

### 3. Elektromagnetické jevy v soustavě

Elektromagnetické přechodné jevy jsou spojovány se změnami či poruchami v systému a projevují se především v synchronních generátorech prudkými změnami generovaných proudů a momentů. Poněvadž doba těchto jevů je velmi krátká (jedná se typicky o milisekundy), velký moment setrvačnosti rotujících hmot (turbína, rotor) nedovolí žádnou významnou změnu jejich rychlosti, kterou proto během elektromagnetických přechodných jevů pokládáme za konstantní (to ovšem neplatí u následných jevů elektromechanických, jejichž časové konstanty mohou být až o 4 řády vyšší).

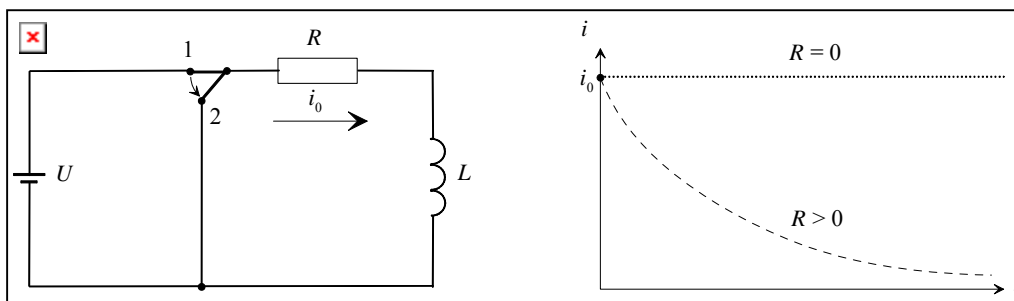
Elektromagnetické přechodné jevy v synchronních strojích lze kvalitativně posoudit na základě studia chování magneticky spřažených obvodů budicího, tlumicího a statorového vinutí v různých provozních režimech. Přesnější kvantitativní vyšetření těchto dějů je ovšem složitější a neobejde se bez numerických metod; přesto však lze určitý názor získat i při použití zjednodušených metod analytických, a to zejména u strojů s hladkým rotorem. Analýza strojů s vyniklými póly je v tomto ohledu daleko obtížnější.

V této kapitole bude věnována pozornost trojfázovému zkratu na svorkách synchronního stroje (nejvyšší proudy a momenty, jimž musí stroj odolat, jsou však řídké), zkratu mezifázovému (daleko častější) a připojení stroje k síti.

#### 3.1. Základní fyzikální principy

Analýza výše uvedených jevů vychází z principu, podle něhož se magnetické toky (a tedy i energie pole) v magneticky spřažených obvodech nemohou měnit skokem.

Ukážeme si důsledek tohoto principu na jednoduchém sériovém obvodu obsahujícím pouze rezistanci  $R$  a indukčnost  $L$  (obě tyto veličiny se předpokládají konstantní v čase), jenž je napájen ze zdroje stejnosměrného napětí  $U$  (obr. 3.1).



Obr. 3.1: Vyšetřovaný stejnosměrný obvod a průběh proudu ve zkratovaném obvodu

Obvod je protékán proudem, jehož velikost v okamžiku  $t = 0$ , kdy přepneme spínač z polohy 1 do polohy 2, je  $i_0$ . V tomto okamžiku je další děj v obvodu (zdroj napětí je vyřazen) popsán rovnicí

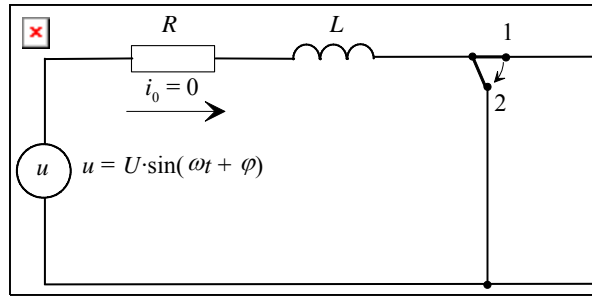
$$R \cdot i + L \cdot \frac{di}{dt} = 0 \quad (3.1)$$

s počáteční podmínkou  $i(0) = i_0$ . Pokud by bylo možno rezistanci  $R$  zanedbat, velikost  $i(t)$  by byla konstantní, pokud ne, proud klesá po exponenciále

$$i(t) = i_0 \cdot e^{-\frac{R}{L}t}, \quad (3.2)$$

s časovou konstantou  $T = L/R$ , jak je znázorněno v pravé části obr. 3.1.

Analýzujeme nyní podobný  $RL$  obvod napájený ze zdroje střídavého napětí  $U \cdot \sin(\omega t + \varphi)$ , jenž se podle obr. 3.2 sepne v čase  $t = 0$  ze stavu naprázdno do stavu nakrátko. V tomto případě je počáteční podmínka dána vztahem  $i(0) = 0$ .



Obr. 3.2: Přechod střídavého RL obvodu ze stavu naprázdno do stavu nakrátko

Po přepnutí spínače z polohy 1 do polohy 2 bude přechodný jev v obvodu popsán rovnicí

$$U \cdot \sin(\omega t + \varphi) = R \cdot i + L \cdot \frac{di}{dt} \quad (3.3)$$

s řešením

$$i(t) = \frac{U}{Z} \cdot \left[ \sin(\omega t + \varphi - \vartheta) - \sin(\varphi - \vartheta) \cdot e^{-\frac{R}{L}t} \right], \quad Z = \sqrt{R^2 + (\omega L)^2}, \quad \vartheta = \arctg \frac{\omega L}{R}. \quad (3.4)$$

Jestliže  $\varphi = \vartheta$  vztah (3.4) se zjednoduší na

$$i(t) = \frac{U}{Z} \cdot \sin \omega t, \quad (3.5)$$

je-li  $\varphi - \vartheta = \pi/2$ , bude

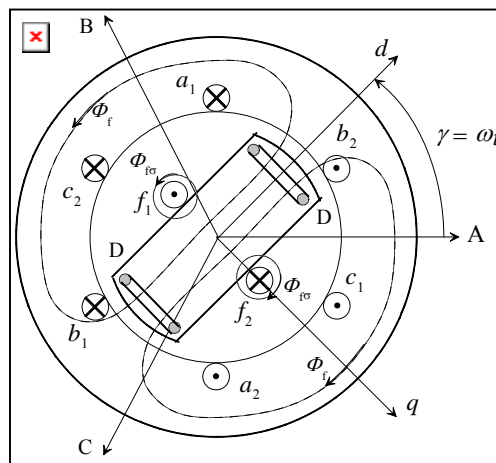
$$i(t) = \frac{U}{Z} \cdot \left[ \cos \omega t - e^{-\frac{R}{L}t} \right]. \quad (3.6)$$

První složce ve výrazu (3.4) pro  $i(t)$  se říká složka vnučená (je odvozena od zdroje, má harmonický charakter a konstantní amplitudu), druhé složka volná, jež má stejnosměrný charakter a zaniká s časovou konstantou  $T = L/R$ . Počáteční hodnota volné složky je nejvyšší pro případ popsáný rovnicí (3.6) a nejnižší (nulová) pro případ popsáný rovnicí (3.5).

Chceme-li přejít ke studiu trojfázového zkratu na svorkách synchronního generátoru, je třeba si přes formální podobnost obvodu vinutí s obr. 3.2 uvědomit, že statorová vinutí jsou zde tři a navíc zde musíme počítat s proměnnou impedancí zdroje.

### 3.2. Trojfázový zkrat na svorkách synchronního generátoru

Pro zkoumání dějů v synchronním generátoru při zkratu vyjdeme z obr. 3.3



Obr. 3.3: K odvození zkratových proudů synchronního generátoru

Na obrázku je znázorněno ještě tlumicí vinutí na rotoru označené písmenem D. Pro okamžik zkratu  $t = 0$  budeme předpokládat, že osa  $d$  rotoru je v pozici  $\gamma_0$  vůči fázi A statoru a v čase  $t$  po zkratu je tedy její poloha dána úhlem  $\gamma = \gamma_0 + \omega t$ . Nechť je nejprve generátor před zkratem v chodu naprázdno, takže všechny tři fázové proudy jsou nulové a jediným magnetickým tokem ve vzduchové mezeře je tok budicího vinutí  $\Phi_f$ . V okamžiku  $t = 0$ , kdy dojde ke zkratu, mají podle rovnic (2.20) toky spřažené s jednotlivými fázovými vinutími velikosti

$$\Psi_{fA0} = \Psi_{fa} \cdot \cos \gamma_0, \quad \Psi_{fB0} = \Psi_{fa} \cdot \cos \left( \gamma_0 - \frac{2\pi}{3} \right), \quad \Psi_{fC0} = \Psi_{fa} \cdot \cos \left( \gamma_0 + \frac{2\pi}{3} \right). \quad (3.7)$$

Význam symbolu  $\Psi_{fa}$  označujícího amplitudu spřaženého toku před zkratem je rovněž vysvětlen v předchozí kapitole.

Pokud by byly nyní rezistance statorových vinutí nulové, musely by podle předchozích závěrů zůstat spřažené toky po zkratu na hodnotách předzkratových, tedy  $\Psi_{fA0}$ ,  $\Psi_{fB0}$ ,  $\Psi_{fC0}$ . Přitom ale po zkratu se rotor dál otáčí a toková spřažení  $\Psi_{fA}$ ,  $\Psi_{fB}$  a  $\Psi_{fC}$  se mění sinusově. Aby se celkový spřažený tok udržel na předzkratových hodnotách, musí se ve vinutích fází A, B a C indukovat proudy  $i_A(t)$ ,  $i_B(t)$  a  $i_C(t)$ , které vybudí toky  $\Psi_{AA}(t)$ ,  $\Psi_{BB}(t)$  a  $\Psi_{CC}(t)$  takové, že platí

$$\Psi_{AA}(t) + \Psi_{fA}(t) = \Psi_{fA0} = \text{const} \quad (3.8)$$

a podobně pro další fáze. Poněvadž například tokové spřažení  $\Psi_{AA}(t)$  je dáno součinem příslušného proudu  $i_A(t)$  a celkové indukčnosti  $L_{eqA}$  tohoto vinutí, obdrželi bychom z rovnice (3.8) přímo vztah pro proud  $i_A(t)$  ve tvaru

$$L_{eqA} \cdot i_A(t) = \Psi_{fA0} - \Psi_{fA}(t). \quad (3.9)$$

Bohužel, indukčnost  $L_{eqA}$  nereprezentuje pouze vlastní indukčnost vinutí A, ale jedná se spíše o jakousi ekvivalentní indukčnost zahrnující i další vlivy (geometrii, pospojování). Pokud má stroj hladký rotor, jsou ve všech fázích ekvivalentní indukčnosti stejné a nezávisí na poloze rotoru. Pak mají fázové proudy stejný tvar jako toková spřažení a sestávají z harmonických i stejnosměrných složek. Harmonické složky mají stejnou amplitudu, jsou navzájem fázově posunuty vždy o  $120^\circ$  a odvozují se od tokových spřažení  $\Psi_{fA}$ ,  $\Psi_{fB}$  a  $\Psi_{fC}$ , stejnosměrné složky mají konstantní velikost a odvozují se od tokových spřažení  $\Psi_{fA0}$ ,  $\Psi_{fB0}$  a  $\Psi_{fC0}$ . Celkově lze jednotlivé fázové proudy vyjádřit jako

$$\begin{aligned} i_A(t) &= -i_m(0) \cdot \cos(\omega t + \gamma_0) + i_m(0) \cdot \cos \gamma_0 \\ i_B(t) &= -i_m(0) \cdot \cos \left( \omega t + \gamma_0 - \frac{2\pi}{3} \right) + i_m(0) \cdot \cos \left( \gamma_0 - \frac{2\pi}{3} \right) \\ i_C(t) &= -i_m(0) \cdot \cos \left( \omega t + \gamma_0 + \frac{2\pi}{3} \right) + i_m(0) \cdot \cos \left( \gamma_0 + \frac{2\pi}{3} \right) \end{aligned} \quad (3.10)$$

Toková spřažení  $\Psi_{AA}(t)$ ,  $\Psi_{BB}(t)$  a  $\Psi_{CC}(t)$  ovšem ovlivňují i děje v ostatních vinutích, konkrétně v budicím a tlumicím. Uvažujme nejprve harmonické složky reprezentované prvními členy v rovnicích (3.10). Ty vytvářejí točivé magnetické pole, přičemž fázor výsledné magnetomotorické síly se chová jako fázor  $\underline{E}_a$  z předchozí kapitoly (2.26) (je například příčinou demagnetizace stroje). Vzhledem k tomu, že během zkratu je elektrický výkon stroje nulový, je úhel mezi  $\underline{E}_f$  a  $\underline{E}_a$  přesně  $180^\circ$ . Magnetický tok vybuděný proudy statorových vinutí pak působí proti toku vinutí rotorového, je konstantní, a je zdrojem dodatečných stejnosměrných proudů v budicím a tlumicím vinutí.

