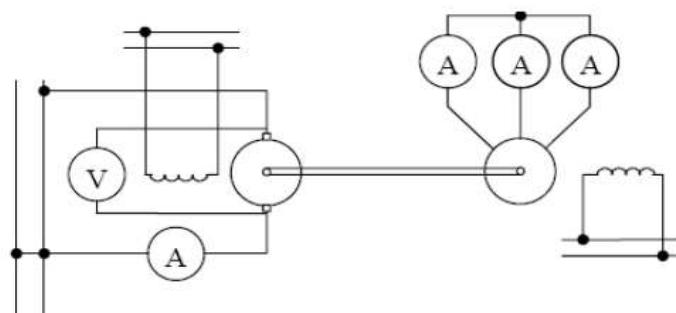
U ovom režimu potrebno je koristiti elektronski vatmetar ili vatmetar za mali  $\cos\phi$ , pošto je  $\cos\phi \approx 0$ .

Kao što smo vidjeli u režimu, koji odgovara tačkama B ili C, prisutni su isti gubici, ali u režimu povećane pobude (tačka B) imamo veću *ems E*, pa prema tome i veće gubitke u gvožđu  $P_{Fe}$ .

## 2.6.2. Gubici u kratkom spoju

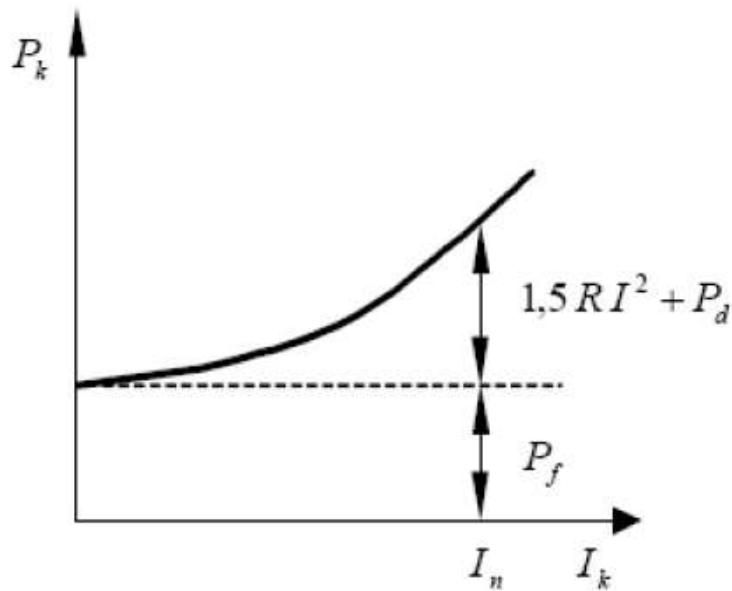
Ukupni gubici kratkog spoja sadrže: mehaničke, Džulove gubitke u namotu statora i dopunske gubitke. Gubici u željezu u odnosu na druge gubitke mogu se zanemariti zbog malog zasićenja u kratkom spoju.

Ovi gubici određuju se generatorskim postupkom za koji je potrebno imati pogonsku mašinu PM i mogućnost mjerjenja njene korisne snage  $P_K$  (slika 2.21). Ova snaga mjeri se pri sinhronoj brzini i raznim vrijednostima struje pobude i treba da odgovara samo gubicima ispitivane mašine.



Slika 2.21. Šema ispitivanja za ogled kratkog spoja

Na slici 2.22. prikazani su gubici generatora u kratkom spoju odakle se vidi da je moguće razdvojiti sve komponente gubitaka.



Slika 2.22. Gubici generatora u kratkom spoju

Cilj ovog ispitivanja je da se odrede dopunski gubici. Džulovi gubici u namotu statora mogu se lako izračunati, jer je poznata struja kratkog spoja i omski otpor namota statora. Mehanički gubici  $P_f$ , određuju se generatorskim postupkom u praznom hodu. Pošto je snaga kratkog spoja:

$$P_K = P_f + 1,5RI^2 + P_d .$$

Dopunski gubici su:

$$P_d = P_K - P_f - 1,5RI^2 .$$

### 2.6.3. Metoda zaustavljanja

Kod sinhronih generatora velikih snaga (hidrogeneratora ili turbogeneratora) javljaju se problemi kod određivanja stepena iskorištenja odnosno gubitaka.

Ovi generatori konačno se montiraju tek na njihovom radnom mjestu, odnosno u elektrani gdje su kruto spojeni sa svojom pogonskom turbinom. Zbog toga se njihovo ispitivanje vrši u elektrani gdje ne postoji baždarena pogonska mašina pomoću koje bi se odredili pojedinačni gubici.

Dodatni problem predstavlja razdvajanje ukupnih mehaničkih gubitaka pogonske turbine i generatora.

Veliki hidrogeneratori, imaju istu osovinu s turbinom pa je teško procijeniti gubitke hidrauličnog trenja turbine.

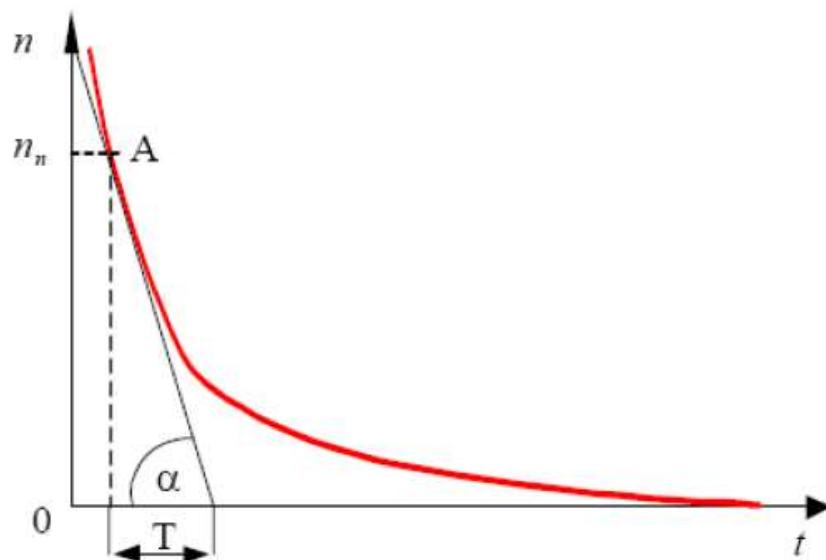
Sinhroni generatori velikih snaga ispituju se metodom zaustavljanja ako su ispunjeni odgovarajući uslovi, a ako nisu koristi se kalorimetarska metoda.

