

6. SYNCHRONNE STROJE

6.1 Všeobecne

Synchronný stroj sa skladá z elektromagnetov, budených jednosmerným prúdom a z kotvy, na ktorej je navinuté jedno- alebo viacfázové striedavé vinutie. Kotva je umiestnená obvykle na statore. Póly, umiestnené obvykle na rotore, sú v štvor- a viacpólových strojoch väčšinou vyjadrené, zatiaľ čo dvojpólové majú hladký valcový rotor. Budiace vinutie strojov s vyjadrenými pólmi je navinuté sústredene na jadre pólu. V turboalternátoroch, ktoré sú obvykle dvojpólové, je vinutie rozložené v drážkach. Póly môžu byť plné (masívne), alebo skladané z plechov. Stator zložený z dynamoplechov má v drážkach uložené vinutie kotvy. Pólové nástavce, pokiaľ sú zložené z plechov, majú často tzv. tlmiace vinutie vytvorené z niekoľkých medených, mosadzných, bronzových alebo železných tyčí, ktoré prechádzajú axiálne pólými nástavcami a sú pripojené na oboch stranách ku kruhom, s ktorými spolu tvoria klieťku nakrátko. Klieťka nakrátko slúži na tlmenie kývania synchronného stroja, predovšetkým však na zrušenie inverzného poľa v jednofázových, alebo nesymetricky zaťažených strojoch. Klieťka urobená z odporového materiálu umožňuje samostatný rozbeh synchronného motora i proti značným zaťažovacím momentom. Moderné synchronne stroje môžu mať namiesto elektromagnetov permanentné magnety (pozri kap. 7.2).

Program skúšok synchronných strojov je veľmi rozsiahly a je uvedený v STN 35 0204. Najčastejšie sú vykonávané tieto skúšky:

1. Meranie izolačných odporov vinutí medzi sebou a proti kostre.
2. Meranie ohmických odporov za studena.
3. Meranie naprázdno, charakteristika naprázdno.
4. Meranie nakrátko pri súmernom skrate, charakteristika nakrátko.
5. Zaťažovanie v motorickom alebo v generátorickom stave, meranie V–kriviek.
6. Skúška náhleho trojfázového skratu.
7. Otepľovacia skúška.
8. Meranie reaktancií a časových konštánt.

V nasledujúcich kapitolách sa budeme zaoberať meraním synchronného generátora (ďalej SG), ktorý môže pracovať buď samostatne, v tzv. ostrovnej prevádzke, alebo pripojený na tvrdú sieť (pozri kap. 6.6). Najprv uvádzame merania, pri ktorých SG pracuje samostatne.

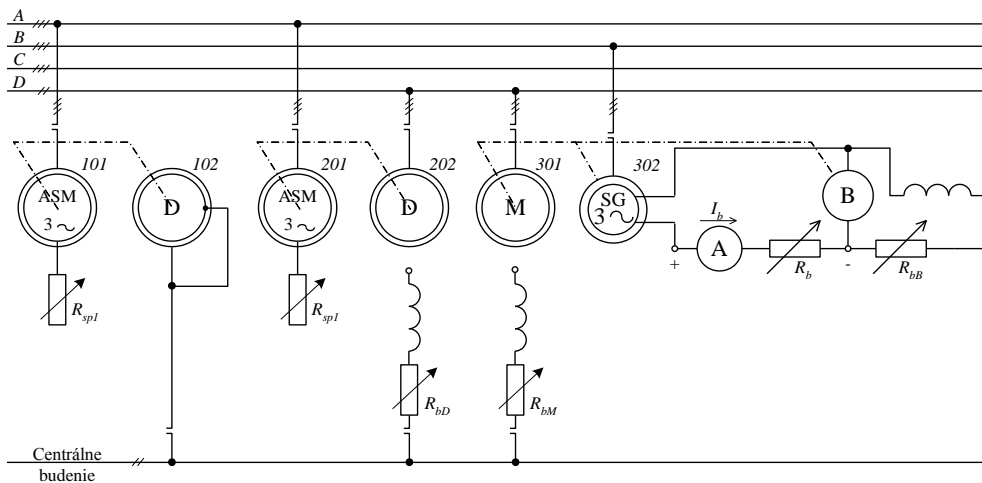
6.2 Meranie odporov vinutí

Určíme odpor vinutia kotvy a budiaceho vinutia v studenom stave voltampérovou metódou (kap. 5.4 a 2.3). Udáva sa obyčajne stredná hodnota odporu vinutia kotvy meraného medzi svorkami stroja a odpor budiaceho vinutia meraný medzi krúžkami. Pre účely simulácie vypočítame odpor jednej fázy vinutia.

6.3 Meranie naprázdno

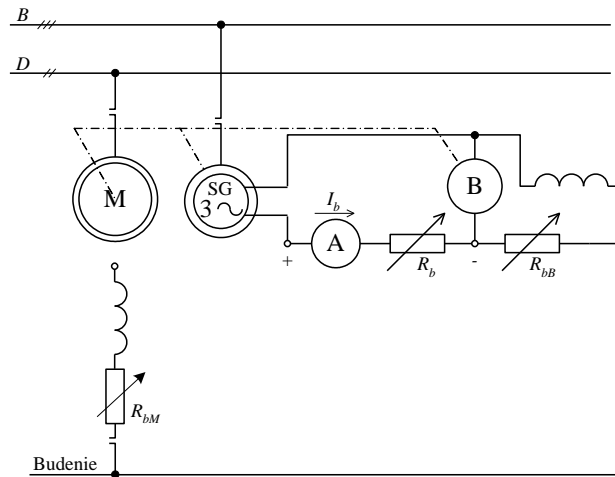
Pri meraní naprázdno zisťujeme charakteristiku naprázdno, t. j. závislosť (združeného) napätia naprázdno od budiaceho prúdu $U_0 = f(I_b)$.

Stavom naprázdno rozumieme taký stav, pri ktorom SG poháňame pohonným motorom menovitými otáčkami tak, aby indukované napätie malo menovitú frekvenciu, budíme ho a svorky kotvy sú pritom rozpojené, takže SG nie je zaťažený.



Obr. 6.1 Príklad schémy zapojenia pre budenie a pohon trojfázového synchronného generátora

Pohonným motorom v laboratóriách je zvyčajne jednosmerný motor s cudzím budením, aby sme mali možnosť pohodlne regulovať otáčky svorkovým napätím motora, alebo jeho budiacim prúdom podľa vzťahu $\Omega = U/C\phi$. Príklad konkrétnej schémy pohonu trojfázového SG v laboratóriu je na obr. 6.1. Na obr. 6.2 je všeobecná schéma pre meranie SG, na ktorej vidno, že pre jeho meranie je najdôležitejšie mať pohonný stroj, ktorým možno pohodlne regulovať otáčky a musíme mať možnosť regulovať jeho budiaci prúd I_b .



Obr. 6.2 Všeobecná schéma na meranie SG

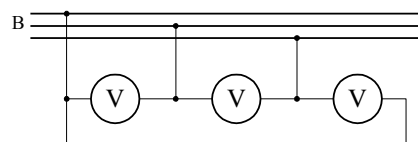
Opis schémy na obr. 6.1:

Na prípojnicach A je sieť s trojfázovým napätím. Z prípojnic A sú napájané asynchrónne motory s rotorovými spúšťačmi, z ktorých jeden (č.101) poháňa derivačné dynamo, aby vyrábalo napätie pre prípojnice centrálneho budenia. Tieto prípojnice potom tvoria zdroj pre napájanie budiacich obvodov dynamu (č.202) a jednosmerného motora (č.301) s cudzím budením. Druhý asynchrónny motor (č.201) poháňa už spomínané dynamo s cudzím budením, ktoré vyrába napätie pre jednosmerné prípojnice D. Týmto napätím je napájaný jednosmerný motor s cudzím budením (č.301), ktorý je hriadeľom spojený so synchronným strojom (č.302). V bloku s jednosmerným motorom a synchronným strojom je samozrejme aj budič (B), ktorým je jednosmerné derivačné dynamo.

Po spustení sústrojenstiev č.100 a 200 sa pripojí jednosmerný motor s cudzím budením č. 301 na prípojnice D a zvyšovaním napätia dynamu č.202 (jeho pribudzovaním, čiže vyradňovaním odporu R_{bD}) sa uvedie sústrojenstvo č.300 na synchronnú otáčavú rýchlosť SG.

Pri meraní charakteristiky naprázdno a nakrátko sa kotva synchronného stroja pripojí na prípojnice B, alebo C, ktoré sú inak prázdne, takže pripojenie je jednoduché. Na obr. 6.1 je SG pripojený na prípojnice B.

Pri meraní naprázdno pripojíme na prípojnice B tri voltmetre (obr. 6.3), ktoré budú merať združené napätie SG. Strednú



Obr. 6.3 Zapojenie voltmetrov pri meraní naprázdno

hodnotu týchto troch napätí vynásobíme do charakteristiky ako U_0 (pozri obr. 6.6).

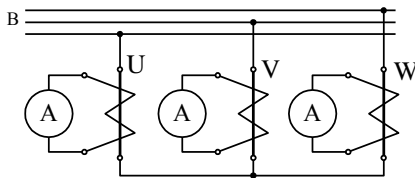
Budiaci prúd regulujeme len jedným smerom, nahor (pozri vysvetlenie v kap. 3.1–charakteristika naprázdno), až dosiahneme asi 120% menovitého napätia. Tým určíme stúpajúcu vetvu charakteristiky naprázdno. Po dosiahnutí maxima budiaci prúd postupne znižujeme a meriame klesajúcu vetvu charakteristiky naprázdno. Za charakteristiku naprázdno považujeme krivku zostrojenú zo stredných hodnôt oboch vetiev (pozri obr. 3.2a).

Schéma zapojenia pre meranie naprázdno trojfázového SG je daná kombináciou obr. 6.1 a 6.3.

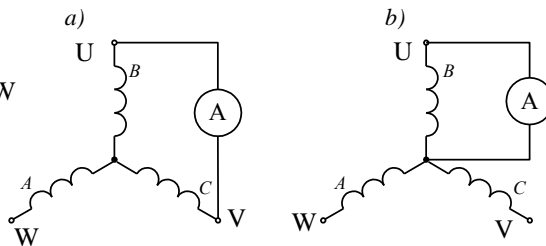
6.4 Meranie nakrátko SG

6.4.1 Meranie nakrátko pri súmernom skrate

Spojenie nakrátko sa nazýva súmerné vtedy, keď sú spojené všetky tri svorky kotvy SG nakrátko. Na obr. 6.4 sú svorky SG skratované na prípojniciach B cez meracie transformátory prúdu a ampérmetre. V ostatných prípadoch nazývame spojenie nakrátko nesúmerné (obr. 6.5a,b).



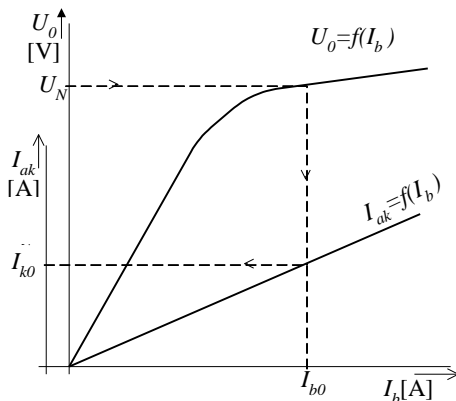
Obr. 6.4 Meranie trojfázového SG nakrátko. Spojenie prípojnic B ampérmetrami cez meracie transformátory prúdu



Obr. 6.5 Nesúmerné skraty trojfázového SG
a) dvojpólový skrat b) jedнопólový skrat

Z merania nakrátko získame charakteristiku nakrátko $I_{ak} = f(I_b)$, t. j. závislosť prúdu nakrátko v kotve I_{ak} od budiaceho prúdu I_b (obr. 6.6). SG podobne ako pri meraní naprázdno poháňame pohonným jednosmerným motorom, budíme zo zdroja jednosmerného prúdu, ale svorky kotvy skratujeme ampérmetrami cez meracie transformátory prúdu tak, ako je to na obr. 6.4 pre trojfázový SG, alebo jednoducho ampérmetrami s vhodným rozsahom. Otáčavú rýchlosť, resp. frekvenciu kontrolovať nemusíme, lebo prúd nakrátko je prakticky nezávislý od frekvencie indukovaného napätia. Stačí merať 3-4 hodnoty prúdu, pretože charakteristika nakrátko je lineárna. Vplyvom remanentného toku stroja táto charakteristika nevychádza z počiatku súradnicovej sústavy. Je však zvykom charakteristiku paralelne posunúť tak, aby prechádzala počiatkom a počítať

s takto upravenou charakteristikou. Pri meraní trojfázového SG za prúd I_{ak} považujeme strednú hodnotu údajov všetkých troch ampérmetrov, prepočítanú prevodom meracích transformátorov prúdu, ak boli použité. Budiaci prúd zvyšujeme postupne od nuly tak, aby prúd nakrátko v kotve nepresiahol 120% I_N .