Stejnoseměrné složky proudů ve statorových vinutích vybudí stejnosměrný magnetický tok, který je vůči statoru nepohyblivý a v okamžiku zkratu má směr shodný s tokem budicího vinutí. Poněvadž se ale rotor otáčí, mění se pak již příslušné spřažení s kosinem příslušného úhlu natočení. V budicím a tlumicím vinutí musí ovšem zůstat spřažený tok před zkratem a po zkratu stejný, a proto se v budicím i tlumicím vinutí indukují proudy harmonického i stejnosměrného charakteru, které příslušné spřažení s rotorovým tokem kompenzují.

## Vliv rezistancí

Rezistance vyvolává disipaci energie magnetického pole, která závisí na čtverci proudu. Nahromaděná magnetická energie klesá s časovou konstantou obvodu  $T = L/R$ . To se projeví v stejnosměrných složkách proudů, které nyní klesají s konstantou  $T$  příslušnou tomu kterému obvodu. Rovnice (3.10) pro statorové proudy proto nyní nabudou tvaru

$$\begin{aligned} i_A(t) &= -i_m(t) \cdot \cos(\omega t + \gamma_0) + i_m(0) \cdot e^{-\frac{t}{T_a}} \cdot \cos \gamma_0 \\ i_B(t) &= -i_m(t) \cdot \cos\left(\omega t + \gamma_0 - \frac{2\pi}{3}\right) + i_m(0) \cdot e^{-\frac{t}{T_a}} \cdot \cos\left(\gamma_0 - \frac{2\pi}{3}\right) \\ i_C(t) &= -i_m(t) \cdot \cos\left(\omega t + \gamma_0 + \frac{2\pi}{3}\right) + i_m(0) \cdot e^{-\frac{t}{T_a}} \cdot \cos\left(\gamma_0 + \frac{2\pi}{3}\right) \end{aligned} \quad (3.11)$$

kde  $T_a$  je časová konstanta statorového vinutí určená jako podíl jeho ekvivalentní indukčnosti a rezistance. Veličina  $i_m(t)$  však už není konstanta, jak vyplývá z dalšího textu.

Střídavé složky proudů statorových vinutí vybudí magnetický tok, jehož směr je vůči rotoru stálý, a jenž indukuje v budicím i tlumicím vinutí umístěném na rotoru stejnosměrné proudy. Ty zanikají rovněž s příslušnými časovými konstantami. V případě tlumicího vinutí se jedná o tzv. rázovou časovou konstantu v ose  $d$  označovanou jako  $T_d''$ , zatímco u budicího vinutí jde o přechodnou časovou konstantu v ose  $d$  označovanou jako  $T_d'$ . Rezistance tlumicího vinutí je zpravidla o mnoho větší, než rezistance budicího vinutí, takže  $T_d'' \ll T_d'$ . Stejnoseměrná složka v tlumicím vinutí proto zaniká daleko rychleji. Poněvadž stejnosměrné složky budicího i tlumicího vinutí budí střídavé proudové složky ve vinutí statorovém, jejich amplitudy  $i_m(t)$  rovněž musí klesat se zmíněnými časovými konstantami.

Stejnoseměrné složky proudů statorových vinutí zanikající s časovou konstantou  $T_a$  naopak vybudují střídavé proudové složky v budicím a tlumicím vinutí, jejichž amplitudy rovněž zanikají se stejnou časovou konstantou.

Je třeba si uvědomit že střídavé složky fázových proudů směřují k ustálenému harmonickému časovému průběhu a podobně stejnosměrná složka v budicím vinutí konverguje k předzkratové konstantní hodnotě. Proud v tlumicím vinutí naopak vždy konverguje k nule.

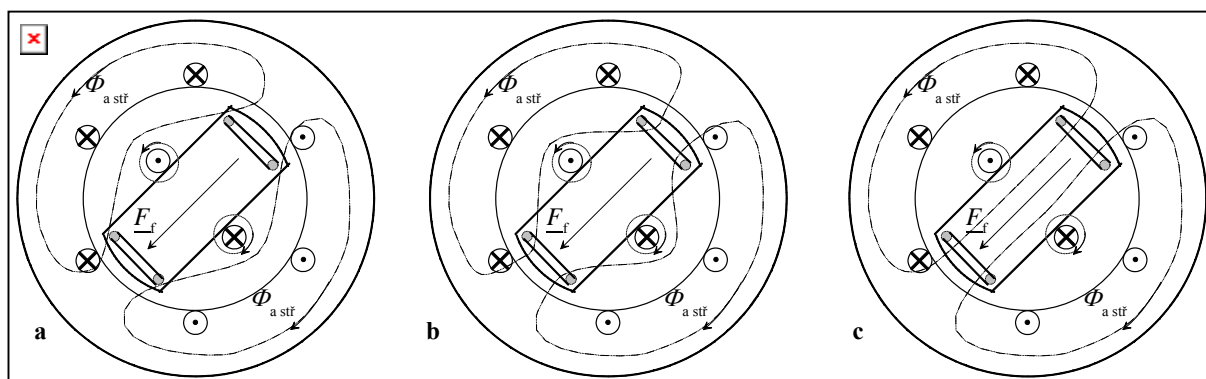
Nyní nezbyvá, než kvantifikovat funkci  $i_m(t)$ . K tomu je třeba vyhodnotit cesty střídavého toku vybuzeného statorem a určit dříve zmíněnou ekvivalentní indukčnost  $L_{eq}$ .

### Cesty statorového toku a stanovení ekvivalentních reaktancí

Rozdíl mezi ustáleným a poruchovým stavem synchronního generátoru spočívá ve skutečnosti, že během poruchy se v rotoru indukují přídavné proudy. Ty vyvolají dodatečné magnetické toky působící proti toku vyvolanému statorovými vinutími a do značné míry tak rotor magneticky odstiňují.

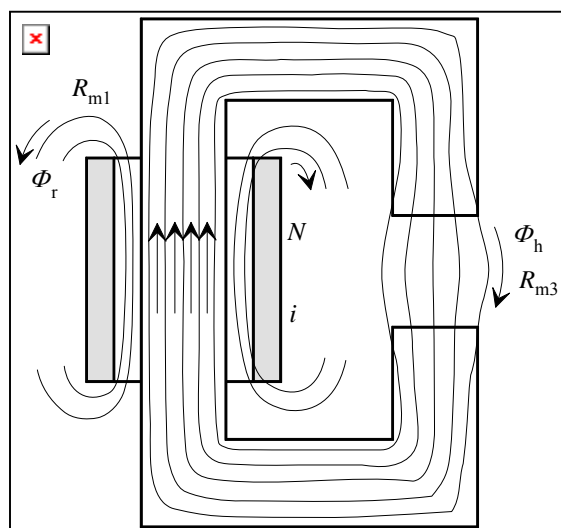
Situace je znázorněna na obr. 3.4 vystihujícím tři typické situace. Část **a** ukazuje situaci bezprostředně po poruše. V tomto okamžiku musí zůstat tokové spřažení statoru a rotoru stejné jako před poruchou, takže tok vybuzený střídavou složkou proudů ve statorovém vinutí rotorem (konkrétně smyčkami tlumicího a budicího vinutí) nesmí procházet (v budicím a tlumicím vinutí se proto indukují proudy vyvolávající tok opačný) a uzavírá se rozptylovými cestami. Generátor je v rázovém stavu. Poté se energie pole začíná mařit na rezistancích vinutí. Nejprve dojde k zatlumení proudů v tlumicím vinutí, které tak přestane budit tok opačného smyslu. Tomu odpovídá část **b** obr. 3.4. Tok vyvolaný statorovým vinutím již může protékat smyčkami tlumicího vinutí, avšak doposud ne vinutí budicího. Stroj je nyní v přechodném stavu. Teprve až dojde k zatlumení přechodné složky proudu v budicím vinutí rotoru (část **c**),

může tok od statorového vinutí začít protékat celým rotorem, to znamená po dráze s minimální reluktancí. Stroj je v ustáleném stavu.



Obr. 3.4: Cesty magnetických toků ve stroji v různých stádiích poruchy: **a** - okamžik poruchy, **b** - po odeznění přechodných jevů v budicím vinutí, **c** - po odeznění přechodných jevů v budicím vinutí

Chování stroje je výhodné pro každý ze zmíněných stavů analyzovat zvlášť, a to pomocí vhodných náhradních obvodů. Analýza se ale neobejde bez určení indukčností či reaktancí stroje v těchto stavech. Nejprve je však třeba si zopakovat, jak pro příslušná toková spřažení kreslit náhradní obvody obsahující odpovídající reaktance. Uvažujme nejprve uspořádání na obr. 3.5 s cívkou a železným jádrem se vzduchovou mezerou.



Obr. 3.5: Elektromagnet se vzduchovou mezerou

Celkový magnetický tok  $\Phi$  vybuzený cívkou sestává z rozptylového toku  $\Phi_r$  a hlavního magnetického toku  $\Phi_h$ . Podle Hopkinsonova zákona lze psát

$$\Phi = \Phi_r + \Phi_h = \frac{N \cdot i}{R_{m1}} + \frac{N \cdot i}{R_{m2} + R_{m3}}, \quad (3.12)$$

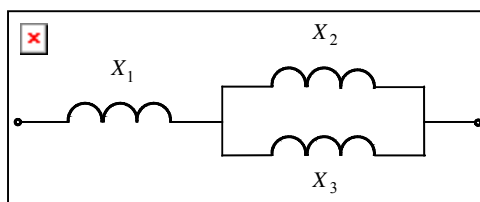
kde  $R_{m1}$ ,  $R_{m2}$  a  $R_{m3}$  označují po řadě reluktance rozptylových cest, magnetického obvodu a vzduchové mezery. Jim příslušející indukčnosti jsou

$$L_1 = \frac{N^2}{R_{m1}}, \quad L_2 = \frac{N^2}{R_{m2}} \quad \text{a} \quad L_3 = \frac{N^2}{R_{m3}} \quad (3.13)$$

Pak

$$\Phi = \frac{i}{N} \cdot \left( L_1 + \frac{L_2 \cdot L_3}{L_2 + L_3} \right), \quad (3.14)$$

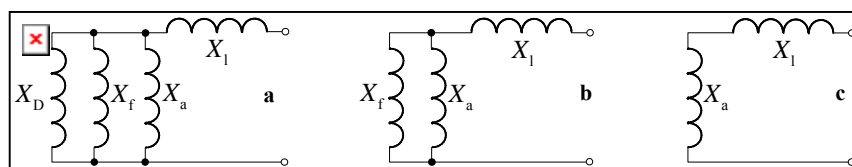
odkud je zřejmé, že sériovým reluktancím (cestám toku) odpovídají paralelní indukčnosti a naopak, paralelním reluktancím (cestám toku) indukčnosti sériové. Náhradní schéma k obvodu na obr. 3.5 (použijeme-li reaktance  $X_1$ ,  $X_2$  a  $X_3$  místo indukčností (3.13)) má tedy tvar podle obr. 3.6.