Osnovni cilj metode zaustavljanja je određivanje ukupnih gubitaka ispitivane mašine  $P_g$  ili momenta inercije  $J_m$ .

Ova metoda bazira se na nekoliko (obično tri) zaustavljanja pri različitim uslovima. Ona je pogodna kada postoje uslovi za sinhrono puštanje u rad i kada je moguće odvajanje turbine od generatora, kako bi se izbjegao problem razdvajanja ukupnih mehaničkih gubitaka turbine i generatora.

Tokom ogleda ispitivani generator dovede se na brzinu nešto veću do sinhronе (naznačene), a potom se prepusti zaustavljanju.

Pošto se radi o ispitivanju sinhronih generatora velike snage kod kojih zaustavljanje traje i do 20 minuta, karakteristika zaustavljanja može se precizno snimiti.



Slika 2.23. Karakteristika zaustavljanja

Za snimanje karakteristike zaustavljanja (slika 2.23) obično se koristi tahometarski generator, osim ako se zaustavljanje sporo odvija kada se koristi tahometar i hronometar.

Subtangenta  $T$  predstavlja fiktivno vrijeme zaustavljanja za koje bi se mašina zaustavila ako bi gubici  $P_g$  ostali isti pri svim brzinama do nule.

Kako se smanjivanjem brzine i gubici smanjuju stvarno vrijeme zaustavljanja je uvijek veće od  $T$ .

Moment pri zaustavljanju mašine je:

$$M_g = J_m \frac{d\omega}{dt} = J_m \frac{2\pi}{60} \frac{dn_s}{dt} = J_m \frac{2\pi n_s}{60 T},$$

a gubici:

$$P_g = M_g \omega = J_m \left( \frac{2\pi}{60} \right)^2 \frac{n_s^2}{T}.$$

Prema međuodnim preporukama (IEC) ne snima se cijela karakteristika već se određuje samo vrijeme  $\Delta t$  za koje brzina opadne sa  $1,1n$  na  $0,9n$  (ili sa  $1,05n$  na  $0,95n$ ) pa se koriste izrazi:

$$M_g = J_m \frac{2\pi \Delta n}{60 \Delta t},$$

odnosno:

$$P_g = J_m \left( \frac{2\pi}{60} \right)^2 n_s \frac{\Delta n}{\Delta t},$$

$$P_g = \frac{K}{\Delta t}, \quad \text{gdje je } K = J_m \left( \frac{2\pi}{60} \right)^2 n_s \Delta n.$$

Pri metodi zaustavljanja izvode se sljedeća tri zaustavljanja:

1. Zaustavljanje nepobuđene mašine u praznom hodu, pri naznačenoj brzini obrtanja  $n_s$ , kada postoje samo mehanički gubici:

$$P_{g1} = P_f = \frac{K}{\Delta t_1}.$$

2. Zaustavljanje pobuđene mašine u praznom hodu pri naznačenoj brzini obrtanja  $n_s$ , i naznačenom naponu  $U_n$ , gdje postoje samo gubici uslijed obrtanja (tzv. uži gubici praznog hoda):

$$P_{g2} = P_0 = P_f + P_{Fe} = \frac{K}{\Delta t_2}.$$

Zbog prisustva stranog izvora gubici pobude ne utiču na zaustavljanje.

3. Zaustavljanje mašine u kratkom spoju koja je pobuđena tako da pri naznačenoj brzini obrtanja  $n_s$ , ima naznačenu struju  $I_n$ . U ovom slučaju ukupni gubici u mašini sadrže mehaničke gubitke, Džulove gubitke u statorskom namotu pri naznačenoj struji i dopunske gubitke:

$$P_{g3} = P_K = P_f + 1,5RI_n^2 + P_d = \frac{K}{\Delta t_3} .$$

Prepostavlja se da je poznat moment inercije  $J_m$ , ako nije potrebno je znati bar jedne od gubitaka  $P_f$ ,  $P_o$  ili  $P_K$  da bi se odredili ostali gubici i moment inercije.

Pošto manipulacija pri uspostavljanju želenog režima mora biti brza, potrebno je iz odgovarajućih karakteristika praznog hoda i kratkog spoja pripremiti podatke pobudne struje za  $E$  (odnosno  $U_n$ ) u praznom hodu i  $I_n$ , u kratkom spoju.

## 2.6.5. Sinhrono puštanje u rad

Za mjerjenje gubitaka motorskim postupkom u praznom hodu i po metodi zaustavljanja potrebno je obezbijediti uslove da se ispitivana mašina radi kao motor iz stanja mirovanja dovede do naznačene brzine, a to nije nimalo jednostavno.

Metoda kojom se to postiže je tzv. sinhrono puštanje u rad. Za sinhrono puštanje u rad pored ispitivane mašine potrebno je imati i sihroni generator koji je sa svojom turbinom spojen, za razliku od ispitivane mašine. Prvo se obe mašine maksimalno pobude i turbina generatora koji stoji počinje lagano da se pokreće. U pobuđenom generatoru stvaraju se trofazne struje niske učestanosti. Te struje u statoru motora obrazuju obrtno magnetno polje koje se vrti istom brzinom kao turbina i generator. Pri takoj niskoj brzini statorsko i rotorsko polje motora spregnu se tako da se i motor počne obrtati istom brzinom. Brzina turbine postepeno se povećava, motor prati obrtanje turbine i generatora istim povećanjem svoje brzine. Kada se brzina ispitivane mašine dovede do naznačene ili nešto iznad nje, stvoreni su uslovi za izvođenje radova.