Obr. 6.6 Charakteristika naprázdno a nakrátko

Potom vypočítame :

c) Skratový pomer
$$\nu_k = \frac{I_{k0}}{I_N} \quad (6.1)$$

d) Redukčný činiteľ
$$g = \frac{I_{b0}}{I_{k0}} \quad (6.2)$$

e) Synchronnú reaktanciu, ak $R_s \rightarrow 0$
$$X_d = \frac{U_{Nf}}{I_{k0}} \quad (6.3)$$

f) Percentuálnu synchronnú reaktanciu
$$x_d = \frac{100}{\nu_k} [\%] \quad (6.4)$$

g) Menovitú impedanciu
$$Z_N = \frac{U_{Nf}}{I_{aN}} \quad (6.5)$$

Potom tiež platí $x_d = \frac{X_d}{Z_N} 100 [\%]$.

6.4.2 Meranie pri nesúmernom, t. j. dvojpólovom a jednopólovom skrate

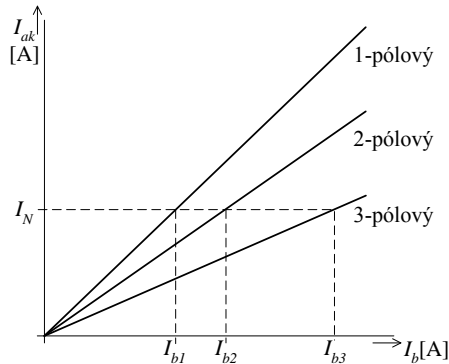
V trojfázovom SG môžeme meranie nakrátko rozšíriť o nesúmerné skraty, t. j., keď sú skratované len dve, alebo len jedna fáza. Spôsob vytvorenia skratu v statorovom vinutí je pre dvojpólový skrat na obr. 6.5a a pre jednopólový skrat na obr. 6.5b.

Charakteristiku nakrátko vynesieme do toho istého grafu ako charakteristiku naprázdno, ale s takou mierkou, aby jej sklon bol polovičný (obr. 6.6).

Z charakteristik odčítame:

- Z charakteristiky naprázdno: Budiaci prúd I_{b0} , ktorý vybudí menovité napätie naprázdno (I_{b0} je magnetizačný prúd zo strany rotora).
- Z charakteristiky nakrátko: Skratový prúd I_{k0} pre tento budiaci prúd (I_{k0} je magnetizačný prúd zo strany statora).

Postup pri meraní je ten istý ako pri meraní trojpólového skratu. Prúd I_{ak} narastá rýchlejšie ako pri súmernom skrate. Najnepriaznivejší je jedнопólový skrat. Priebehy charakteristík nakrátko pre všetky tri typy skratov sú na obr. 6.7.



Obr. 6.7 Charakteristiky nakrátko pre jedno-, dvoj- a trojpólový skrat SG

6.5 Meranie vonkajších charakteristík SG v ostrovnej prevádzke

Pri meraní uvedených charakteristík postupujeme podobne ako je uvedené v kap. 7.2.8.

6.6 Pripojenie SG na tvrdú sieť – fázovanie

Synchrónny stroj môžeme pripojiť na sieť len vtedy, ak sú splnené nasledujúce podmienky:

1. Rovnaký sled fáz napätia stroja a siete.
2. Rovnaká frekvencia napätia stroja a siete.
3. Rovnaké efektívne hodnoty napätia stroja a siete.
4. Rovnaké okamžité hodnoty napätia stroja a siete.

Pojmom „tvrdá sieť“ označujeme sieť, ktorá drží konštantné napätie a frekvenciu bez ohľadu na zmenu záťaže a bez ohľadu na to, či je meraný synchrónny stroj pripojený alebo odpojený.

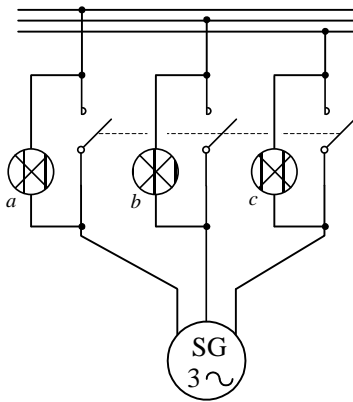
Postup pri fázovaní SG:

1. SG roztočíme jednosmerným pohonným motorom na synchrónnu rýchlosť. Skontrolujeme frekvenciu indukovaného napätia.
2. SG nabudíme tak, aby efektívna hodnota napätia na svorkách SG a siete bola rovnaká. Obidve hodnoty kontrolujeme voltmetrami toho istého typu a tej istej triedy presnosti.
3. Doladíme otáčavú rýchlosť a budenie tak, aby bola splnená podmienka rovnakej frekvencie i napätia. Uvedomíme si, že zmenou budenia sa mení len napätie

($U_i = C\phi\omega$), ale zmenou otáčok n [min^{-1}], resp. ω sa mení frekvencia $f = \frac{pn}{60}$ aj

napätie $U_i = \sqrt{2}\pi f\phi Nk_v$. Takže najprv nastavíme frekvenciu a potom budením doladíme napätie.

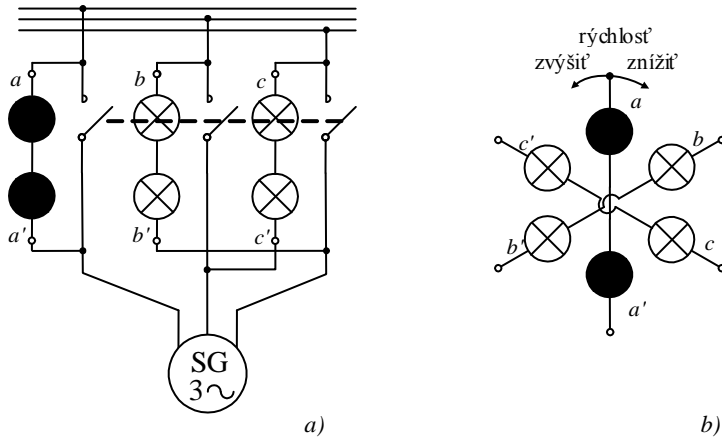
4. Ukazovateľom sledu fáz alebo ciachovaným pomocným trojfázovým asynchrónnym motorčekom skontrolujeme sled fáz napätia SG a siete v takom poradí, v akom ich chceme k sebe pripojiť. Ak sa pri obidvoch sústavách točí motorček tým istým smerom, je to v poriadku, ak nie, prehodíme ľubovoľné fázy SG medzi sebou. V jednofázovom SG je táto podmienka bezpredmetná.
5. Rovnosť okamžitých hodnôt napätia SG a siete zistíme v skúšobni jednoduchým žiarokovým synchronoskopom, ktorým sa fázuje na tmu (obr. 6.8), alebo v zmiešanom zapojení (obr. 6.9). Pri fázovaní na tmu sa má pripojiť SG na sieť vtedy, keď sú všetky žiarovky tmavé, t. j. sú splnené všetky podmienky fázovania, medzi sústavou siete a SG



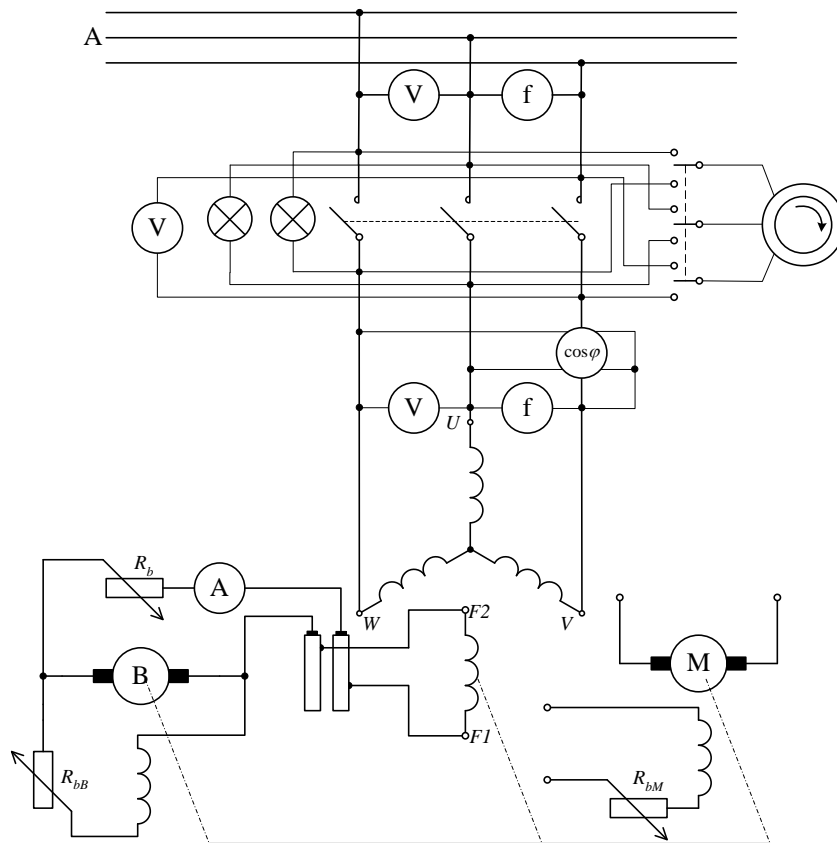
Obr. 6.8 Fázovanie SG na tmu

nie je žiadny potenciálny rozdiel a žiarovkami sa nepretláča žiadny vyrovnávací prúd. V schéme sú žiarovky vyšrafované na zdôraznenie faktu, že sú zhasnuté. Pri fázovaní v zmiešanom zapojení sú splnené všetky podmienky vtedy, keď jedna žiarovka je tmavá a ostatné dve svietia rovnakým jasom. Pri chybnom zapojení (obratený sled fáz) bude pri synchronizovaní na tmu obraz taký ako pri zmiešanom fázovaní a obrátene. Môžeme tiež použiť zmiešané fázovanie a to šiestimi do kruhu usporiadanými žiarovkami (obr. 6.9b). Pri nerovnakých frekvenciách siete a SG tmavé miesto putuje doprava alebo doľava, podľa toho, či sú otáčky a tým i frekvencia stroja vyššia alebo nižšia ako frekvencia siete.

Tento obch sa zastaví, akonáhle sú oba kmitočty rovnaké. Ak zhasnú žiarovky $a-a'$, môžeme alternátor pripojiť. Moderné synchronizačné prístroje bývajú spolu zmontované na ramienku, ktoré obsahuje dvojitý voltmeter, dvojitý kmitomer, nulový voltmeter a synchronoskop. Schéma zapojenia je na obr. 6.10.



Obr. 6.9 Fázovanie SG v zmiešanom zapojení
 a) schéma zapojenia b) usporiadanie žiaroviek do kruhu.



Obr. 6.10 Fázovanie trojfázového SG na sieť (prípojnice A)

6.7 Zaťažovanie SG na tvrdej sieti, meranie V–kriviek

Alternátor (SG) možno zaťažovať buď do impedancie izolovanej od rozvodnej siete, v tzv. ostrovnej prevádzke, teda bez paralelnej spolupráce, alebo do siete, v paralelnej spolupráci s niekoľkými alternátormi tak, aby napätie a frekvencia boli konštantné.

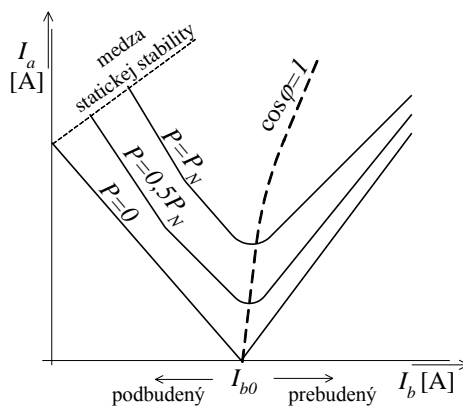
Alternátor, ktorý pripojíme na „tvrdú sieť“, t. j. na sieť, ktorá udržuje stále napätie a kmitočet, bez ohľadu na záťaž, sa správa inak ako alternátor, ktorý pracuje samostatne, v ostrovnej prevádzke.