Obr. 3.6: Náhradní schéma k obr. 3.5

Získané poznatky nyní budeme aplikovat na 3 vyšetřované stavy synchronního stroje (stav rázový, stav přechodný a stav ustálený). Přitom označme  $X_f$  reaktanci odpovídající reluktanci tokových cest budicího vinutí,  $X_a$  reaktanci odpovídající reluktanci tokových cest přes vzduchovou mezeru,  $X_D$  reaktanci odpovídající reluktanci tokových cest tlumicího vinutí a  $X_l$  reaktanci odpovídající reluktanci tokových cest statorového vinutí. Všechny zmíněné reluktance sestávají z reluktancí feromagnetických částí a reluktancí vzduchových cest, které jsou daleko vyšší (a příslušné reaktance naopak daleko nižší). Pro vyznačené reaktance jsou proto rozhodující jejich složky odpovídající vzduchovým cestám a proto lze říci, že symboly  $X_f$ , ...,  $X_l$  lze s nimi prakticky ztotožnit. Reaktanci  $X_l$  pak pokládáme za rozptylovou reaktanci vinutí statoru a označujeme ji  $X_\sigma$ .

Během rázového děje se tok buzený statorovým vinutím podle obr. 3.5 **a** dělí na tok, který protéká rozptylovými cestami a tok, který se uzavírá přes železo statoru (pozor, reluktanci železa zanedbáváme) vzduchovou mezeru mimo rotor, tedy rozptylovými cestami toku budicího a tlumicího vinutí. Celková reluktance této cesty je tedy  $R_{ml} \square (R_{ma} + R_{mD} + R_{mf})$ , takže celková reaktance, jež se označuje jako  $X_d'' = X_l + (X_a \square X_D \square X_f)$  plyne z obr. 3.7 **a**.



Obr. 3.7: Náhradní schémata synchronního stroje pro **a**: rázový, **b**: přechodný a **c**: ustálený stav

Během přechodného děje se tok buzený statorovým vinutím podle obr. 3.5 **b** opět dělí na tok, který protékající rozptylovými cestami a tok, který se uzavírá přes železo statoru vzduchovou mezeru nejprve do železa rotoru, ale poté rozptylovými cestami toku budicího vinutí. Nyní je celková reluktance cesty je  $R_{ml} \square (R_{ma} + R_{mf})$  (reluktance cesty toku tlumicího vinutí, jež nyní vede železem, je prakticky nulová) a celková reaktance, jež se v tomto případě označuje jako  $X_d' = X_l + (X_a \square X_f)$  plyne z obr. 3.7 **b**.

Konečně v ustáleném stavu se tok buzený statorovým vinutím podle obr. 3.5 **c** opět dělí na tok, který protékající rozptylovými cestami a tok, který se uzavírá přes železo statoru vzduchovou mezeru přes železo rotoru. Vzhledem k tomu, že reluktanci železa rotoru lze zanedbat, je celková reluktance cesty je  $R_{ml} \square R_{ma}$  a celková reaktance, jež se označuje jako  $X_d = X_l + X_a$  plyne z obr. 3.7 **c**.

Z předchozích odvození je zřejmé, že  $X_d'' < X_d' < X_d$ . U velkých turbogenerátorů zpravidla

bývá  $X_d \square 5X'_d \square 10X''_d$ .

### Vliv reaktancí v ose $q$

Předchozí úvahy se prováděly za předpokladu, že magnetomotorická síla statoru má směr osy  $d$ . To platí jen tehdy, byl-li generátor před poruchou nezatížen. V jiných případech má magnetomotorická síla statoru obecně složku i v ose  $q$ .

Předpokládejme nejprve, že se synchronní stroj nachází v subtransientním (rázovém) stavu. Pokud by nyní měl fázor magnetomotorické síly statoru směr osy  $q$ , musí vzniknout v rotoru i v případném tlumicím vinutí v ose  $q$  takové proudy, aby tokové spřažení v této ose na počátku jevu zůstalo zachováno. Nemá-li osa  $q$  budicí vinutí, proudy vznikající v rotoru v této ose jsou vířivého charakteru. Nemá-li v ose  $q$  tlumicí vinutí, je zde rovněž příslušný tlumicí efekt podstatně menší než v ose  $d$  a v důsledku toho  $X''_q > X''_d$ . Pokud v ose  $q$  tlumicí vinutí existuje, jsou obě předchozí reaktance srovnatelné.

V přechodném stavu je stínění magnetického toku vybuzeného statorem zajištěno proudy indukovanými jednak v budicím vinutí v ose  $d$  a dále vířivými proudy v ose  $q$ , jejichž účinek je ovšem menší. Proto platí, že většinou  $X'_q > X'_d$  (první z nich bývá oproti druhé asi dvojnásobná). Ve strojích s vyniklými póly je zpravidla rotor listěný, stínicí efekt v ose  $q$  proto prakticky neexistuje (vířivé proudy jsou malé) a přibližně platí, že  $X'_q \square X_q$ .

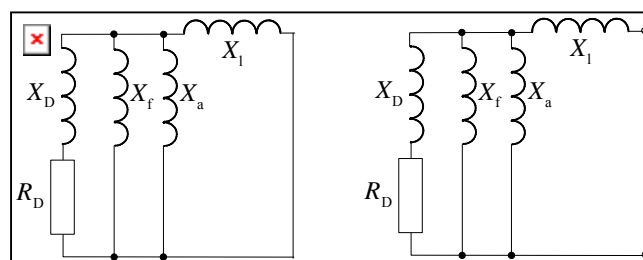
V ustáleném stavu je ve strojích s vyniklými póly reluktance vzduchové mezery v ose  $q$  větší než v ose  $d$  a reaktance tedy naopak menší. Obecně tedy platí, že  $X_d \geq X_q$ .

Následující tabulka 3.1 shrnuje výše uvedené reaktance přepočtené na poměrné hodnoty pro vybrané typy strojů. Dále jsou zde uvedeny časové konstanty odpovídající zkratovanému statorovému vinutí.

Tab. 3.1: Parametry vybraných generátorů

Parametr	Stroje s hladkým rotorem			Stroje s vyniklými póly	
	200 MVA	600 MVA	1500 MVA	150 MVA	230 MVA
$x_d$	1.65	2.00	2.20	0.91	0.93
$x_q$	1.59	1.85	2.10	0.66	0.69
$x'_d$	0.23	0.39	0.44	0.3	0.3
$x'_q$	0.38	0.52	0.64		
$x''_d$	0.17	0.28	0.28	0.24	0.25
$x''_q$	0.17	0.32	0.32	0.27	0.27
$T'_d$ (s)	0.83	0.85	1.21	1.10	3.30
$T'_q$ (s)	0.42	0.58	0.47		
$T''_d$ (s)	0.023	0.028	0.030	0.05	0.02
$T''_q$ (s)	0.023	0.058	0.049	0.06	0.02

Někteří výrobci udávají časové konstanty pro statorové vinutí naprázdno, které se označují symboly  $T_{d0}$ ,  $T_{q0}$ ,  $T''_{d0}$ ,  $T''_{q0}$ . V dalším textu si proto ukážeme, jak se tyto konstanty určují a jaká je mezi nimi souvislost pro rázovou část jevu (ostatní výpočty probíhají zcela analogicky). Přitom vyjdeme z obr. 3.8.



Obr. 3.8: Ke stanovení časových konstant pro rázový jev

Podle obrázku zřejmě platí:

$$T_d'' = \frac{X_D + (X_a \square X_f \square X_l)}{\omega \cdot R_D}, \quad T_{d0}'' = \frac{X_D + (X_a \square X_f)}{\omega \cdot R_D}, \quad (3.15)$$

a odtud

$$T_d'' = T_{d0}'' \cdot \frac{X_D + (X_a \square X_f \square X_l)}{X_D + (X_a \square X_f)} < T_{d0}'' \quad (3.16)$$

Zanedbá-li se rozptylová reaktance statoru  $X_l \square X_\sigma$ , dostáváme s přihlédnutím k výše odvozeným vztahům

$$T_d'' \square T_{d0}'' \cdot \frac{X_D}{X_D + X_d'} \quad (3.17)$$

a poněvadž  $X_d'' \square X_D \square X_d'$ , získáme po krátké úpravě

$$T_d'' \square T_{d0}'' \cdot \frac{X_d''}{X_d'} \quad (3.18)$$

Analogicky bychom obdrželi

$$T_q'' \square T_{q0}'' \cdot \frac{X_q''}{X_q'}, \quad T_d' \square T_{d0}' \cdot \frac{X_d'}{X_d}, \quad T_q' \square T_{q0}' \cdot \frac{X_q'}{X_q} \quad (3.19)$$

### Elektromotorické síly a náhradní obvody

Náhradní obvody v různých provozních stavech se sestavují pouze pro harmonické složky. Náhradní obvod generátoru pro ustálený stav je zakreslen v obr. 2.16 a podobná schémata lze sestavit i pro stav rázový a přechodný. Tato schémata jsou ovšem různá (díky různým charakteristickým reaktancím) a jsou platná jen pro začátek příslušného děje. Odlišují se rovněž velikostí vnitřního indukovaného napětí za příslušnou reaktancí (rázovou a přechodnou), jež je dáno tokovým spřažením pokládaným během celého děje za konstantní.

Pro případ poruchy si nyní objasňeme význam elektromotorických sil  $\underline{E}$ ,  $\underline{E}_f$  a  $\underline{E}_q$ , které jsou během ustáleného stavu totožné. Napětí  $\underline{E}_q$  je dáno velikostí budicího proudu, jenž tvoří magnetomotorickou sílu v ose  $d$ . Během poruchy se ovšem mohou v rotoru indukovat i vířivé proudy v ose  $q$  a v ose  $d$  se tak může indukovat napětí  $\underline{E}_d$ . Obě napětí  $\underline{E}_q$  a  $\underline{E}_d$  se během poruchových stavů samozřejmě mění v závislosti na časovém průběhu proudů v rotoru.