## 2.7. Reaktanse sinhronih mašina

Reaktanse sinhronih mašina opisuju svojstva mašine u raznim pogonskim stanjima. Ona su važna za određivanje preopteretivosti, stabilnosti, za utvrđivanje strujnih udara i slično.

U mašini sa istaknutim polovima vazdušni procjep nije ravnomjeran. Uticaj istaknutih polova može se uzeti u obzir razlažući sturju indukta na:

podužnu:  $I_d=I \sin \varphi$  i

poprečnu:  $I_q=I \cos \varphi$  komponentu.

Ove komponente struje indukta daju dvije komponente reakcije indukta: podužnu (uzdužnu) i poprečnu. (Blondelova, dvo-osna teorija sinhronih mašina).

Svakoj od ovih komponenti struje indukta odgovara određena vrijednost sinhronih reaktanse.

Uzme li se u obzir i reaktansa rasipanja  $X_\sigma$ , za koju se uzima da je ista za struje uzdužne i poprečne ose dobija se:

sinhrona podužna reaktansa:  $X_d=X_{ad}+X_\sigma$  i

sinhrona poprečna reaktansa:  $X_q=X_{aq}+X_\sigma$ .

Sinhrona reaktansa poprečne ose  $X_q$  znatno je manja od sinhronih reaktansi uzdužne ose  $X_d$  zbog većeg magnetnog otpora u poprečnoj osi.

Kod sinhronih mašina sa cilindričnim rotorom dužina međugvožđa je konstantna pa je  $X_d=X_q$  i  $X_{ad}=X_{aq}$ .

### 2.7.1. Određivanje reaktanse rasipanja

Kod svih sinhronih mašina velikih snaga kada se završi stator, ali dok još nije montiran rotor, mjeri se električna sila uslijed rasipanja, a time izračuna reaktansa rasipanja  $X_\sigma$ . Za određivanje ove reaktanse postoji više načina.

Jedan od njih je i ogled stator bez montiranog rotora. Ovaj ogled sprovodi se tako da se stator priključi na mrežni napon koji se postepeno povećava sve dok ne počnu teći struje u visini naznačene vrijednosti. Onda se napon troši na savlađivanje električne sile uslijed rasipanja  $E_\sigma=X_\sigma I_n$ , električne sile  $E_S=X_0 I_n$  koju indukuje fluks  $\Phi_0$  koji se zatvara kroz šupljinu statora i na savlađivanje elektrootporne sile  $E_p=R I_n$ . Ovu silu  $E_p$ , možemo zanemariti, jer je ona i do četrdeset puta manja od električne sile  $E_\sigma$ . Iz pokazivanja voltmetra i ampermatra može se izračunati ukupna reaktansa:

$$X_\sigma = X - X_0 = \frac{U}{I_n} - \frac{N I_0}{N_0 I_n} .$$

Da bi se iz ukupne reaktanse izdvojila reaktansa rasipanja  $X_\sigma$ , postavlja se po unutrašnjoj površini statora iznad žlebova po jednom polu, pomoći namotaj. Neka pomoći namotaj ima  $N'$ , a stvarni  $N$  provodnika. Navojni sačinilac pomoćnog namotaja je isti kao i namotaja statora. Pošto se pomoći namotaj nalazi iznad žlebova, on obuhvata samo fluks  $\Phi_0$ .

U pomoćnom namotaju mjeri se vrijednost indukovane ems  $E_0=2,22 f k N_0 \Phi_0$ , pa znajući da je indukovana ems statora  $E_S=2,22 f k N \Phi_0$  (ova ems  $E$  može se mjeriti), možemo izračunati ems  $E_0$ :

$$E_0 = \frac{NE}{N_0} ,$$

a potom i reaktansu rasipanja:

$$X_\sigma = X - X_0 = \frac{U}{I_n} - \frac{N I_0}{N_0 I_n} .$$

## 2.7.2. Određivanje sinhronih reaktansi

Mjerenje sinhronih reaktansi kod hidrogeneratora, odnosi se na sinhrone reaktanse po uzdužnoj  $X_d$  i poprečnoj  $X_q$  osi, dok se kod turbogeneratora često uzima da su one približno jednake.

Za određivanje sinhronih reaktansi po uzdužnoj i poprečnoj osi postoji više metoda.

### 2.7.2.1. Metoda klizanja

Metoda klizanja omogućuje da se odrede uzdužne i poprečne sinhrone reaktanse mašine s istaknutim polovima.

Za sprovođenje ovog ogleda potrebno je da se pored ispitivane mašine ima i pomoćna mašina (obično se koristi motor jednosmjerne struje ili turbina koja goni generator). Ova pomoćna mašina je sa rotorom sinhronne mašine direktno spregnuta. Tokom ogleda rotor generatora ostaje nepobuđen, a njegova brzina se pomoćnim motorom dovede na sinhronu. Na statoru sinhronog generatora priključi se trofazni naizmjenični napon, čija je vrijednost tolika da struja u statoru ne pređe dozvoljenu vrijednost.