Synchronný stroj synchronizovaný so sieťou môže pracovať ako generátor alebo motor a súčasne ako zdroj alebo spotrebič jalového výkonu.

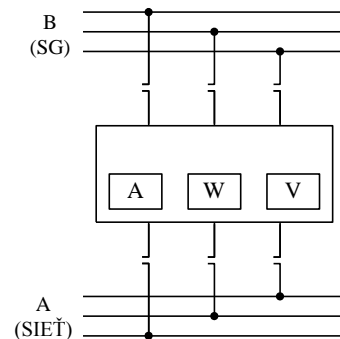
Dodávku alebo odber jalového výkonu synchronného stroja určuje jeho budenie: podbudovaný synchronný stroj (motor alebo generátor) odoberá zo siete jalový výkon a prebudovaný stroj dodáva do siete jalový výkon.

Dodávka alebo odber činného (wattového) výkonu sú od budenia synchronného stroja nezávislé a sú riadené iba dodávkou alebo odberom mechanického výkonu (v laboratóriu alebo skúšobni sa riadi zmenou budenia pohonného jednosmerného motora), pretláčaného cez hriadeľ.

V–krivky synchronného stroja sú závislosti prúdu kotvy od budiaceho prúdu $I_a = f(I_b)$ pri konštantnom činnom výkone $P = \text{konšt.}$, t. j. výkon je parametrom. Pritom predpokladáme konštantné napätie $U = \text{konšt.}$ a konštantnú frekvenciu $f = \text{konšt.}$, pretože synchronný stroj je pripojený na tvrdú sieť. V–krivky meriame obvykle pre $P = 0$, $P = 0,5P_N$, $P = P_N$. Tvar kriviek je na obr. 6.11.



Obr. 6.11 V-krivky SG



Obr. 6.12 Meranie V-kriviek trojfázového SG

Pre meranie V–kriviek na trojfázovom SG platí schéma na obr. 6.12. Schéma je veľmi jednoduchá, pretože v zmysle toho, čo bolo povedané v kap. 6.4 (opis schémy na obr. 6.1), je na prípojniciach A sieť, na prípojniciach B je vyvedený synchronný generátor. Potom

stačí medzi prípojnice *A* a *B* zapojiť merací kufor resp. trojfázový vektorový wattmeter (pozri opis a schému v kap. 2), ktorým meriame prúdy v obvode kotvy i činný výkon dodávaný do siete. V tomto prípade však fázovanie robíme na prípojnice *B*, pretože sieť je cez merací kufor prepojená s prípojniciami *B*.

Postup pri meraní: Po pripojení SG na sieť nastavíme pohonným strojom požadovaný výkon, napr. $P = 0$, čo skontrolujeme wattmetrami. Reguláciu výkonu robíme regulátorom rýchlosti pohonného motora, t. j. v našom prípade budením jednosmerného motora. Napr. odbudzovaním jednosmerného motora má tento snahu otáčavú rýchlosť zvýšiť, ale pretože je spojený so SG, ktorého otáčavá rýchlosť je daná frekvenciou siete, príslušné množstvo činnnej energie sa pretláča cez SG do siete. Ak potrebujeme množstvo činnného výkonu dodávaného do siete znížiť, jednosmerný pohonný motor pribudíme.

Po nastavení správnej hodnoty výkonu a odčítaní prúdu v kotve pri danom I_b zvyšujeme postupne budiaci prúd SG, za každou hodnotou doregulujeme požadovanú hodnotu výkonu a odčítame prúd v kotve I_a –meriame pravú vetvu *V*–krivky. Potom sa zase vrátíme k hodnote I_{b0} , pri ktorej nastalo naľadovanie SG a znižujeme I_b postupne až k nule –meriame ľavú vetvu *V*–krivky. V oboch prípadoch dbáme na to, aby prúd v kotve neprekročil 120 % menovitej hodnoty. Ak $I_b = 0$, *V*–krivka pri $P = 0$ vytne na osi prúdu kotvy hodnotu I_{k0} , známu z vyhodnotenia merania nakrátko (kap. 6.4.1, obr. 6.6).

Ďalšiu *V*–krivku meriame podobne s tým, že nastavíme ďalší požadovaný výkon (napr. $P = 0,5P_N$).

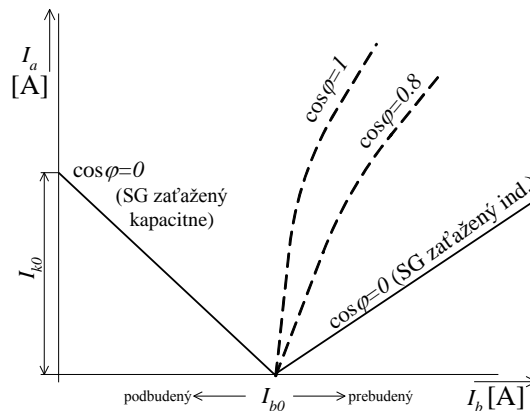
6.8 Meranie regulačných charakteristík SG

Je to závislosť prúdu kotvy od budiaceho prúdu $I_a = f(I_b)$ pri konštantnom napätí $U = U_N$ a kmitočte f_N a pri rôznych účinníkoch ($\cos\varphi$ je parametrom).

Synchrónny generátor zaťažujeme premenlivým výkonom pri konštantnom účinníku $\cos\varphi = 1; 0,8; \dots 0$. Stálosť účinníka v jednej sérii merania sa kontroluje buď $\cos\varphi$ –metrom, alebo pri meraní dvoma wattmetrami v Aronovom zapojení zachovaním pomeru výchyliek dvoch wattmetrov.

Regulačné charakteristiky sú na obr. 6.13. Na obr. 6.10 je v obvode zapojený prístroj na meranie účinníka $\cos\varphi$ –meter (360°-ový). Má štyri kvadranty. Ak je synchrónny stroj v stave motorickom, ručička sa pohybuje v dolnej polovičke prístroja, pritom v podbudenom stave ukazuje ručička do ľavého kvadrantu, označeného „ind“, to znamená, že synchrónny motor predstavuje pre sieť indukčný charakter záťaže. Pri práci v prebudenom stave ukazuje ručička do pravého dolného kvadrantu, označeného „kap“, t. j. kapacitný charakter záťaže.

To znamená, že podbudený synchrónny motor sa chová vzhľadom na sieť (zdroj) ako impedancia indukčného charakteru. Podľa zvyklostí hovoríme, že podbudený synchrónny motor odoberá zo siete jalový výkon.



Obr. 6.13 Regulačné charakteristiky SG

Ak pracuje synchronný stroj pripojený na sieť ako generátor (paralelná spolupráca), ukazuje ručička $\cos\varphi$ –metra do hornej polovičky prístroja. V tomto prípade sa teda chová sieť vzhľadom na SG ako impedancia kapacitného alebo induktívneho charakteru.

Keď SG podbudíme, pohybuje sa ručička v ľavom hornom kvadrante, čiže sieť sa chová vzhľadom na generátor (zdroj) ako impedancia kapacitného charakteru. Sieť dodáva do podbudeného SG jalový výkon, SG odoberá zo siete jalový výkon (na magnetizáciu), teda zaťažuje sieť induktívne, ako tlmivky, transformátor, indukčné motory. Ináč povedané podbudený SG odoberá zo siete jalový výkon, práve tak ako podbudený synchronný motor.

Keď SG prebudíme, pohybuje sa ručička $\cos\varphi$ –metra v pravom hornom kvadrante, označenom „ind“, čiže sieť sa chová vzhľadom na generátor ako impedancia induktívneho charakteru čiže SG je zaťažovaný induktívnym prúdom a on zaťažuje sieť kapacitne (ako kondenzátor). Hovoríme, že prebudený synchronný generátor dodáva do siete jalový výkon, práve tak, ako prebudený synchronný motor.

Zhrnutie: Podbudený synchronný stroj (motor alebo generátor) odoberá zo siete jalový výkon a prebudený synchronný stroj (motor alebo generátor) dodáva do siete jalový výkon.

Opísaný princíp činnosti $\cos\varphi$ –metra možno nahradiť sledovaním ostatných prístrojov v obvode, napr. môže na to slúžiť údaj trojfázového wattmetra.

6.9 Náhly skrat na synchronnom generátore

6.9.1 Teoretický úvod

Každý synchronný stroj musí byť navrhnutý a skonštruovaný tak, aby zniesol priamy skrat na svojich svorkách. Pevnosť vinutí a celej konštrukcie musí byť taká, aby bez akejkoľvek deformácie zniesla náhly skrat zo stavu naprázdno pri menovitom napätí a menovitej rýchlosti, pretože skratové prúdy niekoľkonásobne prevýšia menovité prúdy

synchronného generátora. Náhly skrat môže byť trojpólový, dvojpólový, jednopólový, dvojpólový zemný, postupný, pri ktorom dvojpólový skrat postupne prechádza do trojpólového.

Táto skúška je však veľmi náročná na vybavenie meracieho stanovišťa a robí sa len vtedy, ak ju odberateľ výslovne žiada a ak ju potvrdí výrobca.

V laboratóriách sa robia skúšky náhlým skratom pri zníženom napätí $U=(0,2\div 0,25)U_N$, aby sme pomocou tohto merania mohli určiť reaktancie a časové konštanty stroja. Synchronný stroj sa v prechodovom stave počas náhleho skratu správa inak ako počas ustáleného stavu. Počas prechodového deja po náhlom skrate synchronného stroja sa prejavajú aj iné parametre (reaktancie) ako počas ustáleného stavu. Počas prechodového deja je reaktancia reakcie kotvy podstatne zmenšená demagnetizačným účinkom rotorových vinutí (budiace vinutie a tlmiace vinutie), a preto pretekajúci prúd je omnoho väčší.

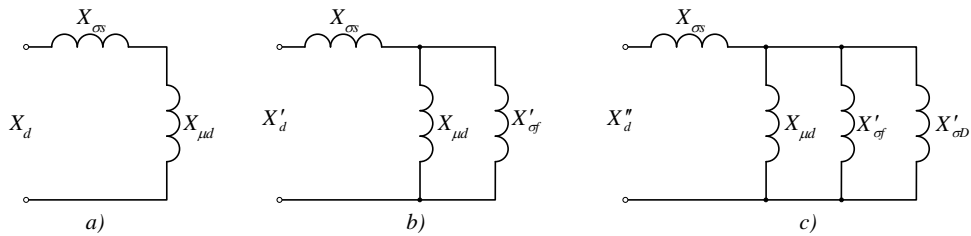
Počas prechodového deja pôsobi:

- prechodná reaktancia v pozdĺžnej osi X'_d ,
- prechodná reaktancia v priečnej osi X'_q ,
- rázová reaktancia v pozdĺžnej osi X''_d ,
- rázová reaktancia v priečnej osi X''_q ,

Prechodná reaktancia v pozdĺžnej osi X'_d , je daná rozptylovými cestami budiaceho rotorového vinutia (index “ σ_f ”) a rázová reaktancia X''_d , sa prejaví vtedy, ak synchronný stroj má na rotore tlmiace vinutie (index “ σ_D ” v osi d a “ σ_Q ” v osi q). V náhradnej schéme synchronného stroja sa to prejaví paralelným pripojením príslušných rozptylových reaktancií k reaktancii reakcie kotvy (obr. 6.14). Pretože meranie sa uskutočňuje na strane statora, všetky parametre budiaceho a tlmiaceho vinutia ($R'_f, L'_{ff}, L'_{\sigma f}$, $R'_D, L'_{DD}, L'_{\sigma D}$, $R'_Q, L'_{QQ}, L'_{\sigma Q}$) sú prepočítané na statorovú stranu. Úlohou laboratórnej skúšky je určiť náhlým skratom tieto parametre.

Zdôrazňujeme, že reaktancie X'_d , X'_q , X''_d a X''_q sa označujú v teórii elektrických strojov čiarkou (X'_d , X'_q), alebo dvoma čiarkami (X''_d , X''_q), čím sa odlišujú od synchronných reaktancií v normálnej prevádzke X_d , X_q a neznamenaajú prepočet hodnôt z rotorovej na statorovú stranu.