Během rázového jevu má obecně magnetický tok statoru složku v obou osách. Odpovídající rázové reaktance jsou  $X_d''$  a  $X_q''$ . Poněvadž se předpokládá, že toková spřažení se během jevu nemění, nemění se ani příslušná indukovaná napětí a generátor lze modelovat konstantním vnitřním rázovým napětím  $\underline{E}'' = \underline{E}_q'' + \underline{E}_d''$  za reaktancemi  $X_d''$  a  $X_q''$ . Pro generátor lze nyní napsat rovnici

$$\underline{U}_s = \underline{E}'' - R \cdot \underline{I} - j \cdot X_d'' \cdot \underline{I}_d - j \cdot X_q'' \cdot \underline{I}_q, \quad \underline{I} = \underline{I}_d + \underline{I}_q, \quad \underline{E}'' = \underline{E}_d'' + \underline{E}_q'', \quad (3.20)$$

kde  $\underline{U}_s$  je svorkové napětí a  $\underline{I}$  proud statoru bezprostředně po zkratu. Náhradní schéma je totožné se schématem na obr. 2.16, kde se však místo reaktancí  $X_d$  a  $X_q$  objeví  $X_d''$  a  $X_q''$ .

Nyní si blíže vysvětlíme rozdíl mezi složkou rázového napětí  $\underline{E}_q''$  a napětím  $\underline{E}_q$ . Napětí  $\underline{E}_q$  je přímo úměrné budicímu proudu a tedy vlastnímu tokovému spřažení budicího vinutí. Aby se nezměnilo tokové spřažení rotoru a statoru po poruše, začne se měnit budicí proud a tím



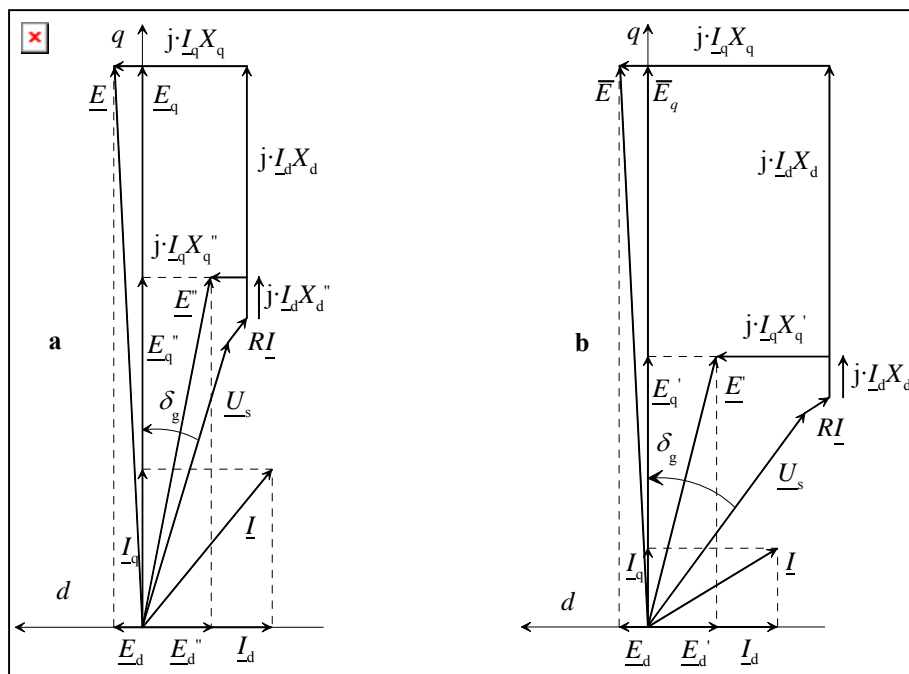
pádem i  $\underline{E}_q$ . Na druhé straně  $\underline{E}_q''$  je přímo úměrné celkovému tokovému spřažení v ose  $d$  po poruše. Pokud byl generátor před poruchou ve stavu naprázdno, byly proudy statorových vinutí a s jimi vybuzené toky nulové. Toková spřažení existovala jen díky proudu v budicím vinutí a proto  $\underline{E}_q$  a  $\underline{E}_q''$  byly totožné a rovnaly se svorkovému napětí stroje. Jestliže však před poruchou pracoval stroj s určitým zatížením, je výchozí stav charakterizován i toky vybuzenými statorovým vinutím a příslušnými spřaženími. Pak se  $\underline{E}_q$  a  $\underline{E}_q''$  různí. Totéž platí pro toky v ose  $q$  a jim odpovídající napětí v ose  $d$ . Z rovnic (2.42) a (3.20) lze pak odvodit rovnici

$$\underline{U}_s = \underline{E} - R \cdot \underline{I} - j \cdot X_d \cdot \underline{I}_d - j \cdot X_q \cdot \underline{I}_q \Rightarrow$$

$$\underline{E} = \underline{U}_s + R \cdot \underline{I} + j \cdot X_d \cdot \underline{I}_d + j \cdot X_q \cdot \underline{I}_q + j \cdot (X_d - X_d'') \cdot \underline{I}_d + j \cdot (X_q - X_q'') \cdot \underline{I}_q = \quad (3.21)$$

$$= \underline{E}'' + j \cdot (X_d - X_d'') \cdot \underline{I}_d + j \cdot (X_q - X_q'') \cdot \underline{I}_q$$

a k ní příslušející fázorový diagram na obr. 3.9 a.



Obr. 3.9: Fázorové diagramy k rázovému (část a) a přechodnému (část b) jevu

Během přechodného jevu je situace analogická. Generátor lze reprezentovat napětím za přechodnou reaktancí a pro náhradní obvod platí rovnice (podobná jako (3.20))

$$\underline{U}_s = \underline{E}' - R \cdot \underline{I} - j \cdot X_d' \cdot \underline{I}_d - j \cdot X_q' \cdot \underline{I}_q, \quad \underline{I} = \underline{I}_d + \underline{I}_q, \quad \underline{E}' = \underline{E}_d' + \underline{E}_q'. \quad (3.22)$$

Pro sestrojení fázorového diagramu použijeme vztah podobný rovnici (3.21).

$$\underline{U}_s = \underline{E} - R \cdot \underline{I} - j \cdot X_d \cdot \underline{I}_d - j \cdot X_q \cdot \underline{I}_q \Rightarrow$$

$$\underline{E} = \underline{U}_s + R \cdot \underline{I} + j \cdot X_d \cdot \underline{I}_d + j \cdot X_q \cdot \underline{I}_q + j \cdot (X_d - X_d') \cdot \underline{I}_d + j \cdot (X_q - X_q') \cdot \underline{I}_q = \quad (3.23)$$

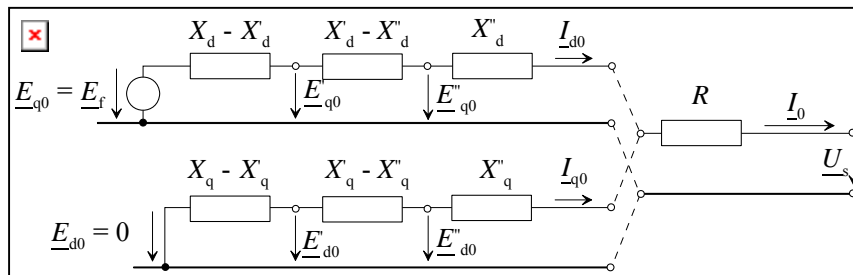
$$= \underline{E}' + j \cdot (X_d - X_d') \cdot \underline{I}_d + j \cdot (X_q - X_q') \cdot \underline{I}_q$$

Fázorový diagram je sestrojen v obr. 3.9 b, náhradní obvod je opět podobný obr. 2.16.

Ke korektnímu sestrojení fázorového diagramu ovšem potřebujeme znát velikost elektromotorické síly před poruchou. Nejjednodušší je situace, když je generátor před poruchou naprázdno. Pak jsou počáteční hodnoty vnitřního rázového a přechodného napětí stejné, jako

vnitřní (a tedy i svorkové) napětí stroje před poruchou. V opačném případě je třeba zahrnout vliv předporuchového proudu  $\underline{I}_0$  ve satorovém vinutí.

V náhradních obvodech pro rázový, přechodný a ustálený stav samozřejmě uvažujeme různé proudy  $\underline{I}$ . Na druhé straně, rázové i přechodné napětí za rázovou reaktancí zůstávají před poruchou i po ní stejná. Z toho ovšem plyne, že všechna tři schémata musí platit pro předporuchový proud  $\underline{I}_0$ , jak plyne z obr. 3.10.



Obr. 3.10: Náhradní obvod platný pro všechny tři vyšetřované provozní stavy

Z tohoto schématu lze opět odvodit příslušné fázorové diagramy, podle nichž lze snadno určit všechna vyznačená napětí (za předpokladu, že je znám úhel  $\varphi$  mezi napětím  $\underline{U}_s$  a proudem  $\underline{I}_0$ ). Jakmile jsou známy počáteční hodnoty rázových a přechodných napětí, lze již podle rovnic (3.20) a (3.22) určit všechny střídavé složky proudů na počátku obou jevů.

### Ilustrativní příklady

Synchronní generátor 200 MVA s hladkým rotorem má tyto parametry (v poměrných hodnotách):  $x_d = 1.6$ ,  $x_q = 1.6$ ,  $x'_d = 0.23$ ,  $x'_q = 0.38$ ,  $x''_d = 0.17$ ,  $x''_q = 0.17$ . Generátor je zatížen (všechny veličiny jsou v poměrných hodnotách) činným výkonem  $p = 1$  a jalovým výkonem  $q = -0.5$  při napětí  $u = 1.1$ . Je třeba určit velikost  $e_q$ ,  $e_q'$  a  $e_q''$  za předpokladu, že rezistanci statoru lze zanedbat.

Proud  $i_0$  před poruchou se určí jako

$$i_0 = \frac{p - j \cdot q}{u} = \frac{1 - j \cdot 0.5}{1.1} = 0.909 - j \cdot 0.4545 = 1.016 \angle -26.6^\circ.$$

Vnitřní indukované napětí se pak určí jako

$$e_q = u + j \cdot x_d \cdot i_0 = 1.1 + j \cdot 1.6 \cdot (0.9091 - j \cdot 0.4545) = 1.8272 + j \cdot 1.4545 = 2.335 \angle 38.5^\circ.$$

Nyní je třeba určit proudy a napětí v osách  $d$  a  $q$ . Platí

$$i_{d0} = -|i_0| \cdot \sin(26.6^\circ + 38.5^\circ) = -0.922,$$

$$i_{q0} = |i_0| \cdot \cos(26.6^\circ + 38.5^\circ) = 0.428,$$

$$u_d = -|u| \cdot \sin 38.5^\circ = -0.685,$$

$$u_q = |u| \cdot \cos 38.5^\circ = 0.861.$$

Z fázorových diagramů 3.9 lze nyní určit

$$e_{d0}' = u_d + x_q' \cdot i_{q0} = -0.685 + 0.38 \times 0.428 = -0.522,$$

$$e_{q0}' = u_q - x_d' \cdot i_{d0} = 0.861 + 0.23 \times 0.922 = 1.0731,$$

$$e_{d0}'' = u_d + x_q'' \cdot i_{q0} = -0.685 + 0.17 \times 0.428 = -0.6122,$$

$$e_{q0}'' = u_q - x_d'' \cdot i_{d0} = 0.861 + 0.17 \times 0.922 = 1.0177.$$

Synchronní generátor 230 MVA s rotorem s vyniklými póly má tyto parametry (v poměr-

ných hodnotách):  $x_d = 0.93$ ,  $x_q = 0.69$ ,  $x_d' = 0.3$ ,  $x_q' = 0.69$ ,  $x_d'' = 0.25$ ,  $x_q'' = 0.27$ . Generátor je zatížen stejně jako v předchozím případě. Je třeba provést analogický výpočet.