U statoru se obrazuje obrtno polje koje se obrće sinhronom brzinom. Pošto se rotor obrće asinhrono, ose statora i rotora se u jednom trenutku poklapaju, dok su u drugom trenutku pomjerene za  $90^\circ$  (električno). U onom trenutku kada se ose polova poklapaju postoji samo sinhrona reaktansa po uzdužnoj osi  $X_d$ , u istom trenutku magnetni otpor je najmanji. Pošto je za savlađivanje ovog otpora potrebna manja struja napon raste. U ovom trenutku napon na krajevima pobudnog namotaja generatora jednak je nuli. U drugom trenutku, kada se ose polova rotora nalaze u neutralnoj zoni polova statora postoji samo sinhrona reaktansa po poprečnoj osi  $X_q$ . Sada je magnetni otpor veći pa je potrebna veća struja, što znači da struja poraste, a napon opadne. Pošto je magnetni otpor po uzdužnoj osi manji od magnetnog otpora po poprečnoj osi, u slučaju hidrogeneratora je  $X_d > X_q$ , a za turbogeneratore  $X_d \approx X_q$ . Pošto promjenu struje prati promjena fluksa, koji se zatvara kroz rotor, u namotima rotora se indukuje  $ems$ . Učestanost navedenih promjena struje zavisi od klizanja pa ako je klizanje malo ove promjene će biti spore, pa kazaljke instrumenata koji se koriste za mjerenje mogu da prate ove promjene. Prema tome, napon, struja i  $ems$  indukovana u rotoru mijenjaju se od neke minimalne do maksimalne vrijednosti. Na osnovu izmjerениh vrijednosti struje i napona možemo izračunati sinhronne reaktanse:

$$X_d = \frac{U_{min}}{I_{max}} \quad i \quad X_q = \frac{U_{max}}{I_{min}} .$$

Sinhronu reaktansu po poprečnoj osi  $X_q$  tačnije određujemo ako iz ogleda klizanja odredimo odnos  $X_q/X_d$ , a za  $X_d$  upotrijebimo vrijednost iz ogleda praznog hoda i kratkog spoja.

Glavni nedostatak ogleda klizanja je u tome sto se velike greške mogu izazvati dejstvom indukovane struje u prigušenom namotu, vrtložne struje u polnim nastavcima, indukovane struje u pobdnom namotu i slično. Da bi se greške izbjegle potrebno je da klizanje bude vrlo malo. Ovaj uslov je ponekad teško ispuniti zbog težnje mašine da uđe u sinhronizam i da dalje radi kao reluktantni motor.

Ove prilike se donekle poprave ako se smanji napon kojim napajamo indukt. Iskustva su pokazala da metoda klizanja ne daje neposredno dobre rezultate ako je odnos  $\frac{X_q}{X_d} < 0,5$ . S obzirom da se oscilogrami moraju snimiti, tačnost rezultata ograničena je tačnošću kojom očitamo oscilograme struje i napona.

### 2.7.2.2. Ogled najveće indukovane struje

Ovaj ogled omogućava da se izbjegnu teškoće vezane za metodu klizanja. Pri ovom ogledu sinhrona mašina radi kao neopterećen sinhroni motor u praznom hodu, a priključen je na nazivni trofazni napon koji je uravnotežen i simetričan. Struja pobude svede se na nulu. Mašina tada radi kao reluktantni motor. Tada se promijeni polaritet pobudne struje i uključi mala pobudna struja u suprotnom (tj. negativnom) smjeru, uslijed čega dolazi do porasta struje indukta. Povećanje negativne pobudne struje, mora se izvoditi tako sporo da mašina niti počne njihati niti dođe u nestabilno područje. Na taj način se mašina dovede na granicu statičke stabilnosti i odredi najveća struja indukta.

Svako dalje povećanje negativne pobude dovodi do trenutnog ispadanja mašine iz sinhronizma. Ona se obično vrati u sinhronizam kada zaostane za jedan pol. Pošto je negativna pobuda relativno mala, može se reći da statorska struja u tom slučaju ima samo poprečnu komponentu. Poprečna sinhrona reaktansa je:

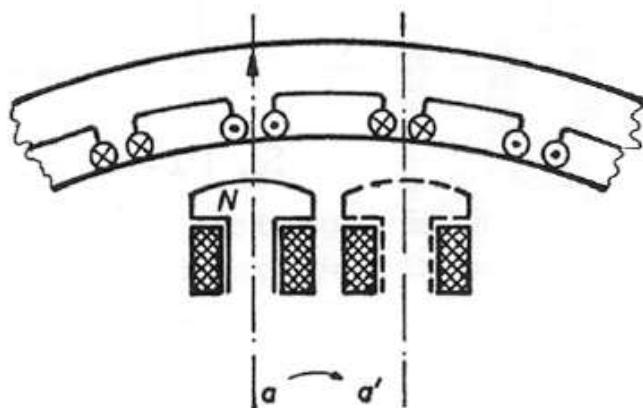
$$X_q = \frac{U}{\sqrt{3}I_{max}} .$$

## 2.8. Ogled zalijetanja

Ogled zalijetanja izvodi se kod svih samozaletnih sinhronih mašina. Sinhroni motori, koji se upotrebljavaju u industrijske svrhe, obično se asinhrono pokreću pomoću prigušnog namota, koje u obliku kratko spojenog kaveza.

Zalet ustvari predstavlja kratak spoj, pošto se na mašinu koja miruje priključuje puni napon. Ogled zalijetanja se obično izvodi sa sniženim naponom. Za snižavanje napona koristi se transformator, prigušnica ili preklopka zvijezda-trougao. Ogled zalijetanja sa prigušnim namotom odgovara zalijetanju asinhronog motora, jer su prilike iste. Razlika postoji jedino kod zalijetanja sinhronih mašina sa istaknutim polovima, jer u tom slučaju rotirajući fluks je u jednom trenutku iznad polova, a u drugom između polova, što dovodi do kolebanja momenta.