$X'_{\sigma f}$ je v strojoch s vyjadrenými pólmi iba v osi d , pretože budiace vinutie je navinuté väčšinou v osi d , v špeciálnych prípadoch sa nachádza aj v osi q . Tlmiace vinutie má rozptylovú reaktanciu aj v osi d ($X'_{\sigma D}$), aj v osi q ($X'_{\sigma Q}$).



Obr. 6.14 Časť náhradnej schémy pri skrate v osi d pre a) synchronnú reaktanciu b) prechodnú reaktanciu c) rázovú reaktanciu

Podľa schémy na obr. 6.14b možno vyjadriť prechodnú reaktanciu nasledovným vzťahom:

$$X'_d = X_{\sigma s} + \frac{X_{\mu d} X'_{\sigma f}}{X_{\mu d} + X'_{\sigma f}} < X_d \quad (6.6)$$

z čoho vyplýva väčší prúd pretekajúci počas tejto časti skratu.

Ak má stroj aj amortizér (tlmiace vinutie) prejaví sa to ďalším zvýšením prúdu, pretože ho obmedzuje rázová reaktancia X''_d , daná paralelným pripojením rozptylovej reaktancie tlmiaceho vinutia v osi d $X'_{\sigma D}$ k reaktancii X'_d podľa obr. 6.14c, čo vyjadruje vzťah:

$$X''_d = X_{\sigma s} + \frac{1}{\frac{1}{X_{\mu d}} + \frac{1}{X'_{\sigma f}} + \frac{1}{X'_{\sigma D}}} \quad (6.7)$$

Pre výpočet rázovej reaktancie v priečnej osi q platí:

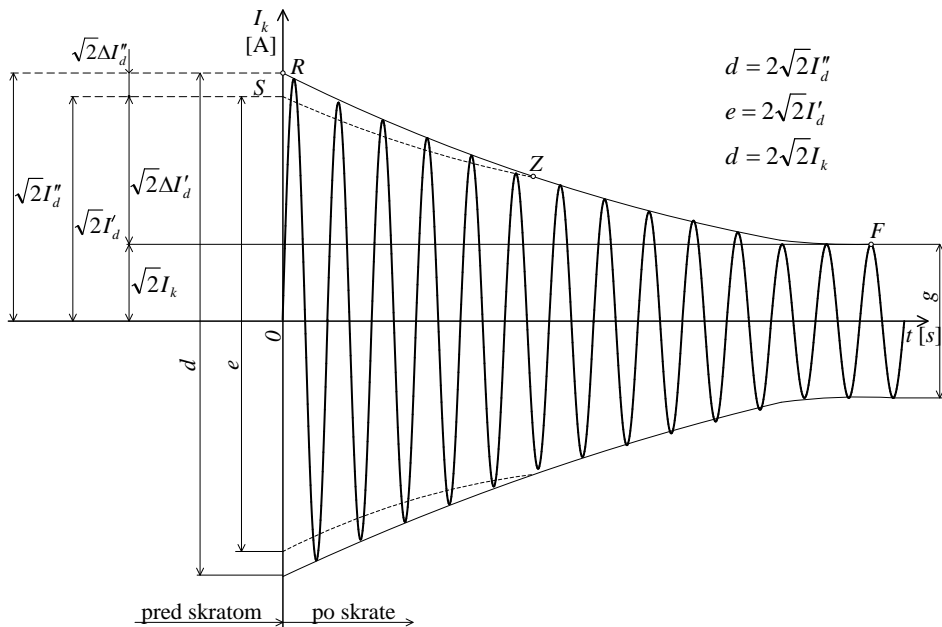
$$X''_q = X_{\sigma s} + \frac{1}{\frac{1}{X_{\mu q}} + \frac{1}{X'_{\sigma Q}}} \quad (6.8)$$

pričom vplyvom nesúmerného tlmiča $X'_{\sigma D} \neq X'_{\sigma Q}$. Ako vidno zo vzťahu (6.8), vynecháva sa reaktancia budiaceho vinutia, lebo ako bolo uvedené vyššie, budenie je navinuté iba v osi d .

Najprv opíšeme priebeh prúdu jednej fázy prechodového deja náhleho skratu. Jeho tvar závisí od okamihu, kedy náhly skrat nastal. Rozlišujeme dva krajné prípady:

- Prípad, keď celkový magnetický tok, spriahnutý so skúmanou fázou vinutia kotvy, je v okamihu skratu nulový ($\Psi = 0$). V tomto prípade je os budiaceho vinutia v okamihu skratu kolmá na os skúmanej fázy kotvy, čo označíme uhlom $\alpha_0 = 90^\circ$. Prúdy indukované v budiacom a tlmiaacom vinutí majú aperiodický tvar, ktoré po čase zaniknú. Im zodpovedajúci tvar prúdu v kotve je zobrazený na obr. 6.15. Jednosmerná zložka prúdu I_a sa nevytvorí, priebeh prúdu je symetrický.
- Prípad, keď celkový magnetický tok, spriahnutý so skúmanou fázou vinutia kotvy je

v okamihu skratu maximálny ($\Psi = \Psi_{max}$). V tomto prípade je os budiaceho vinutia v okamihu skratu totožná s osou skúmanej fázy kotvy (uhol $\alpha_0 = 0^\circ$). Tvar skratového prúdu v kotve je uvedený na obr. 6.16, pričom jednosmerná zložka prúdu I_a dosiahne maximálnu hodnotu. Je to najnepriaznivejší stav, aký môže pri skrate nastať. Prúd v budiacom vinutí má potom tvar podľa obr. 6.17.

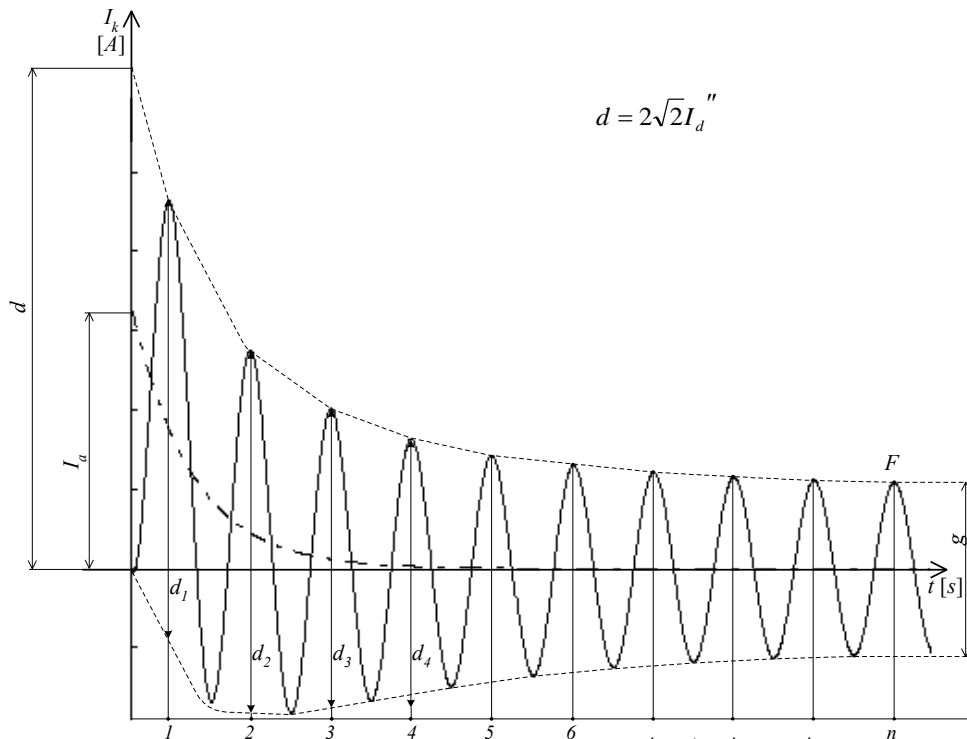


Obr. 6.15 Priebek skratového prúdu jednej fázy SG pri trojpólovom skrate bez jednosmernej zložky

Na obr. 6.15 vidíme, že celý priebek skratového prúdu sa skladá z troch častí:

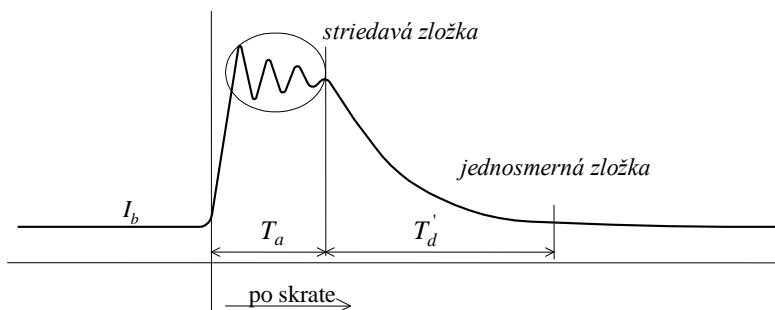
1. časť od bodu R po bod Z je charakterizovaný rázovou reaktanciou X_d'' a tento prechod sa utlmí za časovú konštantu T_d'' . Táto časť býva veľmi krátka.
2. časť prechodového deja skratového prúdu od bodu Z po bod F je charakterizovaná prechodnou reaktanciou X_d' a tento dej sa utlmí za T_d' . Od bodu Z doľava je čiarkovaná čiarou extrapolovaná exponenciála obalovej krivky amplitúd prechodnej zložky skratového prúdu, tj. tej, ktorá sa prejaví medzi bodmi Z a F .
3. časť prechodového deja za bodom F predstavuje ustálenú hodnotu skratového prúdu I_k .

Pri vytvorení jednosmernej zložky sa vyhodnocuje jej veľkosť I_a a aj časová konštantka T_a , za ktorú sa jednosmerná zložka utlmí.



Obr. 6.16 Priebeh skratového prúdu jednej fázy SG pri trojpólovom skrate s jednosmernou zložkou

Odzva prechodového deja počas skratu sa prejaví aj na priebehu budiaceho prúdu podľa obr. 6.17. Striedavá zložka rotorového prúdu sa utlmí za časovú konštantu T_a a jednosmerná zložka rotorového prúdu sa utlmí s časovou konštantou T_d' .

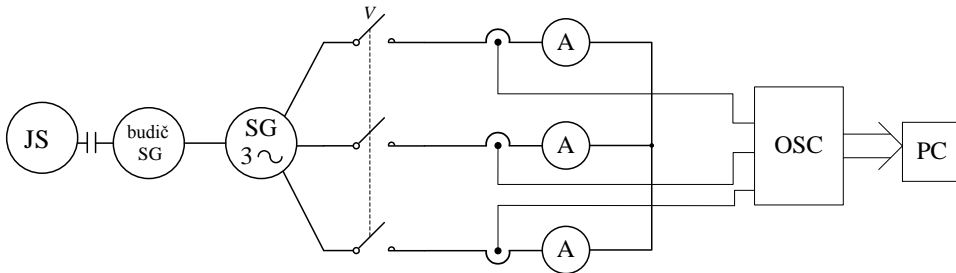


Obr. 6.17 Prechodový dej budiaceho prúdu I_b počas náhleho skratu

Všetky tieto parametre (X_d'' , X_d' , X_d , T_d'' , T_d' , T_a) je nevyhnutné použiť v rovniciach synchronného stroja pri skúmaní jeho správania sa v prechodových dejoch.

6.9.2 Opis merania

Na vyhodnotenie uvedených parametrov je potrebné získať oscilogram prechodového deja náhleho skratu SG zo stavu naprázdno. Schéma zapojenia je uvedená na obr. 6.18.



Obr. 6.18 Schéma zapojenia merania prechodového deja náhleho skratu

Synchronný stroj poháňame jednosmerným strojom (JS) tak, aby napätie SG malo menovitú frekvenciu. Veľkosť svorkového napätia SG nastavíme budiacim prúdom tak, aby veľkosť svorkového napätia bola v rozmedzí $(0,2 \div 0,25)U_N$. Vypínačom V skratujeme všetky fázy SG. Oscilogram prúdov zaznamenáme pamäťovým osciloskopom pomocou snímačov prúdu vo všetkých troch fázach. Pre názornosť môžeme zosnímať aj tvar budiaceho prúdu I_b . Zosnímané dáta uložíme do počítača pomocou vhodného programu a ďalej ich môžeme spracovať napr. v programe Microsoft Excel.