$$e_Q = u + j \cdot x_q \cdot i_0 = 1.1 + j \cdot 0.69 \cdot (0.9091 - j \cdot 0.4545) = 1.4137 + j \cdot 0.6273 = 1.5467 \angle 23.9^\circ.$$

Dále

$$i_{d0} = -|i_0| \cdot \sin(26.6^\circ + 23.9^\circ) = -0.784,$$

$$i_{q0} = |i_0| \cdot \cos(26.6^\circ + 23.9^\circ) = 0.647,$$

$$u_d = -|u| \cdot \sin 23.9^\circ = -0.446,$$

$$u_q = |u| \cdot \cos 23.9^\circ = 1.006.$$

Zbývající veličiny obdržíme jako

$$e_{q0} = u_q - x_d \cdot i_{d0} = 1.006 + 0.93 \times 0.784 = 1.735,$$

$$e_{d0}' = u_d + x_q' \cdot i_{q0} = -0.446 + 0.69 \times 0.647 = 0,$$

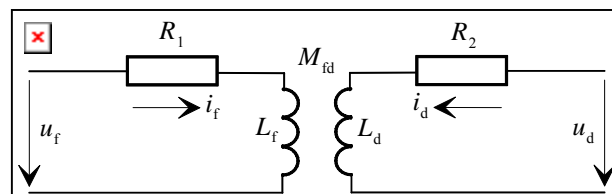
$$e_{q0}' = u_q - x_d' \cdot i_{d0} = 1.006 + 0.3 \times 0.784 = 1.241,$$

$$e_{d0}'' = u_d + x_q'' \cdot i_{q0} = -0.446 + 0.27 \times 0.647 = -0.271,$$

$$e_{q0}'' = u_q - x_d'' \cdot i_{d0} = 1.006 + 0.25 \times 0.784 = 1.202.$$

### Časové změny magnetického toku

Toková spřažení a jim odpovídající elektromotorické síly zůstávají v prvním okamžiku zkratu nezměněny. V průběhu času se ovšem mění. Základní náhled na průběh tokových spřažení lze získat prostřednictvím studia dvou magneticky vázaných obvodů, z nichž jeden může reprezentovat budící vinutí rotoru a druhý statorové vinutí v ose  $d$ .



Obr. 3.11: Magneticky vázané obvody

Podle věty o konstantním tokovém spřažení tok cívky budícího vinutí  $\Psi_f = L_f \cdot i_f + M_{fd} \cdot i_d$  zůstane stejný po jakékoli změně proudů  $i_f$  nebo  $i_d$ . Naakumulovaná energie magnetického pole začne ovšem časem klesat v důsledku disipace na činných odporech v obou obvodech. Tento pokles je popsán diferenciální rovnicí

$$u_f = R_f \cdot i_f + \frac{d\Psi_f}{dt}, \quad (3.24)$$

která po rozepsání dává

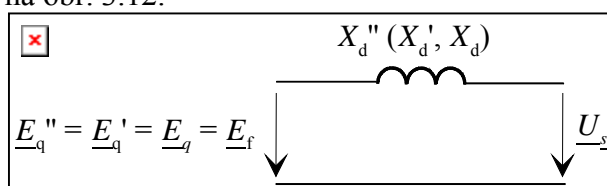
$$u_f = R_f \cdot i_f + L_f \cdot \frac{di_f}{dt} + M_{fd} \cdot \frac{di_d}{dt}. \quad (3.25)$$

V časové oblasti ji lze řešit tehdy, jsme-li schopni zapsat podobným způsobem i rovnici pro obvod na pravé straně obr. 3.11.

### Zkrat na svorkách nezatíženého generátoru

V tomto případě jsou všechna napětí stejná ( $E_q'' = E_q' = E_q = E_f = U_s$ ) a leží v ose  $q$ . Ná-

hradní obvody pro rázový, přechodný a ustálený stav při zanedbání rezistance statoru mají stejný tvar znázorněný na obr. 3.12.

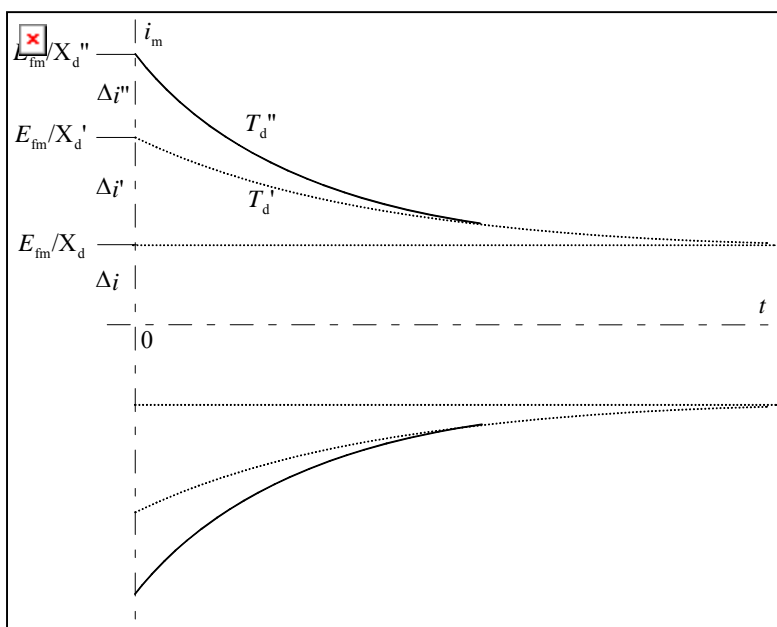


Obr. 3.12: Náhradní schéma pro vyšetřování zkratu na nezatiženém generátoru

Amplitudy harmonických složek rázového, přechodného a ustáleného zkratového proudu jsou pak dány vztahy

$$I_m'' = \frac{E_{fm}}{X_d''}, \quad I_m' = \frac{E_{fm}}{X_d'}, \quad I_m = \frac{E_{fm}}{X_d}, \quad (3.26)$$

kde  $E_{fm} = \sqrt{2} \cdot E_f$  je amplituda vnitřního indukovaného napětí. Vzhledem k tomu, že jsou známy i časové konstanty těchto amplitud, je možné odvodit průběh těchto proudů v závislosti na čase. Poněvadž jsou známy časové konstanty jednotlivých jevů, lze zakreslit obálku zmíněného harmonického průběhu  $i_m(t)$  (obr. 3.13).



Obr. 3.13: Obálka průběhu harmonické složky statorového proudu

Je zřejmé, že obálku  $i_m(t)$  lze vyjádřit jako

$$i_m(t) = \Delta i'' \cdot e^{-\frac{t}{T_d''}} + \Delta i' \cdot e^{-\frac{t}{T_d'}} + \Delta i = E_{fm} \cdot \left[ \left( \frac{1}{X_d''} - \frac{1}{X_d'} \right) \cdot e^{-\frac{t}{T_d''}} + \left( \frac{1}{X_d'} - \frac{1}{X_d} \right) \cdot e^{-\frac{t}{T_d'}} + \frac{1}{X_d} \right]. \quad (3.27)$$

Tuto veličinu pak dosadíme do (3.11) a získáme tak kompletní průběh zkratových proudů ve všech třech fázích.

### Vliv vyniklých pólů

V takovém případě je třeba uvažovat reaktance v obou osách. Celkový náhled do problematiky můžeme získat intuitivně. Již dříve bylo vysvětleno, že magnetomotorická síla vyvolaná poruchovým proudem ve statorovém vinutí sestává ze dvou složek. První  $E_{a,ac}$  je střídavá,

pochází ze střídavé složky statorového proudu a má směr osy  $d$ . Druhá  $\underline{E}_{a,dc}$  je stejnosměrná, pochází od stejnosměrné složky proudu, v okamžiku poruchy je rovněž orientovaná do osy  $d$  ale poté se vůči této ose začne otáčet v opačném směru. Poněvadž fázor  $\underline{E}_{a,ac}$  stále spadá do osy  $d$ , je spojen s reaktancemi  $X_d''$  atd. a střídavá složka v rovnici (3.27) zůstává nezměněna. Jiná je ovšem situace s ohledem na složku stejnosměrnou  $\underline{E}_{a,dc}$ , jejíž směr se vůči poloze rotoru mění. Tato složka vyvolává magnetický tok, jehož velikost se mění s proměnnou reluktancí vzduchové mezery. Tato skutečnost má dva důsledky. Prvním je ten, že velikost stejnosměrné složky poruchového proudu se odvozuje (ne zcela přesně) od střední hodnoty reaktance, tedy

$$\frac{E_{fm}}{2} \cdot \left( \frac{1}{X_d''} + \frac{1}{X_q''} \right).$$

Díky tomu, že fázor uvedené magnetomotorické síly během cyklu prochází dvakrát osou  $d$  i osou  $q$ , obsahuje navíc stejnosměrná složka proudu druhou harmonickou o amplitudě

$$\frac{E_{fm}}{2} \cdot \left( \frac{1}{X_d''} - \frac{1}{X_q''} \right).$$

Obě složky zanikají s časovou konstantou (je určena přibližně)

$$T_a = \frac{1}{2} \cdot \frac{X_d'' + X_q''}{\omega R}.$$

Dosadíme-li tyto hodnoty do (3.11), obdržíme např. pro fázi A

$$i_A(t) = -i_m(t) \cdot \cos(\omega t + \gamma_0) + \frac{E_{fm}}{2} \cdot e^{-\frac{t}{T_a}} \cdot \left[ \left( \frac{1}{X_d''} + \frac{1}{X_q''} \right) \cdot \cos \gamma_0 + \left( \frac{1}{X_d''} - \frac{1}{X_q''} \right) \cdot \cos(2\omega t + \gamma_0) \right], \quad (3.28)$$

kde  $i_m(t)$  je dán vztahem (3.27).

### Zkrat ze zatíženého generátoru

V tomto případě jsou, jak bylo odvozeno (vztahy (3.20) až (3.23)) hodnoty indukovaného napětí za synchronní, rázovou a přechodnou reaktancí různé. Složitějšími výpočty lze ukázat, že

$$i_A(t) = - \left[ \left( \frac{E_{qm0}''}{X_d''} - \frac{E_{qm0}'}{X_d'} \right) \cdot e^{-\frac{t}{T_d'}} + \left( \frac{E_{qm0}'}{X_d'} - \frac{E_{qm0}}{X_d} \right) \cdot e^{-\frac{t}{T_d}} + \frac{E_{qm0}}{X_d} \right] \cdot \cos(\omega t + \gamma_0) + \left[ \left( \frac{E_{dm0}''}{X_q''} - \frac{E_{dm0}'}{X_q'} \right) \cdot e^{-\frac{t}{T_q'}} + \frac{E_{dm0}'}{X_q'} \cdot e^{-\frac{t}{T_q}} \right] \cdot \sin(\omega t + \gamma_0) + \frac{U_{sm0}}{2} \cdot e^{-\frac{t}{T_a}} \cdot \left[ \left( \frac{1}{X_d''} + \frac{1}{X_q''} \right) \cdot \cos(\gamma_0 + \delta_g) + \left( \frac{1}{X_d''} - \frac{1}{X_q''} \right) \cdot \cos(2\omega t + \gamma_0 + \delta_g) \right], \quad (3.29)$$

přičemž  $\delta_g$  označuje úhel mezi fázorem napětím  $\underline{U}_s$  a osou  $q$ .