U toku ogleda potrebno je pobudni namot premostiti preko otpornika da bi se poništio uticaj naizmjeničnog napona koji bi se indukovao u pobudnom namotu. Pri klizanju od približno 4% brzina obrtanja se stabilizuje i klizanje je tada proporcionalno opterećenju. Ako se pri ogledu koristi sniženi napon prelazi se na nominalni napon. Time se klizanje i dalje smanjuje dok se brzina obrtanja rotora približava sinhronoj. Tada se uključi pobuda, pri čemu je potrebno otpornik koji je bio premošten sada kratko spojiti. Ako opterećenje nije veliko sinhrona sila povuče rotor u sinhroni rad.



Slika 2.24. Ogled zalijetanja

Rotor mora da uhvati sinhroni hod, što znači da pol treba da pređe udaljenost  $a-a'$ , (slika 2.24.), tačno u vremenu koje je potrebno da se smjer struje u novom položaju pola (položaj  $a'$ ) promijeni u smjer koji je struja imala u prvobitnom položaju pola (položaj  $a$ ). Zbog toga je potrebno da rotor „skoči” naprijed ili nazad, što je bolje. U prvom slučaju kada rotor „skoči” naprijed njemu je potrebna dodatna količina energije, pa bi on dodatno opterećivao mrežu, dok u drugom slučaju mašina u jednom trenutku radi kao generator i time rastereće mrežu. Da bi se postiglo što ugodnije uklapanje pobudu uključimo u trenutku kada ampermetar u pobudnom krugu udari u desno (instrumenti moraju biti polarizovani).

Ako je klizanje veliko potrebna je veća pobudna struja kako bi se mašina pripremila sa asinhronog na sinhroni rad.

## 2.9. Ogled vitlanja

Ogledom vitlanja provjerava se mehanička čvrstoća rotora. Ovaj ogled se izvodi tako da se rotor mašine, montiran ili posebno izvan mašine, vrti odgovarajuće vrijeme brzinom većom od nominalne ili maksimalne predviđene.

Brzina kojom se rotor, tokom ogleda, ispituje zavisi od tipa mašine kojoj rotor pripada, odnosno od nominalne brzine mašine ili povećane brzine kojom se rotor može vrtjeti.

Tako se rotor turbogeneratora, u ogledu vitlanja, vrti brzinom  $1,25\omega_n$ , a hidrogenerator brzinom pobjega turbine, ali najmanje  $1,8\omega_n$ , dok se sinhroni kondenzatori i motori vrte brzinom  $1,2\omega_n$ .

Ogled vitlanja traje dvije minute. Ako se za to vrijeme ne pojave nikakve deformacije rotora i ako mašina poslije ogleda izdrži naponske oglede, smatra se da je mašina izdržala mehanička naprezanja.

Pošto u toku ogleda vitlanja može doći od mehaničkog oštećenja izolacije, neophodno je da se poslije ogleda vitlanja vrši ogled ispitivanja dielektrične čvrstoće izolacije.

Rotori velikih masa ispituju se ogledom vitlanja u prostorijama posebno namijenjenim za ovu vrstu ispitivanja. Ovakve prostorije nazivamo vitlaonice.

To su građevinski objekti posebne konstrukcije, zašto posebne vidjećemo iz sledeće analize.

Kinetička energija cilindričnog tijela koja rotira data je izrazom:

$$E_k = \frac{J_m \omega^2}{2} ,$$

gdje je  $J_m$ , moment inercije i njega možemo izraziti:

$$J_m = m \cdot D^2 \cdot \frac{1}{4} ,$$

gdje je  $m$  masa tijela koje rotira, a  $D$  prečnik baze cilindra.

Sada za kinetičku energiju možemo pisati:

$$E_k = \frac{1}{2} m D^2 \frac{1}{4} \left( \frac{2\pi}{60} \right)^2 n^2 ,$$

gdje je  $n$ , brzina rotiranja u [obr/min].

Dalje imamo:

$$E_k = 1370 \frac{mD^2}{1000} n^2 .$$

U slučaju turbogeneratora sa  $mD^2 = 10 \cdot 10^3 \text{kgm}^2$  i pri  $n_n=3000$  obr/min, dobija se vrijednost kinetičke energije  $E_k=123$  MWs, a pri nešto većoj brzini  $n=1,25n_n$ , dobija se energija  $E_k=192$  MWs.

Radi poređenja, voz mase 200 tona koj se kreće brzinom od 100 km/h ima kinetičku energiju 78 MWs.

Sada možemo zamisliti šta bi se desilo ako bi rotor prilikom ogleda vitlanja mehanički popustio i razletio se i zašto su vitlaonice posebne konstrukcije.

Zbog ovoga su vitlaonice najčešće ukopavaju u zemlju ili se oblažu debelim slojevima betona, zemlje ili pjeska.

Postoje horizontalne i vertikalne vitlaonice u zavisnosti da li se ispituje rotor predviđen za rad u horizontalnom ili vertikalnom položaju. Na slici 2.25. je prikazana horizontalna vitlaonica.



Slika 2.25. Horizontalna vitlaonica

Prije ogleda vitlanja potrebno je staticki i dinamički izbalansirati rotor. Često se tokom ogleda vitlanja mjere i mehanička naprezanja na pojedinim kritičnim mjestima. U tu svrhu se upotrebljavaju tenzometri, odnosno otporničke trake.

### 3. Standard za ispitivanje sinhronih mašina IEEE 115

Ova uputstva sadrže preporuke za sprovođenje opšte primjenljivih i prihvatljivih testova za određivanje performansi sinhronih mašina. Iako su opisani ogledi generalno primjenljivi na sinhrone generatore, sinhronе motore (snage veće od par kilovata), sinhronе kompenzatore i sinhronе pretvarače frekvencije, opisi se uglavnom odnose na sinhronе generatore i sinhronе motore. Ovim uputstvima nisu pokriveni svi mogući testovi ili istraživački testovi, već samo opšte metode koje se mogu koristiti za dobijanje podataka o performansama. Raspored fabričkih testova i testova na terenu, koji mogu biti potrebni za izbor nove opreme, normalno je određen standardima ili specifikacijama ugovora. Namjera ovih uputstava nije da zahtijevaju sprovođenje bilo kog testa u okviru transakcije niti da garantuju da su određene performanse ili uslovi ispunjeni.