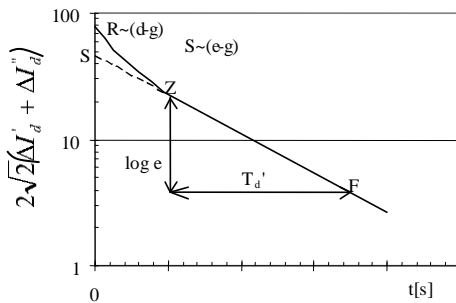
6.9.3 Vyhodnotenie merania

Uvažujme SG aj s tlmiacim vinutím, čiže amortizérom. Z osciloskopického priebehu prúdu v jednej fáze by sa uvedené parametre a prúdy I_d'' a I_d' určovali veľmi nepresne. Preto sa odporúča kvôli presnejšiemu vyhodnoteniu použiť semilogaritmický graf alebo použiť počítačové spracovanie priebehov prúdov v grafe s logaritmickou mierkou. Postup pri vyhodnotení je nasledovný:

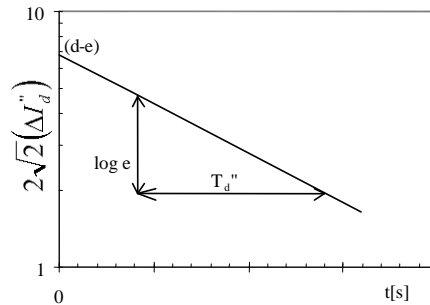
1. V oscilografickom priebehu statorového skratového prúdu v jednej fáze (najlepšie v tej, kde je aj jednosmerná prechodová zložka, obr. 6.16) zostrojíme obalové krivky. Časovú os rozdelíme na n -rovnakých periód, až po priebeh, kedy je skratový priebeh ustálený na hodnote $g = 2\sqrt{2}I_k$ za bodom F (obr. 6.16).
2. Do tabuľky zapíšeme hodnoty rozdielu $\overline{d-g}$ pre každú periódu (body 1,2,3...n, $d_1, d_2, d_3 \dots d_n$) až pokiaľ $\overline{d-g} = 0$, pričom d je rozdiel obalových kriviek v jednotlivých periódach počas prechodovej zložky skratového prúdu a g je rozdiel obálok v ustálenom stave. Takto získané hodnoty vynesieme do grafu, kde os x

predstavuje časovú os s jednotlivými periódami $t[s]$ a os y je logaritmická a predstavuje hodnoty $\overline{d-g}$, ktoré sú úmerné dvojamplitúdam $2\sqrt{2}(\Delta I'_d + \Delta I''_d)$, kde $\Delta I'_d$ a $\Delta I''_d$ sú zložky prúdu I_d a sú uvedené na obr. 6.15.

3. Aby sme mohli oddeliť od seba zložky $\Delta I''_d$ a $\Delta I'_d$, extrapolujeme priamku \overline{ZF} do zvislej osi (obr. 6.19), čím získame bod S (obr. 6.15), ktorý určuje $\overline{e-g} \approx 2\sqrt{2}\Delta I'_d$ a veľkosť efektívneho prúdu I'_d vypočítame podľa vzťahu $I'_d = I_k e/g$ [A]. Prechodnú reaktanciu X'_d určíme podľa vzťahu $X'_d = U_{0f} / I'_d$, kde U_{0f} je hodnota fázového napätia tesne pred skratom.
4. Časovú konštantu T'_d určíme tak, že v ľubovoľnom mieste priamky \overline{ZF} (obr. 6.19) spustíme úsečku kolmú na časovú os, ktorej veľkosť je $\log e$ (kde e je Eulerovo číslo). Časová konštantu T'_d je potom daná veľkosťou úsečky, ktorá je rovnobežná s časovou osou podľa obr. 6.19.



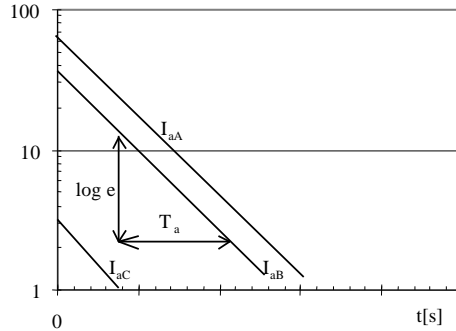
Obr. 6.19 Priebeh $2\sqrt{2}(\Delta I'_d + \Delta I''_d)$ v semilogaritmických súradniciach.



Obr. 6.20 Priebeh $2\sqrt{2}(\Delta I''_d)$ v semilogaritmických súradniciach.

5. Prúd I''_d určíme na základe rozdielov klesajúcej krivky RZ od priamky \overline{SZF} (obr. 6.19) a tento rozdiel vynesieme opäť v logaritmických súradniciach podľa obr. 6.20. Extrapoláciou priamky na zvislú os dostaneme veľkosť $\overline{d-e}$, ktorá je úmerná $2\sqrt{2}\Delta I''_d$. Efektívnu veľkosť prúdu I''_d vypočítame podľa vzťahu $I''_d = I_k d/g$. Rázovú reaktanciu X''_d určíme podľa vzťahu $X''_d = U_{0f} / I''_d$, kde U_{0f} je takisto hodnota fázového napätia tesne pred skratom. Časovú konštantu T''_d určíme podobným spôsobom ako T'_d podľa obr. 6.20.
6. Stredná krivka medzi obáľkami predstavuje jednosmernú prechodovú zložku I_d (obr. 6.16), ktorá je pre každú fázu iná. Hodnoty jednosmerných zložiek jednotlivých fáz I_{dA} , I_{dB} , I_{dC} , vynesieme v semilogaritmických súradniciach podľa obr. 6.21, čím

získame tri rovnobežné priamky. Extrapoláciou týchto troch priamok na zvislú os získame maximálne hodnoty jednotlivých jednosmerných zložiek pre každú fázu. Časovú konštantu jednosmerných zložiek T_a určíme podobne ako časové konštanty T'_d alebo T''_d z niektorej z troch priamok I_{aA} , I_{aB} , I_{aC} , na obr. 6.21.



Obr. 6.21 Priebeh prúdov I_{aA} , I_{aB} , I_{aC} v semilogaritmických súradniciach

Získané parametre je možné použiť v rovniciach, ktoré opisujú správanie SG v podmienkach náhleho skratu. Ak vznikol náhly skrat na SG zo stavu naprázdno a meraný SG nemá tlmiace vinutie, tak potom môžeme prúdy statora zapísať v komplexnom tvare nasledovne:

$$\mathbf{I} = -\frac{U_{0\max}}{X_d} \angle(\alpha) - U_{0\max} \angle(\alpha) \left[\frac{1}{X'_d} - \frac{1}{X_d} \right] e^{-\frac{t}{T'_d}} + \frac{U_{0\max}}{X'_d} \angle(\alpha_0) e^{-\frac{t}{T_a}} \quad (6.9)$$

kde $\alpha = \alpha_0 + \omega t$.

Z komplexnej rovnice (6.9) môžeme vyjadriť reálne zložky prúdov pre jednotlivé fázy, pretože fázory statorových veličín (\mathbf{I} , $\boldsymbol{\psi}$) sú vzťahnuté k osi fázy A (ako osi reálnej):

$$I_A = -\frac{U_{0\max}}{X_d} \cos(\alpha_0 + \omega t) - U_{0\max} \left(\frac{1}{X'_d} - \frac{1}{X_d} \right) e^{-\frac{t}{T'_d}} \cos(\alpha_0 + \omega t) + \frac{U_{0\max} \cos \alpha_0}{X'_d} e^{-\frac{t}{T_a}} \quad (6.10)$$

$$I_B = -\frac{U_{0\max}}{X_d} \cos(\alpha_0 + \omega t - \frac{2}{3}\pi) - U_{0\max} \left(\frac{1}{X'_d} - \frac{1}{X_d} \right) e^{-\frac{t}{T'_d}} \cos(\alpha_0 + \omega t - \frac{2}{3}\pi) + \frac{U_{0\max} \cos(\alpha_0 - \frac{2}{3}\pi)}{X'_d} e^{-\frac{t}{T_a}} \quad (6.11)$$

$$I_C = -\frac{U_{0\max}}{X_d} \cos(\alpha_0 + \omega t + \frac{2}{3}\pi) - U_{0\max} \left(\frac{1}{X'_d} - \frac{1}{X_d} \right) e^{-\frac{t}{T'_d}} \cos(\alpha_0 + \omega t + \frac{2}{3}\pi) + \frac{U_{0\max} \cos(\alpha_0 + \frac{2}{3}\pi)}{X'_d} e^{-\frac{t}{T_a}} \quad (6.12)$$

Ak vznikol súmerný skrat na SG s vyjadrenými pólmi zo stavu naprázdno a SG má aj amortizér, tak potom môžeme prúdy statora zapísať v komplexnej forme nasledovne:

$$\mathbf{I} = \left[\frac{\sqrt{2}U_0}{2} \left(\frac{1}{X_d''} + \frac{1}{X_q''} \right) e^{-\frac{t}{T_a}} - \frac{\sqrt{2}U_0}{2} \left(\frac{1}{X_q''} - \frac{1}{X_d''} \right) \angle(2\omega t) e^{-\frac{t}{T_a}} - \sqrt{2}U_0 \left(\frac{1}{X_d''} - \frac{1}{X_d'} \right) \angle(\omega t) e^{-\frac{t}{T_d''}} - \sqrt{2}U_0 \left(\frac{1}{X_d'} - \frac{1}{X_d} \right) \angle(\omega t) e^{-\frac{t}{T_d'}} - \frac{\sqrt{2}U_0}{X_d} \angle(\omega t) \right] \angle(\alpha_0) \quad (6.13)$$

V prípade dokonalého tlmieča platí, že $X_d'' = X_q''$. Z toho vyplýva, že rovnica (6.13) bude mať nasledovný tvar:

$$\mathbf{I} = \left[\frac{\sqrt{2}U_0}{X_d''} e^{-\frac{t}{T_a}} - \sqrt{2}U_0 \left(\frac{1}{X_d''} - \frac{1}{X_d'} \right) \angle(\omega t) e^{-\frac{t}{T_d''}} - \sqrt{2}U_0 \left(\frac{1}{X_d'} - \frac{1}{X_d} \right) \angle(\omega t) e^{-\frac{t}{T_d'}} - \frac{\sqrt{2}U_0}{X_d} \angle(\omega t) \right] \angle(\alpha_0) \quad (6.14)$$

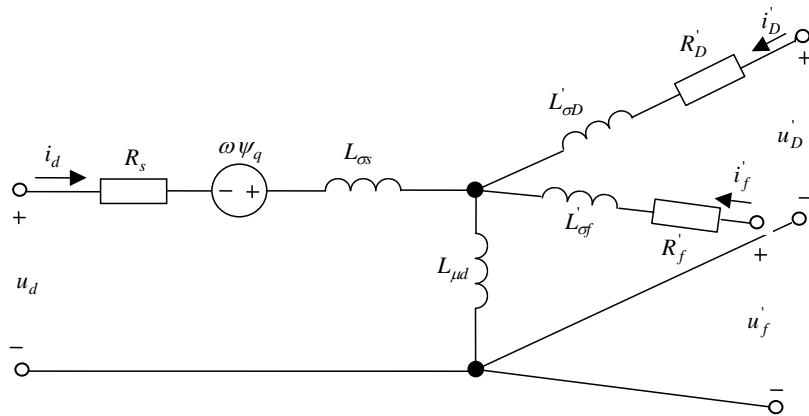
Podobným spôsobom ako z rovnice (6.9) by sme mohli vyjadriť prúdy pre jednotlivé fázy. Uvedené rovnice a v nich použité namerané parametre umožňujú vyšetrovať prechodové a ustálené deje synchronného stroja. Tieto rovnice je možné nasimulovať pomocou niektorého simulačného jazyka a tak získať priebehy vyššie uvedených prúdov počas skratu synchronného stroja a porovnať ich s teoretickými priebehmi. Simuláciou je možné riešiť aj také prechodové a ustálené stavy, ktoré sa v prevádzke považujú za havarijné a nebolo by ich možné vyšetrovať meraním.