### Vliv automatického regulátoru napětí

Na průběh zkratového proudu může mít velký vliv přítomnost automatického regulátoru napětí. V případě rotačního budiče nemá porucha na svorkách na budič téměř žádný vliv a velký rozdíl mezi svorkovým napětím po poruše a napětím referenčním způsobí zvýšení budi-

ciho napětí. Tím se zvýší i zkratový proud. Napětí  $E_q$ , které odpovídá budicímu proudu, nebude klesat k  $E_{q0}$ , ale bude s budicím proudem rovněž narůstat (na rozdíl od případu, kdy by regulátor nebyl zapojen). Podobně je tomu i s napětím  $E_q'$ .

Užijeme-li statického budiče, jenž je napájen ze svorek generátoru, klesne budicí napětí k nule a všechny indukované elektromotorické síly poklesnou rovněž k nule. Pokud je statický budič napájen compoundně (budicí napětí je odvozeno jak od svorkového napětí, tak i proudu), buzení během zkratu nezanikne a fázový proud se vyvíjí podle charakteru compoundace.

### 3.3. Průběh momentů při zkratu

Pro tvorbu rázových a přechodných momentů během zkratu platí podobné vztahy, jako je tomu v případě rovnice (2.48). Musí se zde však navíc uvažovat toky vyvolané tlumicím vinutím. Platí tedy

$$M = M_d - M_q = \frac{\pi}{2} \cdot \left[ (\Phi_f + \Phi_{ad} + \Phi_D) \cdot F_{aq} - (\Phi_{aq} + \Phi_Q) \cdot F_{ad} \right]. \quad (3.30)$$

Přitom tok  $\Phi_f$  sestává ze dvou složek; první z nich, která odpovídá předporuchovému budicímu proudu označíme  $\Phi_{f0}$ , druhou odpovídající jeho změnám  $\Delta\Phi_f$ . Jestliže je stroj před poruchou naprázdno (a zanedbají-li se rezistance), musí podle předchozího výkladu platit, že tok  $\Phi_D$  vyvolaný proudy v tlumiči spolu s tokem  $\Delta\Phi_f$  vylimínuje tok  $\Phi_{ad}$  vyvolaný proudy statorového vinutí. Podobně tok  $\Phi_Q$  vyvolaný proudy tlumiče v ose  $q$  vylimínuje tok  $\Phi_{aq}$ . V takovém případě z rovnice (3.30) plyne

$$M = \frac{\pi}{2} \cdot \Phi_{f0} \cdot F_{aq}. \quad (3.31)$$

V ose  $q$  ovšem působí jen magnetomotorická síla od stejnosměrné složky statorového proudu, kterou lze (ode všech tří statorových vinutí) vyjádřit vztahem

$$F_{aq} = \frac{3}{2} \cdot N_a \cdot i_m(0) \cdot \sin \omega t, \quad (3.32)$$

kde  $i_m(0)$  označuje počáteční amplitudu uvedené stejnosměrné proudové složky. Tuto rovnici lze po úpravě přepsat do tvaru

$$M = \frac{3}{\omega} \cdot \frac{E_f^2}{X_d''} \cdot \sin \omega t. \quad (3.33)$$

Je patrné, že velikost momentu nezávisí na okamžiku zkratu a mění se sinusově. V jedné periodě tak působí proti hnacímu momentu, v druhé mu napomáhá. Jeho střední hodnota je tak nulová.

Uvažujeme-li rezistanci vinutí, znamená to, že tok vyvolaný statorovým vinutím ubývá s časovou konstantou  $T_a$ . Rotorové proudy klesají s časovými konstantami  $T_d'$  a  $T_d''$  a s nimi příslušné složky momentů. Složitějším odvozením lze ukázat, že

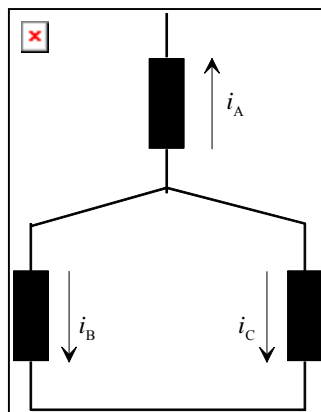
$$M = \frac{3}{\omega} \cdot E_f^2 \cdot \left[ \left( \frac{1}{X_d''} - \frac{1}{X_d'} \right) e^{-\frac{t}{T_d'}} + \left( \frac{1}{X_d'} - \frac{1}{X_d} \right) e^{-\frac{t}{T_d}} + \frac{1}{X_d} \right] \cdot e^{-\frac{t}{T_a}} \cdot \sin \omega t. \quad (3.34)$$

Poněvadž se jedná o součin dvou exponenciálně ubývajících funkcí, vykazuje tento moment velmi rychlý pokles. Pokud bychom chtěli respektovat i ohmické ztráty v dalších vinutích (budicím a tlumicím), výraz (3.34) se dále silně zkomplikuje. Lze však vyvodit následující závěr: složka momentu vznikající v důsledku rezistance statorového vinutí je malá (neboť malá je samotná tato rezistance), ale její pokles je dosti pomalý. Na druhé straně složka momentu od budicího a tlumicího vinutí je podstatně větší (v důsledku vyšší rezistance), její zánik je naopak velmi rychlý. Žádná z těchto složek není závislá na okamžiku poruchy, jenž je dán úhlem  $\gamma_0$ .

V obecném případě obsahuje moment ještě složku o dvojnásobném kmitočtu, která vyplývá z existence proudové složky o stejném kmitočtu (viz rovnice (3.29)).

### 3.4. Dvojfázový zkrat na svorkách stroje

Základní schéma je znázorněno na obr. 3.14. Je zřejmé, že  $i_B = -i_C$ .



Obr. 3.14: Dvojfázový zkrat na svorkách alternátoru

V okamžiku, kdy nastane zkrat, nemůže se energie magnetického pole vinutí B a C náhle změnit a musí zůstat zachována. Zachováno musí proto být i příslušné tokové sprážení dané vztahem  $\Psi_B - \Psi_C$ . Přitom každé z tokových sprážení sestává ze dvou částí: první je od toku budicího vinutí, druhá od toku samotného statorového vinutí. To lze formálně zapsat jako

$$\Psi_B - \Psi_C = (\Psi_{fB} + \Psi_{BB}) - (\Psi_{fC} + \Psi_{CC}) = \Psi_{fB} - \Psi_{fC} + 2 \cdot \Psi_{BB}. \quad (3.35)$$

Pokud byl generátor před poruchou naprázdno, vinutím B a C neprotékaly žádné proudy, takže příslušná vlastní sprážení byla nulová. Pak ovšem

$$\Psi_B(0^-) - \Psi_C(0^-) = \Psi_{fB0} - \Psi_{fC0}, \quad (3.36)$$

takže v okamžiku zkratu musí platit

$$\Psi_{fB} - \Psi_{fC} + 2 \cdot \Psi_{BB} = \Psi_{fB0} - \Psi_{fC0} \quad (3.37)$$

a odtud

$$\Psi_{BB} = \frac{1}{2} \cdot [(\Psi_{fB0} - \Psi_{fC0}) - (\Psi_{fB} - \Psi_{fC})]. \quad (3.38)$$

Poněvadž

$$\begin{aligned} \Psi_{fB} &= \Psi_{fa} \cdot \cos\left(\gamma - \frac{2\pi}{3}\right), & \Psi_{fB0} &= \Psi_{fa} \cdot \cos\left(\gamma_0 - \frac{2\pi}{3}\right), \\ \Psi_{fC} &= \Psi_{fa} \cdot \cos\left(\gamma - \frac{4\pi}{3}\right), & \Psi_{fC0} &= \Psi_{fa} \cdot \cos\left(\gamma_0 - \frac{4\pi}{3}\right), \end{aligned} \quad (3.39)$$

$$\gamma = \gamma_0 + \omega t$$

dostaneme po dosazení do (3.38)

$$\Psi_{BB} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \Psi_{fa} \cdot \sin(\gamma_0 - \gamma). \quad (3.40)$$

Jak plyne z dřívějšího výkladu, je  $E_{fm} = \omega \cdot \Psi_{fa}$  a protože  $i_B$  má hned po zkratu velikost danou podílem  $\Psi_{BB}/L_d''$ , dostáváme pro případ stroje s hladkým rotorem

$$i_B = -i_C = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \frac{E_{fm}}{X_d''} (\sin \gamma_0 - \sin \gamma). \quad (3.41)$$

Je zřejmé, že zkratový proud opět sestává ze dvou složek. První z nich obsahující  $\sin \gamma_0$  je

stejnosemřná a její velikost závisí na okamžiku zkratu, druhá, obsahující  $\sin(\gamma_0 + \omega t)$ , střídavá s amplitudou, jejíž velikost na okamžiku zkratu nezávisí. Nastane-li zkrat v okamžiku  $\gamma_0 = 0$ , je spřažený magnetický tok ve vinutí fáze A maximální a indukované napětí nulové. Zkratový proud ve fázích B a C je pak čistě harmonický, stejnosměrná složka je nulová.

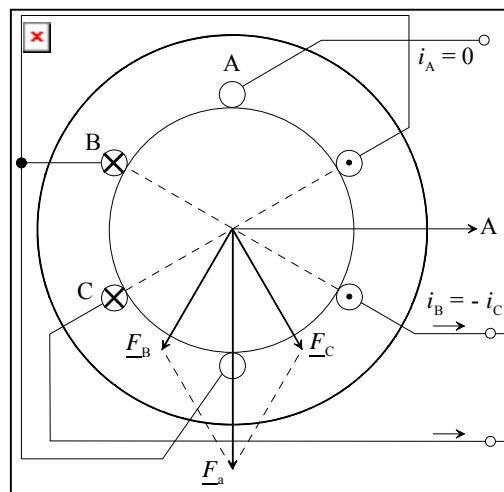
Pokud  $\gamma_0 = \pi/2$ , je indukované napětí ve fázi A na svém minimu a stejnosměrná složka zkratového proudu ve zbývajících fázích nabývá svého maxima. Podobným způsobem je možno určit i všechny toky a toková spřažení.

Nyní je ještě třeba určit (pro pozdější stanovení momentů) velikost magnetomotorické síly vyvolané proudy  $i_B$  a  $i_C$ . Součet příslušných fázorů dává

$$\begin{aligned} \underline{F}_a &= \underline{F}_B + \underline{F}_C = F_B \cdot e^{j\frac{2\pi}{3}} + F_C \cdot e^{-j\frac{2\pi}{3}} = -j \cdot \sqrt{3} \cdot F_C = -j \cdot \sqrt{3} \cdot N_a \cdot i_C = \\ &= -j \cdot \sqrt{3} \cdot N_a \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \frac{E_{fm}}{X_d''} (\sin\gamma_0 - \sin\gamma) = -j \cdot N_a \cdot \frac{3}{2} \cdot \frac{E_{fm}}{X_d''} (\sin\gamma_0 - \sin\gamma). \end{aligned} \quad (3.42)$$

Výsledek je rovněž patrný z obr. 3.15. Magnetomotorická síla má směr kolmý k ose fáze A a je úměrná poruchovému proudu. Je tedy stálá v prostoru, ale pulsuje s kmitočtem  $\omega$  (což je dáno časově proměnným úhlem  $\gamma$ ). Vzhledem k pohybu rotoru se však otáčí rychlostí  $-\omega$  a vyvolává tak složky v osách  $d$  a  $q$  o velikosti

$$F_{ad} = F_a \cdot \cos\left(\gamma + \frac{\pi}{2}\right) = -\sqrt{3} \cdot F_C \cdot \sin\gamma, \quad F_{aq} = F_a \cdot \sin\left(\gamma + \frac{\pi}{2}\right) = \sqrt{3} \cdot F_C \cdot \cos\gamma. \quad (3.43)$$



Obr. 3.15: Stanovení celkové magnetomotorické síly statoru  $\underline{F}_a$

Po dosazení za  $F_a$  z (3.42) se okamžitě ukáže, že složky v obou osách obsahují konstantní člen, první a druhou harmonickou. Zatímco konstanta a amplituda druhé harmonické nezávisí na okamžiku zkratu, amplituda první harmonické na tomto okamžiku ( $\gamma_0$ ) závisí.