Termin „određeni uslovi za testiranja“ u ovim uputstvima smatraće se standardizovanim uslovima, ako nije drugačije određeno. Standardizovani uslovi obično se odnose na sljedeće vrijednosti navedene na identifikacionoj pločici mašine, a to su prividna snaga MVA, najveći napon (ili kilovolti), struja pobude i faktor snage.

Iz IEEE 115 standarda izdvojen je dio vezan za podužnu  $X_d$ , i poprečnu  $X_q$ , sinhronu rektansu i kalorimetarska metoda.

#### 3.1. Podužna sinhrona reaktansa ( $X_d$ )

Za 3.1. i 3.2. određivanje parametara slijedi odmah nakon opisa procedura ispitivanja.

Definicije nisu vezane za testove, i zasnovane su na izmjerenoj struji armature.

Za mašine uobičajene izrade, veličina podužne sinhronе reaktanse je toliko bliska veličini podužne sinhronе impedance da se može uzeti da imaju istu numeričku vrednost.

Nezasićena podužna sinhrona impedansa može se izračunati iz rezultata ogleda praznog hoda i kratkog spoja.

Ova sinhrona impedansa izračunata u [r.j.] je jednaka, odnosu struje pobude koja odgovara nominalnoj vrijednosti struje statora, na karakteristici kratkog, i struje pobude koja odgovara nominalnoj vrijednosti napona na karakteristici nezasićenog praznog hoda.

Sinhrona reaktansa može se izračunati pomoću jednačine:

$$X_{du} = \frac{I_{FSI}}{I_{FG}} [r.j.] , \text{ gdje je:} \quad (3.1.)$$

$X_{du}$  - zasićena sinhrona reaktansa,

$I_{FSI}$  - struja pobude koja odgovara nominalnoj struji statora na krivoj kratkog spoja i

$I_{FG}$  - struja pobude koja odgovara nominalnoj vrijednosti napona na krivoj nezasićenog praznog hoda.

Vrednost zasićene sinhrone reaktanse ( $X_{ds}$ ) zavise od radnih uslova sinhrone mašine. Podužna sinhrona rektansa  $X_d$ , je sastavljena od podužne reaktanse indukta  $X_{ad}$ , i reaktanse rasipanja na statoru  $X_l$ .

Tako je generalno:

$$X_d = X_{ad} + X_l , \text{ gdje je } X_{ad} \text{ zasićeni dio } X_d .$$

Zaključak je:

$$X_{du} = X_{adu} + X_l .$$

Kada je  $X_{ad}$  zasićeno do ma kog stepena ( $X_{ads}$ ), onda je:

$$X_{ds} = X_{ads} + X_l .$$

### 3.2. Poprečna sinhrona reaktansa ( $X_q$ )

Definiciju poprečne sinhrone reaktanse nije vezana za ispitivanje, i zasnovana je na izmerenoj struji armature.

Nema jasne definicije ni nezasićene ni zasićene vrednosti poprečne sinhrone reaktanse  $X_q$ , ali je uobičajena pretpostavka da je:  $X_q = X_{aq} + X_l$ , gdje je  $X_{aq}$  onaj dio poprečne sinhrone reaktanse  $X_q$ , uslijed zasićenja, slično praksi u 3.2.

Analogno je:  $X_{qu} = X_{aqs} + X_l$ .

Slična pretpostavka važi i za zasićenu podužnu sinhronu reaktansu:  $X_{qs} = X_{aqs} + X_l$ .

### **3.3. Procedure za sprovodenje ogleda metodom klizanja – metod 1 za mjerjenje $X_{qs}$**

Ogled klizanja se sprovodi okretanjem rotora brzinom malo različitom od sinhrone, sa otvorenim kolom pobude i statorom napajanim trofaznim izvorom struje usklađenog smjera i odgovarajuće frekvencije, na naponu ispod tačke na karakteristici praznog hoda gde kriva praznog hoda počinje da se povija. Mjere se struja statora, napon statora i napon pobudnog kola. Najbolji rezultati se dobijaju pomoću oscilografa. Ako se koriste instrumenti, napon pobude se mjeri jednosmernim voltmetrom sa dvostrukim otklonom. (Pošto su struje i naponi u tri faze simetrični, može se koristiti bilo koji linijski napon i struja.).

Klizanje se može odrediti kao odnos frekvencije napona indukovanih u pobudnom namotaju i frekvencije napona statora.

Klizanje se takođe može odrediti upotrebom stroboskopa napajanog istom frekvencijom kao i primjenjeni napon, koji osvjetjava jednak raspoređene oznake na rotoru, gde je broj oznaka jednak broju polova. Frekvencija klizanja je vidljivi prolaz oznaka u [ob/s], pomnožena brojem pari polova, a klizanje je odnos frekvencije klizanja i frekvencije primjenjenog napona.

#### **Mjere opreza**

Nekada je veoma teško održati konstantnu brzinu kada je klizanje dovoljno nisko za tačno određivanje poprečne sinhrone reaktanse, jer efekti isturenih polova i struja indukovanih u namotajima prigušnog namotaja proizvode pulsirajući obrtni moment. U takvim slučajevima radi se niz očitavanja počevši od najmanjeg klizanja pri kojem se može održati konstantna ili gotovo konstantna brzina, i mjereći još tri ili više puta na većim klizanjima.