6.10 Prvky náhradnej schémy a simulácie

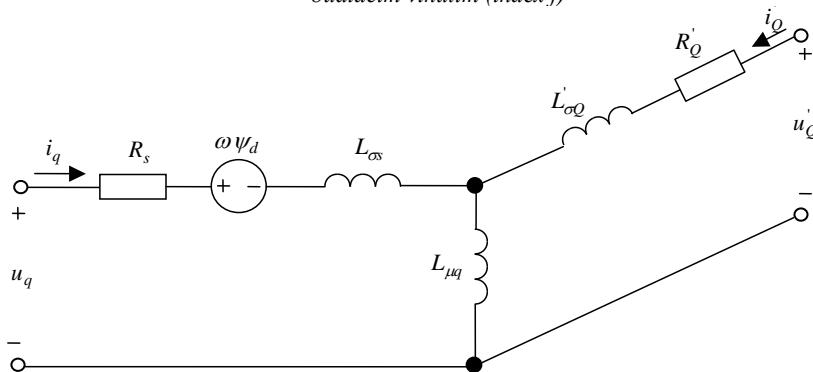
V simuláciách prechodových a ustálených stavov synchronných strojov potrebujeme tieto parametre:

- činný odpor jednej fázy vinutia kotvy na statore R_s ,
- synchronnú reaktanciu v osi d X_d , a v osi q X_q , resp. indukčnosť L_d , L_q ,
- reaktanciu reakcie kotvy v osi d $X_{\mu d}$, a v osi q $X_{\mu q}$, resp. indukčnosť $L_{\mu d}$, $L_{\mu q}$,
- rozptylovú reaktanciu statorového vinutia $X_{\sigma s}$, resp. indukčnosť $L_{\sigma s}$,
- činný odpor, vlastnú a rozptylovú indukčnosť budiaceho vinutia $R'_f, L'_{ff}, L'_{\sigma f}$, prepočítané na statorovú stranu (v súlade so všeobecnou teóriou elektrického stroja používame v tejto kapitole na označenie parametrov budiaceho vinutia index „f“),
- činný odpor, vlastnú a rozptylovú indukčnosť tlmiaceho vinutia v osi d , $R'_D, L'_{DD}, L'_{\sigma D}$, prepočítané na statorovú stranu (v súlade so všeobecnou teóriou elektrického stroja používame v tejto kapitole na označenie parametrov tlmiaceho vinutia v osi d index „D“),

- činný odpor, vlastnú a rozptylovú indukčnosť tlmiaceho vinutia v osi q , $R'_Q, L'_{\sigma Q}, L'_{\sigma Q}$, prepočítané na statorovú stranu (v súlade so všeobecnou teóriou elektrického stroja používame v tejto kapitole na označenie parametrov tlmiaceho vinutia v osi q index „ Q “).



Obr. 6.22 Náhradná schéma synchronného stroja v osi d s tlmiacim (index D) a budiacim vinutím (index f)



Obr. 6.23 Náhradná schéma synchronného stroja v osi q s tlmiacim vinutím (index Q)

Na obr. 6.22 a 6.23 vidíme náhradné schémy synchronného stroja v osiach d a q s prvkami, ktoré reprezentujú budiace a tlmiace vinutia.

6.10.1 Meranie synchronných reaktancií

Synchronné reaktancie X_d a X_q sa všeobecne udávajú pre nenasýtený stav. Pre stroje s hladkým a rovnomerne drážkovaným rotorom je pozdĺžna synchronná reaktancia X_d rovná priečnej synchronnej reaktancii X_q . V normálnych dvojpólových alternátoroch sa berie $X_d = X_q$, aj keď to nie je presné.

V strojoch s vyjadrenými pólmi je v smere osi pólov magnetov pozdĺžna synchronná reaktancia: $X_d = X_{\mu d} + X_{\sigma s}$; v priečnej polohe prechádza tok naprieč pólom: $X_q = X_{\mu q} + X_{\sigma s}$, kde $X_{\mu d} > X_{\mu q}$ sú reaktancie striedavého vinutia kotvy (reaktancie reakcie kotvy) pre pozdĺžnu a priečnu polohu rotora, $X_{\sigma s}$ je v oboch polohách tá istá rozptylová reaktancia striedavého vinutia statora. V moderných strojoch s vyjadrenými pólmi býva $X_q = (0,7 \text{ až } 0,75)X_d$, v starších $X_q = (0,5 \text{ až } 0,7)X_d$. Určíme ich buď z merania naprázdno (iba X_d), sklzovou metódou (X_d a X_q), alebo ďalšími metódami uvedenými v kap. 8 o reluktančnom synchronnom motore (RSM) a v STN 35 0204.

- a) Z merania naprázdno a nakrátko, pri ktorých sa uplatňuje len X_d , určíme X_d , x_d a u_K podľa kap. 6.4.2.1.
- b) Pri meraní sklzovou metódou nenabudený rotor (rozpojené rotorové vinutie) skúšaného synchronného stroja poháňame dostatočne silným jednosmerným motorom (aby nekýval) rýchlosťou len nepatrne odlišnou od synchronnej n_s . Stator je pritom trojfázovo napájaný zníženým napätím $(0,1 \text{ až } 0,25)U_N$ v rovnakom zmysle ako sa otáča rotor tak, aby sa neudržal v synchronizme. Keď je magnetický odpor (reluktancia) obvodu najmenší, prechádza magnetický tok striedavého vinutia pozdĺžnou polohou pólov rotora a nameriame X_d pri najmenšom prúde I_{MIN} . V priečnej polohe je reluktancia obvodu (magnetický odpor) najväčšia, nameriame X_q pri najväčšom prúde I_{MAX} . Presnú polohu rotora môžeme kontrolovať magnetoelektrickým voltmetrom (s otočnou cievkou v poli permanentného magnetu) na krúžkoch otvoreného vinutia rotora, pretože magnetický tok vinutia statora v ňom indukuje striedavé napätie U_{irot} so sklzovým kmitočtom. V pozdĺžnej polohe je $U_{irot} = 0$.

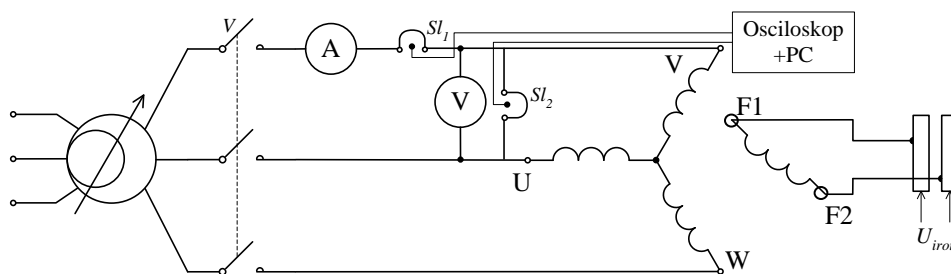
Pretože napájací zdroj nebýva dost' tvrdý, kolíše napätie na svorkách stroja podľa odobieraného prúdu, takže:

$$X_d = \frac{U_{MAX}}{I_{MIN}} \quad \text{pre} \quad U_{irot} = 0 \quad (6.15)$$

$$X_q = \frac{U_{MIN}}{I_{MAX}} \quad \text{pre} \quad U_{irot} = \pm max \quad (6.16)$$

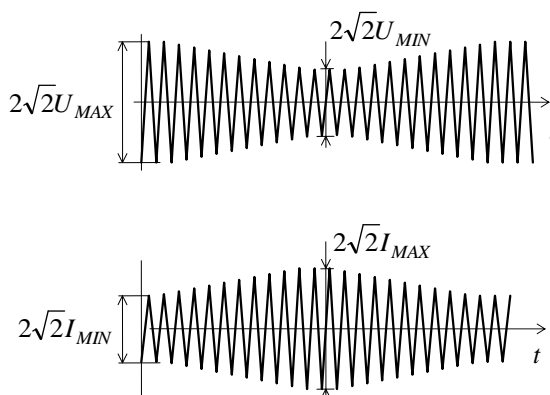
kde U_{MAX} , I_{MIN} , U_{MIN} a I_{MAX} značia efektívne hodnoty pre fázu statora (t. j. ak meriame združené napätie, musíme ho prepočítať na fázové), odpor kotvy je zanedbaný.

Pretože prúd a rýchlosť v priebehu merania kolíšu, je náročné určiť efektívne hodnoty. Preto je presnejšie brať okamžité hodnoty, odčítané z oscilogramu. Oscilografovanie prúdu a napätia je výhodné aj preto, že sa neuplatní tlmenie meracích ručičkových prístrojov. Schéma zapojenia pre meranie synchronných reaktancií je na obr. 6.24. Sl_1 je slučka oscilografu na meranie prúdu, Sl_2 je slučka oscilografu na meranie napätia.



Obr. 6.24 Meranie synchronných reaktancií sklzovou metódou

Z oscilogramov (obr. 6.25), ktoré musia mať známu mierku, určíme efektívne hodnoty napätí a prúdov U_{MAX} , U_{MIN} , I_{MAX} , I_{MIN} a počítame X_d a X_q tak, ako to bolo uvedené vyššie.



Obr. 6.25 Oscilogramy prúdu a napätia pre výpočet synchronných reaktancií

Ďalšie metódy vyšetrovania synchronných reaktancií sú podrobnejšie uvedené v kap. 8 o RSM, kde je urobený aj podrobný prehľad metód, ktoré sú vhodné na meranie X_d a X_q .

6.10.2 Meranie rozptylovej reaktancie statorového vinutia X_{σ}

Podľa STN 35 0204 sa rozptylová reaktancia vinutia statora X_{σ} získa meraním pri vybratom rotore a určí sa napájaním všetkých troch fáz vinutia statora z cudzieho zdroja s napätím menovitej frekvencie. Z nameraných hodnôt napätia, prúdu a výkonu sa vypočíta celková rozptylová reaktancia vinutia statora X_c podľa vzťahu

$$X_c = \sqrt{Z^2 - R^2}$$

$$\text{kde } Z = \frac{U_f}{I_f}, R = \frac{P}{3I^2}$$

Napätie zdroja sa volí tak, aby prúd vo vinutiach bol maximálne menovitý. Rozptylová reaktancia vinutia statora $X_{\sigma s}$ sa vypočíta zo vzťahu

$$X_{\sigma s} = X_c - X_v$$

kde X_v je reaktancia rozptylu poľa vrtania. Na stanovenie X_v sa do vrtania statora navinie pomocná cievka s dĺžkou rovnou dĺžke statora a šírke rovnej pólóvemu rozstupu. Aktívne strany tejto cievky sa upevnia na klíny drážok a čelné strany sa vytvárajú podľa okrajov zväzkov aktívneho železa po obvode pólóvého rozstupu tak, aby boli chránené pred vplyvom rozptylových tokov okolo čelných častí vinutí. K pomocnej cievke sa pripojí voltmeter s pokiaľ možno veľkým vnútorným odporom.

Reaktancia rozptylu poľa vrtania X_v sa vypočíta podľa vzťahu:

$$X_v = \frac{U_c}{I_c} \frac{Nk_v}{N_c}$$

kde U_c a I_c sú napätie a prúd zmerané na pomocnej cievke, N je počet závitov jednej fázy vinutia statora v sérii, k_v činiteľ vinutia statora a N_c počet závitov pomocnej cievky.

Uskutočniť meranie s vybratým rotorom je veľmi zložitá a v prípade veľkých synchronných strojov v laboratóriách takmer nemožná.

Preto pri zisťovaní rozptylovej reaktancie statorového vinutia $X_{\sigma s}$ vychádzame zo všeobecnej teórie elektrického stroja, kde možno odvodiť, že netočivá reaktancia $X_0 = X_{\sigma s}$. Preto použijeme metódu merania netočivej reaktancie.

Podľa STN 35 0204 sa netočivá zložka reaktancie určuje metódou jednofázového napájania troch fáz, pričom sa spoja všetky tri fázy vinutí do série, alebo paralelne, stroj sa otáča menovitými otáčkami a budiace vinutie je spojené nakrátko. Pri skúške sa meria napätie U , prúd I a výkon P pri niekoľkých hodnotách privedeného napätia. Napätie treba voliť tak, aby prúd vo vinutí statora neprevyšoval menovitú hodnotu.