Existence uvedených složek zejména v ose  $d$  má za následek vznik dalších složek proudů v budicím i tlumicím vinutí v téže ose. Složka magnetomotorické síly  $F_{ad}$  nutí vybudovaný magnetický tok procházet vzduchovou mezerou do rotoru; odpovídající tokové spřažení úměrné této magnetomotorické síle označme  $\Psi_{ar}$ . Protože však po poruše musí tokové spřažení rotoru zůstat zachováno, indukují se v budicím a tlumicím vinutí takové proudy, které vyvolají toková spřažení stejné velikosti, ale opačného směru. Skutečná velikost proudu budicího vinutí pak závisí na tom, jak dobře je toto vinutí odstíněno tlumičem ve stejné ose. Je-li toto stínění dokonalé, zůstává budicí proud nezměněn a tokové spřažení statorových vinutí se kompenzuje proudem v tlumiči.



Pokud porucha vznikne v okamžiku  $\gamma_0 = 0$ , satorové proudy neobsahují stejnosměrnou složku. Pak se však v ose  $d$  objevuje složka s dvojnásobným kmitočtem. Proudů indukované v rotoru jsou pak podobné, jako při trojfázovém zkratu, ale mají odpovídající dvojnásobný kmitočet. Pokud však dojde k poruše při  $\gamma_0 = -\pi/2$ , je stejnosměrná složka magnetomotorické síly statoru na svém maximu. Tokové sprážením s rotorem je nyní charakterizováno obsahem jak základní harmonické, tak i druhé harmonické a proud indukovaný v rotoru má nyní tvar zcela odlišný.

Má-li stroj rotor vyniklé póly, použití vztahu (3.41) pro proud satorových vinutí B a C není díky různým reaktancím v osách  $d$  a  $q$  zcela korektní. V takovém případě literatura nabízí využití vztahu

$$i_B = -i_C = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \frac{E_{fm} \cdot (\sin\gamma_0 - \sin\gamma)}{X'_d \cdot \sin^2\gamma + X''_q \cdot \cos^2\gamma} \quad (3.44)$$

Pokud takový generátor nemá v ose  $q$  tlumicí vinutí, existuje značný rozdíl mezi oběma rázovými reaktancemi, což má značný vliv na zkršení poruchových proudů (ty nyní obsahují celou řadu vyšších harmonických, což lze snadno ukázat Fourierovým rozkladem).

### Využití souměrných složek k analýze dvojfázového zkratu

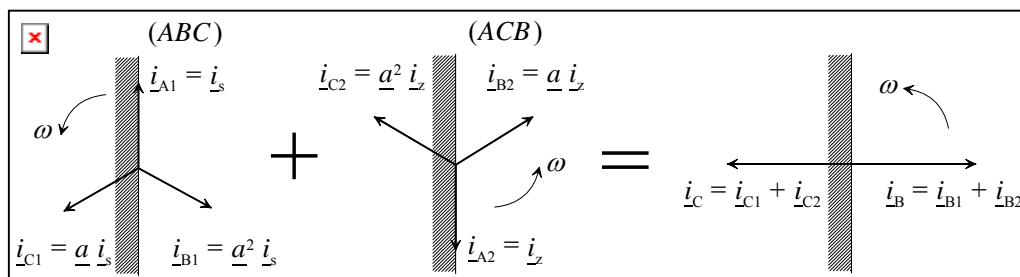
Při dvojfázovém zkratu, jak už bylo naznačeno, platí:  $i_A = 0$ ,  $i_B = -i_C = \underline{i}$ . Pro fázory nulové, sousledné a zpětné složky platí

$$\begin{bmatrix} i_0 \\ i_s \\ i_z \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \underline{a} & \underline{a}^2 \\ 1 & \underline{a}^2 & \underline{a} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ \underline{i} \\ -\underline{i} \end{bmatrix} = \frac{\underline{i}}{3} \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ \underline{j} \\ -\underline{j} \end{bmatrix}, \quad \underline{a} = e^{j\frac{2\pi}{3}} \quad (3.45)$$

Je zřejmé, že sousledná složka proudu je třetinová a předbíhá proud ve fázi B o úhel  $90^\circ$ , zatímco složka zpětná o stejné velikosti je o  $90^\circ$  za proudem ve fázi B zpožděna. Nulová složka má nulovou hodnotu. Proudů v jednotlivých fázích lze zapsat jako

$$\begin{bmatrix} i_A \\ i_B \\ i_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \underline{a}^2 & \underline{a} \\ 1 & \underline{a} & \underline{a}^2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ i_s \\ i_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_s \\ \underline{a}^2 \cdot i_s \\ \underline{a} \cdot i_s \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} i_z \\ \underline{a} \cdot i_z \\ \underline{a}^2 \cdot i_z \end{bmatrix}, \quad (3.46)$$

což odpovídá obr. 3.16.



Obr. 3.16: Transformace proudu dvojfázového zkratu do složek

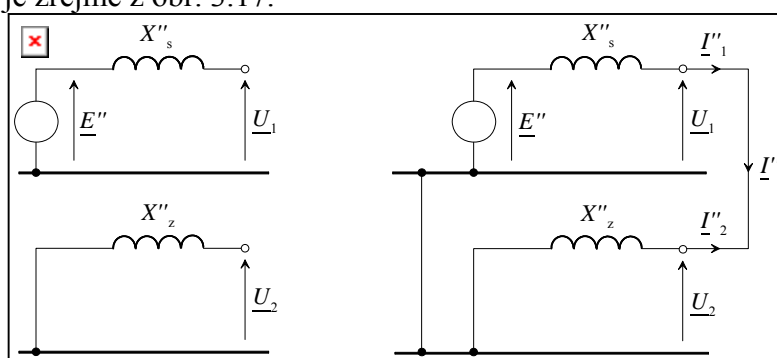
Chceme-li dále analyzovat dvojfázový zkrat, můžeme pomocí symetrických složek analyzovat zvlášť stejnosměrnou i střídavou komponentu (3.44).

Střídavá složka proudu statoru vyvolává magnetomotorickou sílu, která má stálou prostorovou polohu vůči statoru, ale pulsuje s kmitočtem  $f$ . Takové pole je možno pomocí Leblancova teorému rozložit na dvě točivá pole s opačným smyslem rotace (obr. 3.16). Pole sousledné složky se otáčí synchronně s rotorem a vyvolává v budicím a tlumicím vinutí stejno-

směrné proudy. Pole zpětné složky se otáčí dvojnásobnou rychlostí vůči rotoru a indukuje v něm proudy o dvojitým kmitočtu. Ty tvoří magnetomotorickou sílu, jež je vůči rotoru nehybná, ale má opět pulsující charakter. Jí vybuzené pole lze opět rozložit na dvě pole točivá s dvojnásobným kmitočtem, ale opačného smyslu. Tato pole indukují ve statoru první a třetí harmonickou atd. Proto se v rotorovém i statorovém proudu objevují harmonické vyšších řádů (ve statorovém liché, v rotorovém sudé). V určitých případech se však třetí a vyšší harmonické nemusí vyvinout.

Pokud se jedná o stejnosměrnou složku (vyvine-li se), otáčí se s opačným základním kmitočtem vůči rotoru a indukuje v rotorovém vinutí proud základní harmonické, jež vyvolává pulsující pole. To lze opět rozložit na dvě pole otáčející se opačnými směry a pole odpovídající zpětné složce indukuje v proudu statoru druhou harmonickou. Návaznou úvahou zjistíme, že v rotoru se indukují liché a ve statoru sudé harmonické.

Celkově lze tedy shrnout, že obecně obsahuje proud statoru kromě stejnosměrné složky všechny sudé i liché harmonické. Složitějšími úvahami lze ještě dospět ke stanovení přibližných hodnot sousledné a zpětné reaktance. Zatímco  $X_s'' = X_d''$ , je  $X_z'' = \sqrt{X_d'' \cdot X_q''}$ . Zapojení těchto reaktancí je zřejmé z obr. 3.17.



Obr. 17: Zapojení sousledné a zpětné rázové reaktance

### Vliv rezistance vinutí

Rezistance fázového vinutí vyprodukuje útlum stejnosměrné složky zkratového proudu s časovou konstantou

$$T_a = \frac{X_2''}{\omega R} = \frac{\sqrt{L_d'' \cdot L_q''}}{R} \quad (3.47)$$

Rovnici (3.44) můžeme nyní přepsat do tvaru

$$i_B = -i_C = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \frac{E_{fm} \cdot \left( \sin \gamma_0 \cdot e^{-\frac{t}{T_a}} - \sin \gamma \right)}{X_d'' \cdot \sin^2 \gamma + X_q'' \cdot \cos^2 \gamma} \quad (3.48)$$

Zánik střídavé složky statorového proudu lze dobře vysvětlit pomocí sousledné a zpětné složky. Sousledná složka produkuje točivý tok, jehož pronikání do rotoru brání stejnosměrný rotorový proud. Rezistance rotoru ovšem vyvolává zánik tohoto proudu, a to nejprve ve vinutí tlumiče a poté budiče. Během procesu zanikání začne statorový tok pronikat hlouběji a hlouběji do rotoru. Situace je zde proto shodná se situací při trojfázovém zkratu. To znamená, že při vyšetřování rázového jevu položíme  $X_s'' = X_d''$ ,  $X_s' = X_d'$  a  $X_s = X_d$ .

Zpětná složka rotuje vůči rotoru v opačném směru. Její pronikání do rotoru zabraňuje proud o dvojnásobném kmitočtu, který se musí indukovat v jeho vinutích. Reaktance, která zde figuruje ve všech třech charakteristických stavech, je rovna rázové zpětné reaktanci, tedy

$$X_z'' = X_z' = X_z = \sqrt{X_d'' \cdot X_q''}.$$

Zapojení sousledné i zpětné reaktance ve všech charakteristických stavech stroje je stejné a plyne z obr. 3.17. Vzhledem k jejich sériovému zapojení je zřejmé, že k popisu amplitudy střídavé složky můžeme využít rovnici (3.27). Obdržíme tak

$$i_B = -i_C = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \frac{E_{fm} \cdot \left( \sin \gamma_0 \cdot e^{\frac{t}{T_\alpha}} - f(t) \cdot \sin \gamma \right)}{X_d'' \cdot \sin^2 \gamma + X_q'' \cdot \cos^2 \gamma}, \quad (3.49)$$

kde

$$f(t) = (X_d'' + X_z) \left[ \left( \frac{1}{X_d'' + X_z} - \frac{1}{X_d' + X_z} \right) \cdot e^{\frac{t}{T_\beta''}} + \left( \frac{1}{X_d' + X_z} - \frac{1}{X_d + X_z} \right) \cdot e^{\frac{t}{T_\beta'}} + \frac{1}{X_d + X_z} \right]. \quad (3.50)$$

Nyní ještě zbývá určit hodnoty  $T_\beta''$  a  $T_\beta'$ .