Indukovani napon u kolu pobude može dostići opasne vrednosti kada je klizanje veliko (više od približno 5%), ili prilikom prekida napajanja. Kao zaštitu od visokog napona treba u polje prikopčati brzi kratkospojeni prekidač. Kao dodatna zaštita u kolu pobude se prikopčava niskonaponski varničar. Prekidač treba da je zatvoren osim kada se zna da je klizanje blizu nule i kada se rade očitavanja instrumenata. Instrumeni ne treba da budu prikopčani u kolo pobude dok se ne osigura da je indukovani napon u opsegu instrumenta. Zbog teškoća koje se često sreću u održavanju želenog klizanja tokom ogleda, neophodno je stalno pratiti napon pobude i biti spremna na nagli prekid kola pobude da bi se izbegao nagli skok napona.

Ako je klizanje dovoljno nisko i brzina konstantna, instrumenti će pratiti promjene napona i struje dovoljno precizno da se mogu koristiti. Treba istovremeno očitavati struju i napon kada struja dosegne najnižu i najvišu vrijednost. Sinhrona reaktansa se određuje na isti način kao i kada se koristi oscilograf.

### 3.3.1. Određivanje parametra $X_{qs}$ iz metode 1 – test klizanja

Minimalan i maksimalan odnos napona statora i struje statora se dobijaju kada je klizanje veoma malo. Odatle se približne vrijednosti poduzne i poprečne sinhrone reaktanse ( $X_{qs}$  i  $X_{ds}$ ) mogu dobiti iz jednačina 3.2. i 3.3., ali se za najbolje rezultate ove vrijednosti ne koriste kao konačne. Najtačniji metod za određivanje uzdužne sinhrone reaktanse ( $X_{du}$ ) je ispitivanje (3.3.) i poprečne sinhrone reaktanse jednačinama 3.4. ili 3.5.

$$X_{qs} = \frac{E_{min}}{I_{max}} \quad [r.j.] \quad (\text{neka zasićena vrijednost}) \quad (3.2.)$$

$$X_{ds} = \frac{E_{max}}{I_{min}} \quad [r.j.] \quad (\text{neka zasićena vrijednost}) \quad (3.3.)$$

$$X_{qu} = X_{du} \left( \frac{X_{qs}}{X_{ds}} \right) \quad [r.j.] \quad (3.4.)$$

$$X_{qu} = X_{du} \left( \frac{E_{min}}{E_{max}} \right) \left( \frac{I_{min}}{I_{max}} \right) \quad [r.j.] \quad (3.5.)$$

Minimalni odnos (vidi jednačinu 3.2.) postoji kada je napon pobude maksimalan, a maksimalan odnos (vidi jednačinu 3.3.) kada napon pobude prolazi kroz nulu.

Ako klizanje nije izuzetno nisko, struja indukovana u navojima prigušnog namotaja proizvešće značajnu grešku.

Napomena: Kriva „prividne“ poprečne sinhrone reaktanse u funkciji klizanja može se extrapolirati na nulto klizanje da bi se dobila ispitna vrijednost poprečne sinhrone reaktanse.

### 3.4. Metod 2 – maksimalna pobudna struja na granici stabilnosti

Mašina koja se ispituje radi kao sinhroni motor bez opterećenja, sa ispitnim naponom ne većim od 75% od normalnog i sa približno normalnom pobudom. Pobuda se potom smanjuje do nulu, obrne se polaritet i postepeno se povećava sa obrnutom polaritetom. To izaziva porast struje statora. Povećanjem negativne pobude, u malim koracima dok se ne pojavi nestabilnost, određuje se struja statora  $I_t$ , u [r.j.] koja odgovara maksimalnoj stabilnoj negativnoj pobudi. To daje zasićenu vrednost  $X_{qs}$ .

### 3.4.1. Određivanje $X_{qs}$ iz metoda 2

Poprečna sinhrona reaktansa se dobija na sledeći način:

$$X_{qs} = \frac{E}{I_t} \quad [r.j.] , \quad \text{gdje je:} \quad (3.6.)$$

$E$  – napon statora [r.j.] i

$I_t$  – struja statora [r.j.] na granici stabilnosti.

## 3.5. Metod 3 – empirijski

Odnos poprečne sinhronе reaktanse i poduzne sinhronе reaktanse kod uobičajenih mašina može se odrediti empirijskom funkcijom nekoliko značajnih veličina mašine i izračunati od strane proizvođača na osnovu tih veličina. Nezasićena poprečna sinhrona reaktansa se onda određuje množenjem nezasićene uzdužne sinhronе reaktanse određene ispitivanjem 3.3. sa odnosom koji je odredio proizvođač.

Napomena – Pošto empirijska funkcija koja se koristi ne pokriva sve faktore koji utiču na odnos  $X_{qu}$  i  $X_{du}$ , ovaj metod nije egzaktan. Kada mašina nije uobičajenih proporcija, ili je potrebna realnija vrijednost  $X_{qs}$ , mogu se koristiti metod 1 ili 2.

## 3.6. Kalorimetarska metoda za gubitke

### 3.6.1. Mašine sa vodenim hlađenjem

Ovaj metod može se koristiti za mašine sa vodenim hlađenjem gdje rashladna tečnost cirkuliše u zatvorenom sistemu. Metod se zasniva na činjenici da su gubici jednaki topotri koja se predaje vodi plus topotri koja se gubi zračenjem i cirkulacijom. Jednačina za gubike koje apsorbuje voda je:

$$\text{gubici u } kW = 0,264(t_h - t_c)Q, \quad \text{gdje je:} \quad (3.7.)$$

$t_h$  - temperatura vode koja izlazi iz hladnjaka, °C

$t_c$  - temperatura vode koja ulazi u hladnjak, °C

$Q$  - jačina toka vode u U.S. galonima po minuti (1 U.S. gallon = 3,785 l).