Netočivá reaktancia a odpor nulovej zložky sa vypočítajú podľa vzťahu:

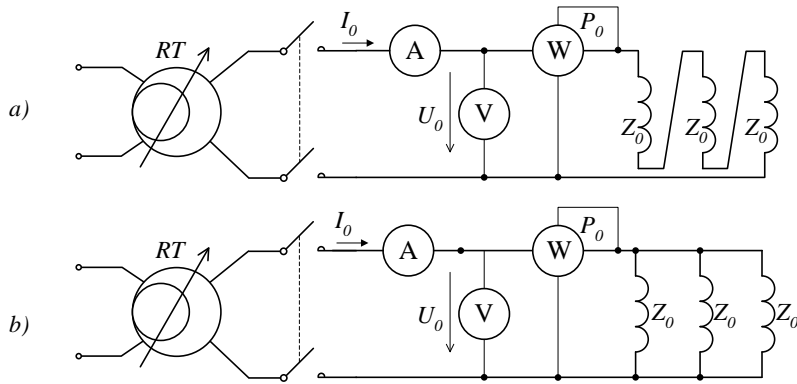
$$X_0 = \sqrt{Z_0^2 - R_0^2} \quad (6.17a)$$

kde pri sériovom zapojení fáz vinutia (obr. 6.26a)

$$Z_0 = \frac{U_0}{3I_0}, R_0 = \frac{P_0}{3I_0^2} \quad (6.17b)$$

a pri paralelnom zapojení fáz vinutia (obr. 6.26b)

$$Z_0 = 3 \frac{U_0}{I_0}, R_0 = \frac{3P_0}{I_0^2} \quad (6.17c)$$



Obr. 6.26 Schéma zapojenia pre meranie netočivej zložky impedancie synchronného stroja;
 a) pri sériovom zapojení fáz vinutia; b) pri paralelnom zapojení fáz vinutia

6.10.3 Určenie parametrov budiaceho vinutia

Do simulačného modelu synchronného stroja potrebujeme poznať aj parametre budiaceho vinutia, ktoré musia byť prepočítané na satorovú stranu: $R'_f, L'_{ff}, L'_{\sigma f}$, (ak predpokladáme, že budiace vinutie je navinuté iba v osi d).

6.10.3.1 Meranie odporu budiaceho vinutia R'_f

Odpor budiaceho vinutia R_f meriame Ohmovou metódou na krúžkoch budenia. Kefy sú odpojené a jednosmerné napätie je priložené na krúžky budiaceho vinutia. Odmeraný odpor je potrebné prepočítať na satorovú stranu podľa vzťahu:

$$R'_f = \frac{3}{2} g^2 R_f \tag{6.18}$$

kde g je redukčný činiteľ získaný v kap. 6.4.1.

6.10.3.2 Meranie vlastnej a rozptylovej indukčnosti budiaceho vinutia $L'_{ff}, L'_{\sigma f}$

Vlastnú indukčnosť budiaceho vinutia určíme podľa vzťahu:

$$L'_{ff} = L'_{\sigma f} + L_{\mu d} = \frac{3}{2} g^2 L_{\sigma f} + L_{\mu d} \tag{6.19a}$$

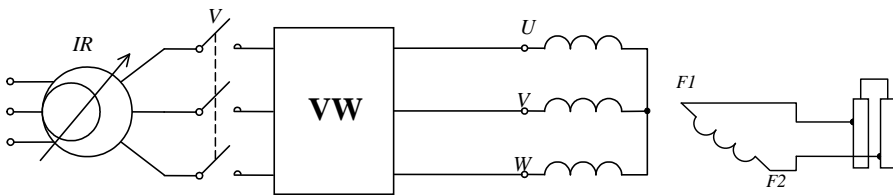
pričom $L'_{\sigma f}$ určíme z merania náhlych skratov (kap. 6.9.1) tak, že zo vzťahu (6.6) vypočítame $X'_{\sigma f}$ a vypočítame z nej indukčnosť. Predpokladáme, že vo vzťahu (6.6)

poznáme X'_d (určená z náhleho skratu), ďalej $X_{\sigma s}$ (odmeraná podľa kap. 6.10.3) a $X_{\mu d}$ určenú takto:

$$X_{\mu d} = X_d - X_{\sigma s}. \quad (6.19b)$$

6.10.4 Určenie parametrov tlmiaceho vinutia

Do simulačného modelu synchronného stroja potrebujeme poznať parametre tlmiaceho vinutia v osi d aj v osi q , ktoré musia byť prepočítané na statorovú stranu: $R'_D, L'_{DD}, L'_{\sigma D}, R'_Q, L'_{QQ}, L'_{\sigma Q}$. Meranie môžeme urobiť pri jednofázovom napájaní, ktoré je podrobne opísané v kap. 8.3.2 alebo urobíme meranie pri zabrzdennom rotore v osi d a v osi q , ak je budiace vinutie skratované a statorové vinutie je napájané zo súmerného trojfázového zdroja zníženým napätím tak, aby vinutím tiekol prúd, ktorý nespôsobí oteplenie vinutia. Meranie uskutočnime podľa schémy zapojenia na obr. 6.27. Pri tomto meraní je potrebné použiť vektorový wattmeter, pretože potrebujeme merať veličiny v jednej fáze, ako je to opísané ďalej.



Obr. 6.27 Schéma zapojenia pre meranie parametrov tlmiaceho vinutia synchronného stroja

Meranie vyhodnotíme nasledovne: Rotor zabrzdíme a odmeriame napätie U_k , prúd I_k a $\cos\varphi_k$ iba v jednej fáze, ktorú sledujeme počas celého merania a vypočítame impedanciu $Z_k = U_k/I_k$. Vypočítame reálnu a imaginárnu zložku impedancie Z_k : $R_k = Z_k \cos\varphi_k$ a $X_k = Z_k \sin\varphi_k$. Uvedené meranie urobíme postupne pre každú polohu rotora \mathcal{G} , po jednom mechanickom stupni pre celý pólový rozstup. Graficky vyhodnotíme závislosť R_k – celkový odpor a X_k – celkovú rozptylovú reaktanciu ako funkciu polohy rotora \mathcal{G} . Z priebehu určíme maximálne hodnoty, ktoré zodpovedajú osi d (R_{kd}, X_{kd}) a minimálne hodnoty, ktoré zodpovedajú osi q (R_{kq}, X_{kq}).

Potom odpor tlmiaceho vinutia v osi d R'_D prepočítaný na statorovú stranu určíme podľa vzťahu:

$$R'_D = R_{kd} - R_s - R'_f \quad (6.20)$$

ak poznáme R_s (kap. 6.2) a R'_f (kap. 6.10.3.1).

Rozptylovú reaktanciu tlmiaceho vinutia v osi d $X'_{\sigma d}$ prepočítanú na statorovú stranu určíme podľa vzťahu:

$$X'_{\sigma d} = X_{kd} - X_{\sigma s} - X'_{\sigma f} \quad (6.21)$$

ak poznáme $X_{\sigma s}$ (kap. 6.10.2) a $L'_{\sigma f}$ (kap. 6.10.3.2). Uvedenú rozptylovú reaktanciu tlmiaceho vinutia môžeme určiť aj zo vzťahu (6.7).

Vlastnú reaktanciu tlmiaceho vinutia v osi d X'_{DD} prepočítanú na statorovú stranu určíme podľa vzťahu:

$$X'_{DD} = X'_{\sigma d} + X_{\mu d} = \frac{3}{2} g^2 X_{\sigma d} + X_{\mu d} \quad (6.22)$$

Podobným spôsobom postupujeme pri vyhodnocovaní parametrov tlmiaceho vinutia v osi q . Odpor tlmiaceho vinutia v osi q R'_Q prepočítaný na statorovú stranu určíme podľa vzťahu:

$$R'_Q = R_{kq} - R_s \quad (6.23)$$

Rozptylovú reaktanciu tlmiaceho vinutia v osi q $X'_{\sigma q}$ prepočítanú na statorovú stranu určíme podľa vzťahu:

$$X'_{\sigma q} = X_{kq} - X_{\sigma s} \quad (6.24)$$

Vlastnú reaktanciu tlmiaceho vinutia v osi q X'_{QQ} prepočítanú na statorovú stranu určíme podľa vzťahu:

$$X'_{QQ} = X'_{\sigma q} + X_{\mu q} = \frac{3}{2} g^2 X_{\sigma q} + X_{\mu q} \quad (6.25)$$

Z týchto reaktancií je potrebné vypočítať indukčnosti, ktoré vystupujú v matematickom modeli uvedenom v nasledujúcej kapitole.

6.10.5 Simulácie prechodových stavov

Na simuláciu použijeme rovnice, ktoré sú odvodené vo všeobecnej teórii elektrických strojov v sústave $d, q, 0$. Má to tú výhodu, že vzťahná sústava je stotožnená s rotorom, takže rotorové rovnice a veličiny netreba transformovať. Prúdy a napätia statora treba transformovať do $d, q, 0$ podľa známych vzťahov Parkovej transformácie a po vyriešení rovníc urobiť spätnú transformáciu tak, aby sme dostali prúdy a napätia v statorovom vinutí.

Tu uvedieme príklad simulácie procesu pripojenia roztočeného synchronného stroja (motora alebo generátora) na sieť v stave naprázdno a zaťaženie menovitým momentom resp. výkonom. Možno však simulovať aj stavy, ktoré sa reálne nedajú merať, čo pomáha

lepšie poznať vlastnosti stroja.

Simuláciám synchronného stroja, ak pracuje ako motor sa venujú aj ďalšie dve kapitoly tejto publikácie: jednak kap. 7.2, ktorá sa zaoberá synchronnými strojmi s permanentnými magnetmi, jednak kap. 8, ktorá sa venuje reluktančným synchronným motorom.

Na simuláciu synchronného stroja s budiacim vinutím v osi d na rotore a tlmiacim vinutím v osi d a q použijeme tieto rovnice:

$$u_d = \sqrt{\frac{3}{2}} U_{\max} \cos(\omega_s t - \vartheta_r) \quad (6.26)$$

$$u_q = \sqrt{\frac{3}{2}} U_{\max} \sin(\omega_s t - \vartheta_r) \quad (6.27)$$

$$u_d = R_s i_d + \frac{d\psi_d}{dt} - \psi_q \omega \quad (6.28)$$

kde

$$\psi_d = (L_{\sigma s} + L_{\mu d}) i_d + L_{\mu d} (i'_f + i'_D) = L_d i_d + L_{\mu d} (i'_f + i'_D) \quad (6.29)$$

$$u_q = R_s i_q + \frac{d\psi_q}{dt} + \psi_d \omega \quad (6.30)$$

kde

$$\psi_q = (L_{\sigma s} + L_{\mu q}) i_q + L_{\mu q} i'_Q = L_q i_q + L_{\mu q} i'_Q \quad (6.31)$$

$$u'_f = R'_f i'_f + \frac{d\psi'_f}{dt} \quad (6.32)$$

kde

$$\psi'_f = L_{\mu d} (i_d + i'_D) + L'_{ff} i'_f \quad (6.33)$$

$$u'_D = R'_D i'_D + \frac{d\psi'_D}{dt} \quad (6.34)$$

kde

$$\psi'_D = L_{\mu d} (i_d + i'_f) + L'_{DD} i'_D \quad (6.35)$$

$$u'_O = R'_O i'_O + \frac{d\psi'_O}{dt} \quad (6.36)$$

kde

$$\psi'_O = L_{\mu q} i_q + L'_{OO} i'_O \quad (6.37)$$

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{p}{J} (m_e - m_x) \quad (6.38)$$

kde

$$m_e = p(\Psi_d i_q - \Psi_q i_d) \quad (6.39)$$

$$\mathcal{G}_r = \int \omega dt \quad (6.40)$$

$$\omega_s = 2\pi f_s \quad (6.41)$$

Ak chceme zistiť veľkosť záťažového uhla synchronného stroja, môžeme ho vypočítať podľa vzťahu:

$$\mathcal{G}_L = \mathcal{G}_r - \omega_s t \quad (6.42)$$

Uvedené rovnice (6.26-6.42) platia pre motor. Ich úpravu pre simuláciu generátora uvedieme v kap. 6.10.5.2.

Tlmiace vinutie býva skratované, to znamená, že napätia u'_D a u'_Q sú rovné nule.