Ako se kućište posebno hlađi, ili je izvan dijela koji se hlađi vodom, njegov gubitak treba posebno odrediti i dodati ga ostalim gubicima. Gubici na kućištu sa kojeg se topota odvodi

cirkulacijom vode ili ulja mogu se izračunati na osnovu količine cirkulišuće vode i porasta temperature vode pomoću jednačine 3.7., ili iz količine cirkulišućeg ulja i porasta temperature ulja:

$$\text{gubici u } kW = 0,264C_pGQ(t_h-t_c), \text{ gdje je:} \quad (3.8.)$$

$C_p$  - specifična toplota ulja (u odnosu na vodu),

$G$  - specifična težina ulja (u odnosu na vodu), specifična toplota i težina svedene na prosečne temperature  $t_h$  i  $t_c$ ,

$t_h$  - temperatura ulja koje izlazi iz kućišta u °C,

$t_c$  - temperatura ulja koje ulazi u kućište u °C i

$Q$ - jačina toka ulja, U.S. galon po minuti.

Pošto je razlika  $t_h$  i  $t_c$  obično mala, veoma je važno da sva mjerena temperature budu tačna u 0,1°C. Treba koristiti odgovarajuće termometarske kade. U privremenim cijevima može se izbušiti rupa kako bi se termometar ubacio direktno u vodu. Termometar treba postaviti što bliže kućištu maštine da bi se na najmanju meru smanjio efekat gubitka toplote zračenjem cijevi. Takođe, dobro je na polovini testa zamijeniti pozicije termometara kako bi se poništila eventualna razlika u termometrima.

Jačina toka vode može se mjeriti kalibriranim mjeračem, ili ako on nije dostupan ukupna količina vode u određenom vremenu se može sakupiti i izmjeriti. Uslovi testa treba da budu što je moguće konstantniji.

Gubici topline radijacijom i cirkulacijom mogu biti posebno značajni kod malih maština ili velikih maština sa radnom temperaturom znatno iznad temperature okoline i koje imaju veliku površinu izloženu okolini.

Gubici topline mogu se procijeniti sledećom aproksimativnom jednačinom:

$$\text{gubici} = 0,008(t_r-t_a)W/in^2, \text{ gdje je:} \quad (3.9.)$$

$t_r$  - prosječna temperatura čitave površine koja zrači, °C

$t_a$  - temperatura okoline, °C.

Ako izračunati gubici zbog radijacije i cirkulacije prelaze 5% ukupnih gubitaka, poželjno je koristiti neku od drugih metoda zbog tačnijeg određivanja gubitaka.

## Zaključak

Danas su sinhroni generatori gotovo jedini izvori električne energije u elektroenergetskom sistemu.

Instalisana snaga svih ostalih vrsta izvora električne energije je gotovo zanemarljiva u odnosu na ukupnu snagu svih instalisanih sinhronih generatora. S obzirom da je elektroenergetski sistem trofazni u njima se koriste isključivo trofazni sinhroni generatori i oni su jedan od najznačajnijih elemenata ovog sistema. Prvenstveno zbog toga što se svi ostali elementi (transformatori, vodovi) mogu konstruisati tako da pouzdanost bude velika. U slučaju ispada jednog ili više vodova ili transformatora, odgovarajućim prespajanjem snabdijevanje potrošača neće biti prekinuto.

Međutim, u slučaju ispada bilo kog sinhronog generatora, a pogotovo velikih snaga, može doći do otežanog snabdijevanja potrošača što dovodi do velikih posljedica. Tu se prvenstveno misli na snabdijevanje industrijskih potrošača iz sopstvenih elektrana, jer pojedini industrijski potrošači ne smiju ostati bez električne energije (npr. visokolučne peći).

Zbog tako velikog značaja sinhroni generatori moraju biti podvrnuti ispitivanjima, koja na odgovarajući način predstavljaju režime rada u kojima se generator može naći. Među njima najznačajnija su: ispitivanja u praznom hodu, kratkom spoju, određivanje promjene napona i pobudne struje, provjera parcijalnih pražnjenja, određivanje reaktansi sinhronе mašine itd. Neka od ovih ispitivanja nije potrebno vršiti često, kao npr. mjerjenje reaktansi dok je neka ispitivanja potrebno vršiti češće (npr. parcijalna pražnjenja).

Ono što je bitno napomenuti je da su sinhroni generatori velikih gabarita, oni se u elektranu dopremaju u dijelovima i njihovo ispitivanje je moguće obaviti samo u elektrani po završenom montiranju. Neka od ispitivanja, kao što su mjerjenje rektanse rasipanja i ogled vitlanja, mogu se vršiti prije montaže rotora.

Kod ispitivanja sinhronih mašina postoje određena pravila po kojima se vrše ispitivanja i ona su predstavljena odgovarajućim standardima. Svaka zemlja ima svoj standard, ali da bi se mogle koristiti sinhronе mašine različitih proizvođača koristi se međunarodni standardi koji su opšte prihvaćeni u većini zemalja, među njima je najpoznatiji IEEE 115.

Ovaj standard je primjenjiv na sinhronе generatore, sinhronе motore, sinhronе kompenzatore i sinhronе pretvarače frekvencije, ali se testovi uglavnom odnose na sinhronе generatore i sinhronе motore.

Ako sinhrona mašina prođe sve testove date standardom IEEE 115 velika je vjerovatnoća da će ispravno raditi do predviđenog remonta.

## Literatura

- [1] Branko Mitraković: *Ispitivanje električnih mašina*, Naučna knjiga, Beograd, 1991.
- [2] Miloš Petrović: *Ispitivanje električnih mašina*, Naučna knjiga, Beograd, 1988.
- [3] F. Avčin, P. Jereb: *Ispitivanje električnih strojeva*, Tehniška založba Slovenije, Ljubljana, 1968.
- [4] Branko Mitraković: *Sinhrone maštne*, Naučna knjiga, Beograd, 1989.
- [5] Zbornik sa X simpozijuma, 14-16. Oktobar 1999. Novi Sad, Jugoslavija
- [6] Miloš Milanković: Sinhrone maštne, predavanja