Pre prepočet napätia a prúdu v budiacom vinutí na statorovú stranu platí:

$$i'_f = \frac{2}{3} \frac{1}{g} i_f \quad u'_f = g u_f \quad (6.43)$$

Moment zotrvačnosti synchronného stroja J určíme analytickým výpočtom z geometrických rozmerov rotora, alebo niektorou z meracích metód. (Pozri kap. 9.1.4).

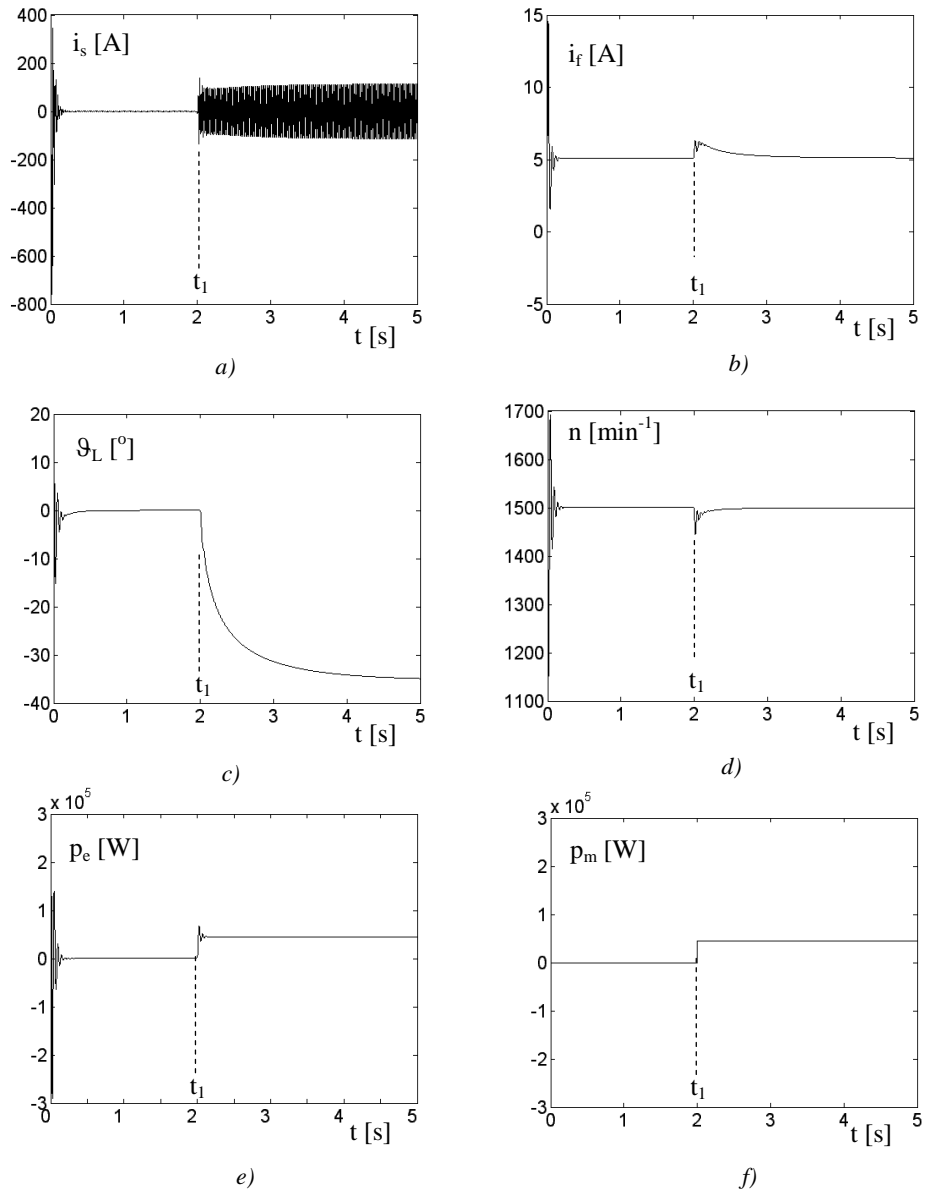
Na zistenie skutočných statorových prúdov je potrebné urobiť spätnú transformáciu, ktorú urobíme podľa nasledovného vzťahu:

$$i_s = \sqrt{\frac{2}{3}} i_d \cos(\mathcal{G}_r) - \sqrt{\frac{2}{3}} i_q \sin(\mathcal{G}_r) \quad (6.44)$$

V ďalších dvoch fázach budú priebehy posunuté o $\pm 2\pi/3$.

Na základe nameraných parametrov synchronného stroja a uvedených rovníc v sústave d, q, O , môžeme simulovať správanie sa stroja v prechodových a ustálených stavoch na sieti, či už ako motor alebo ako generátor. V ďalších kapitolách ukážeme priebehy

okamžitých hodnôt týchto veličín: $i_s=f(t)$, $i_f=f(t)$, $\vartheta_L=f(t)$, $n=f(t)$, $p_e=f(t)$, $p_m=f(t)$ (p_e – vnútorný výkon definovaný ako $m_e \omega$, p_m – zaťažovací mechanický výkon definovaný ako $m_{\sigma} \omega$) pre synchronný stroj pracujúci na sieti ako motor a ako generátor.



Obr. 6.28 Simulačné priebehy synchronného motora a) $i_s=f(t)$, b) $i_f=f(t)$, c) $\vartheta_L=f(t)$, d) $n=f(t)$, e) $p_e=f(t)$, f) $p_m=f(t)$

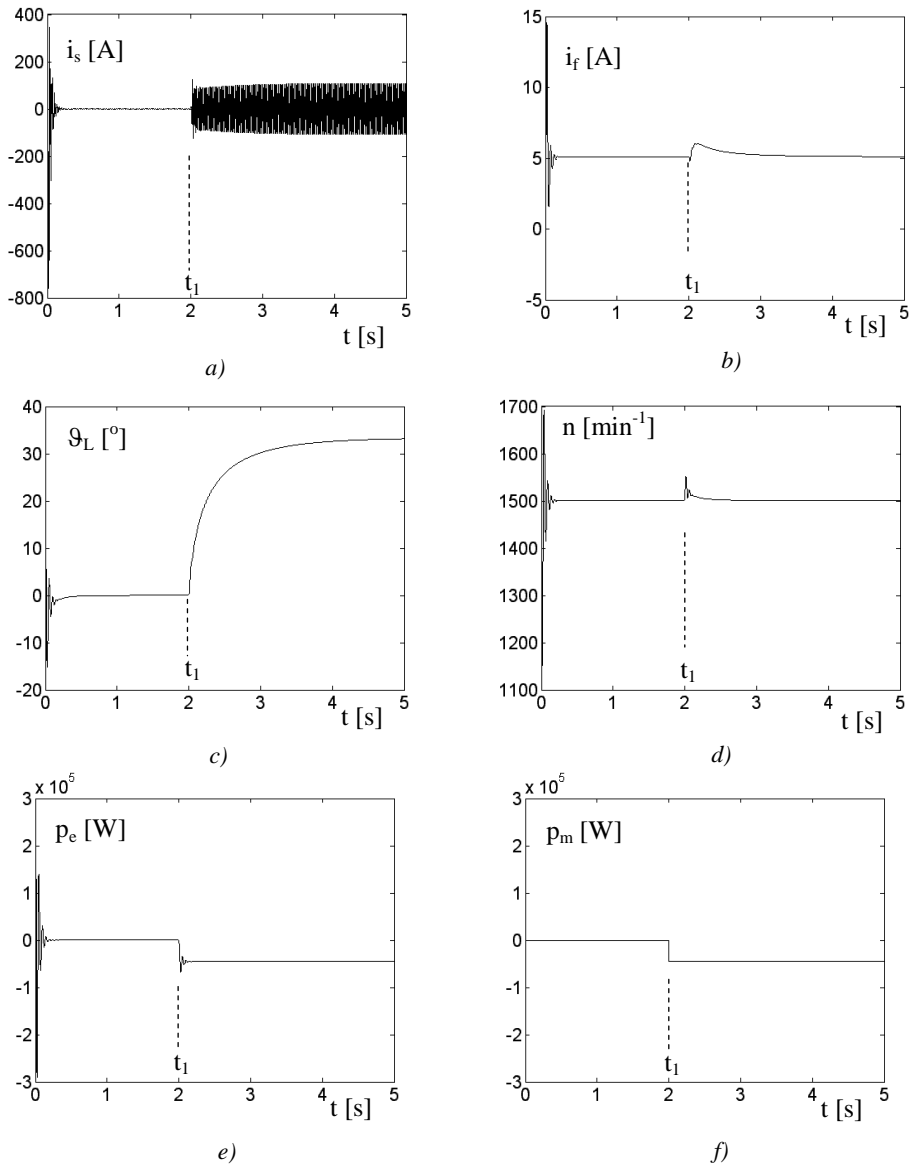
6.10.5.1 Simulačné priebehy synchrónneho stroja v motorickom režime

Pri simulácii synchrónneho motora s budiacim vinutím je nabudený motor najskôr roztočený na synchrónne otáčky a pripojený na pevnú sieť s menovitým napätím a frekvenciou. Po ustálení jednotlivých veličín je napr. v čase $t_I = 2\text{s}$ motor skokom zaťažený na hriadelí menovitým zaťažovacím mechanickým výkonom. V simulácii sa neuvažuje moment strát, preto stav naprázdno je iba teoretický a nezodpovedá reálnemu stavu naprázdno. Ak by sme chceli uvažovať s reálnym stavom naprázdno, musíme v simulácii zadať taký zaťažovací moment (alebo výkon), ktorý zodpovedá momentu (alebo výkonu) strát (pozri kapitolu 3.8 - simulácie jednosmerných strojov). Simuláciu uvedených rovníc môžeme vykonať v niektorom programovacom jazyku. V programe Matlab/Simulink v6.1 je možné využiť už naprogramovaný blok synchrónneho stroja, do ktorého sa vkladajú príslušné parametre.

Ako príklad uvádzame simulácie synchrónneho stroja s nasledovnými štítkovými údajmi: $S_N = 56\text{ kVA}$, $\eta = 89,48\%$, $n = 1500\text{ min}^{-1}$, $2p = 4$, $f = 50\text{ Hz}$, $U_{f\beta} = 231\text{ V}$, $\cos\varphi = 0,8$, $I_s = 80,81\text{ A}$, $U_f = 171,71\text{ V}$, $I_f = 11,07\text{ A}$. Synchrónny stroj bol simulovaný v programe Matlab/Simulink v6.1. Simulačné priebehy $i_s=f(t)$, $i_f=f(t)$, $\vartheta_L=f(t)$, $n=f(t)$, $p_e=f(t)$, $p_m=f(t)$ vidno na obr. 6.28. Výpis programu a všetky parametre uvedeného stroja použité v simulácii sú uvedené v prílohe E.

6.10.5.2 Simulačné priebehy synchrónneho stroja v generátorickom režime

Pri simulácii synchrónneho generátora s budiacim vinutím je generátor najskôr roztočený na synchrónne otáčky, nabudený a pripojený na pevnú sieť s menovitým napätím. Po ustálení jednotlivých veličín je napr. v čase $t_I = 2\text{ s}$ generátoru skokom dodávaný menovitý mechanický hnací moment, resp. výkon na hriadelí. V simulácii je potrebné v rovnici (6.38) zadať záporný zaťažovací moment. Fyzikálne to znamená, že energia bude tiecť z generátora do siete, vyvíjaný elektromagnetický moment bude záporný, pretože sa zmení znamienko prúdu I_d . Okrem toho sa zmení aj polarita záťažového uhla ϑ_L (pozri a porovnaj obr. 6.28c a 6.29c). Simulačné priebehy budú mať podobné tvary ako v motorickom režime, ale otáčky sa budú ustáľovať z nadsynchrónnej hodnoty na menovitú a záťažový uhol bude kladný. Taktiež sa v simulácii neuvažuje moment strát. Simulácia je urobená pre ten istý synchrónny stroj ako v kapitole (6.10.5.1) v tom istom programe. Simulačné priebehy $i_s=f(t)$, $i_f=f(t)$, $\vartheta_L=f(t)$, $n=f(t)$, $p_e=f(t)$, $p_m=f(t)$ môžeme vidieť na obr. 6.29.



Obr. 6.29 Simulačné priebehy synchronného generátora a) $i_s=f(t)$, b) $i_f=f(t)$, c) $\vartheta_L=f(t)$, d) $n=f(t)$, e) $p_e=f(t)$, f) $p_m=f(t)$