Poněvadž reaktance jsou v tomto případě odlišné od hodnot charakteristických pro trojfázový zkrat, musí se původní hodnoty  $T_d''$  a  $T_d'$  upravit podle následujících pravidel:

$$T_\beta'' = T_d'' \cdot \frac{X_d'}{X_d''} \cdot \frac{X_d'' + X_z}{X_d' + X_z}, \quad T_\beta' = T_d' \cdot \frac{X_d}{X_d'} \cdot \frac{X_d' + X_z}{X_d + X_z}. \quad (3.51)$$

### Rázový moment

Podobně jako v případě trojfázového zkratu musí být tok vybuzený tlumícím vinutím v prvních fázích poruchy tak velký, aby se vyrušil s tokem statoru v obou osách. Pak je počáteční moment roven záběru toku budícího vinutí v ose  $d$  a složky magnetomotorické síly v ose  $q$ . Využijeme-li rovnice (3.31) a (3.32) s dosazením za statorový proud podle rovnic (3.42) a (3.43), dostáváme pro stroj s hladkým rotorem vztah

$$M = \frac{3}{\omega} \cdot \frac{E_{fm}^2}{X_d''} (\sin \gamma - \sin \gamma_0) \cdot \cos \gamma, \quad (3.52)$$

jenž ovšem platí jen tehdy, zanedbáme-li činné odpory ve vinutích. Jestliže však uvážíme, že děje ve statorovém vinutí zanikají s časovou konstantou  $T_\alpha$  a ve vinutích rotoru s konstantami  $T_\beta''$  a  $T_\beta'$ , lze psát, že

$$M = \frac{3}{\omega} \cdot \frac{E_{fm}^2}{X_d''} \left( f(t) \cdot \sin \gamma - \sin \gamma_0 \cdot e^{\frac{t}{T_\alpha}} \right) \cdot f(t) \cdot \cos \gamma, \quad (3.53)$$

kde význam jednotlivých symbolů byl vysvětlen již dříve.

Na rozdíl od trojfázového zkratu je v tomto případě jasné, že velikost vzniklého elektromagnetického momentu závisí na okamžiku zkratu. Co do kmitočtového spektra, objevuje se zde složka se základním kmitočtem, jejíž velikost je však nulová v případě že  $\sin \gamma_0 = 0$  (naopak, pro  $\sin \gamma_0 = \pm \pi/2$  nastává její maximum) a složka s kmitočtem dvojnásobným. Po zatluštění všech volných složek však zůstane jen složka s touto dvojnásobnou frekvencí.

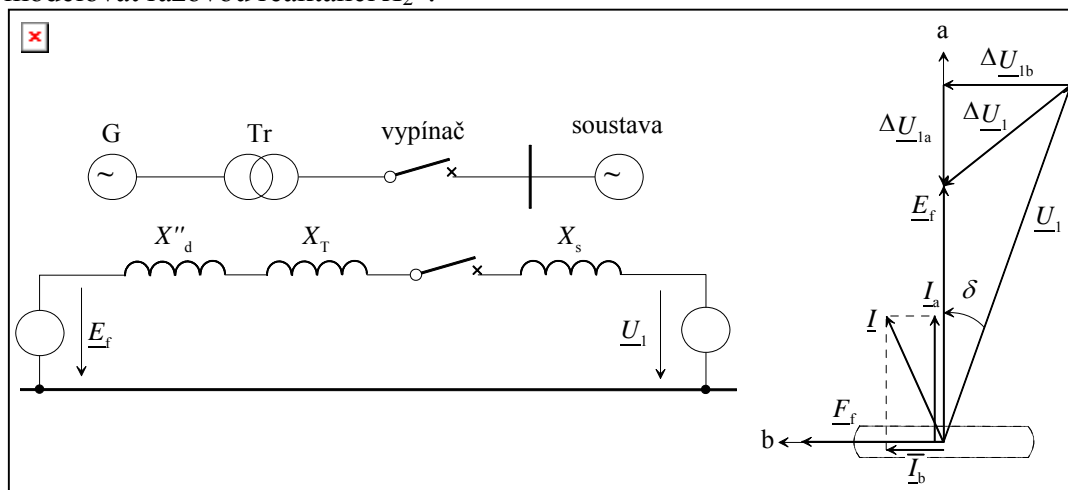
Je-li nutno uvažovat rozdíl mezi osami  $d$  a  $q$  (zejména v rázových reaktancích), vztahy se velmi silně zkomplikují. Lze je však snadno vyhledat v literatuře.

### Synchronizace

Jedná se o proces, kdy se nabuzený generátor připojuje k síti. Schéma synchronizace plyne z obr. 3. 18. Síť je přitom nahrazena sběrnicí o nekonečně vysokém výkonu a napětí  $\underline{U}_1$  za

reaktancí  $X_1$ . Před sepnutím se předpokládá, že rotor generátoru se otáčí rychlostí  $\omega$ , jež je velmi blízká synchronní rychlosti  $\omega_s$ . Dále se předpokládá, že napětí naprázdno  $\underline{E}_f$  synchronního generátoru se blíží napětí sítě  $\underline{U}_1$ .

Ideální stav nastává, jestliže  $\omega = \omega_s$  a  $\underline{E}_f = \underline{U}_1$ . V takovém případě soustavou neprotékají žádné cirkulační proudy. Tyto podmínky ovšem zpravidla nebývají beze zbytku splněny. Cirkulační proudy, které soustavou začnou protékat, pak obsahují stejnosměrnou i střídavou složku. Pokud stroj před synchronizací nenapájel žádnou místní zátěž, lze první okamžik procesu modelovat rázovou reaktancí  $X_2''$ .



Obr. 3.18: Schéma synchronizace

Cirkulační proud lze pak vyjádřit pomocí  $\Delta \underline{U}$  a impedance z pohledu vypínače. Pro jednodušnost budeme pokládat rezistanci satorového vinutí za zanedbatelnou a předpokládat, že stroj má hladký rotor ( $X_d'' = X_q''$ ).

Rázový proud satoru lze určit pomocí rozkladu fázoru napětí do os  $a$  a  $b$ . Pozor, tyto složky se liší od složek v osách  $d$  a  $q$ , poněvadž nerotují. Poněvadž impedance je čistě jalová, jsou složky proudu zpožděny za složkami napětí o  $90^\circ$ . Složka napětí  $\Delta \underline{U}_a$  proto bude vyvolávat složku proudu  $\underline{I}_b$  a naopak. Z fázorového diagramu na obr. 3.18 obdržíme vztah

$$I_{bm} = \frac{U_{1m} \cdot \cos \delta - E_{fm}}{X_d'' + X_T + X_s}, \quad (3.54)$$

kam dosazujeme, a z něhož dostáváme maximální hodnoty. Protože  $\Delta \underline{U}_a$  působí v ose  $q$  (jako napětí  $\underline{E}_f$ ), příslušné střídavé i stejnosměrné složky proudu mají stejný tvar jako v rovnicích (3.11). Střídavé složky vyvolávají odpovídající magnetomotorické síly jež rotují s rotorem a jsou ve fázi s magnetomotorickou silou budícího vinutí. Proto nemohou vyvozovat žádný elektromagnetický moment. Stejnosměrné složky proudu jsou naopak prostorově stále vyvolávají magnetomotorické síly, jež se vzhledem k rotoru pohybují opačným směrem. Úhel mezi magnetickým tokem rotoru a těmito silami se mění a elektromagnetický moment je tedy harmonickou funkcí. Lze jej popsat vztahem

$$M_1 = -\frac{3E_f}{\omega} \cdot \frac{U_1 \cdot \cos \delta - E_f}{X_d'' + X_T + X_s} \cdot \sin \omega t. \quad (3.55)$$

Záporné znaménko je zde proto, že fázory  $\Delta \underline{U}_a$  a  $\underline{E}_f$  jdou proti sobě.

Podobně dostáváme

$$I_{am} = \frac{U_{1m} \cdot \sin \delta}{X_d'' + X_T + X_s}. \quad (3.56)$$

Střídavá proudová složka  $I_{am}$  působí v ose  $q$  a rotuje tedy s rotorem. Interakce příslušné magnetomotorické síly s magnetickým tokem v ose  $q$  vyvolává moment, který má v prostoru kon-

stantní směr a jeho velikost je

$$M_2 = \frac{3E_f}{\omega} \cdot \frac{U_1 \cdot \sin\delta}{X_d'' + X_T + X_s} \quad (3.57)$$

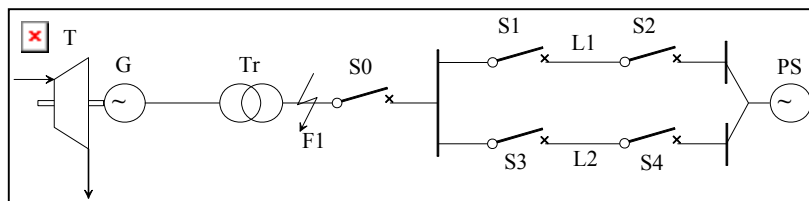
Stejnoseměrná složka  $I_{am}$  vyvolává opět magnetomotorickou sílu, jejíž prostorový směr je stálý. Velikost příslušného momentu je

$$M_3 = -\frac{3E_f}{\omega} \cdot \frac{U_1 \cdot \sin\delta}{X_d'' + X_T + X_s} \cdot \cos\omega t \quad (3.58)$$

Celkový počáteční elektromagnetický moment je tedy dán součtem uvedených tří složek, které jsou podobné složkám při trojfázovém zkratu. Maximum momentu přitom silně závisí na úhlu  $\delta$ .

### 3.5. Zkrat v síti

Úplný trojfázový zkrat zpravidla nenastává na svorkách alternátoru, ale až dál v soustavě. Příklad je znázorněn na obr. 3.19.



Obr. 3.19: Příklad zkratu v soustavě

Výpočet velikosti zkratového proudu zde probíhá stejným způsobem jako v případě trojfázového zkratu na svorkách generátoru s tím, že se musí korigovat reaktance do místa zkratu a příslušné časové konstanty. Zřejmě se musí místo rázové, přechodné a synchronní reaktance do příslušných vzorců dosahovat hodnoty

$$*X_d'' = X_d'' + X_T, \quad *X_d' = X_d' + X_T, \quad *X_d = X_d + X_T \quad (3.59)$$

(výsledné proudy a momenty jsou pak o to menší). Dále se zvyšuje rezistance vodivých cest do místa zkratu, což má za následek rychlejší tlumení stejnosměrné složky statorového proudu. Konečně je nutno modifikovat časové konstanty  $T_d''$  a  $T_d'$  podle vztahů

$$*T_d'' = T_d'' \cdot \frac{X_d'}{X_d''} \cdot \frac{X_d'' + X_T}{X_d' + X_T}, \quad *T_d' = T_d' \cdot \frac{X_d}{X_d'} \cdot \frac{X_d' + X_T}{X_d + X_T} \quad (3.60)$$

Časové konstanty se tak zvětšují.

V případě nesouměrných zkratů v síti mohou být zkratové proudy dále zkresleny vlivem blokového transformátoru zapojeného ve schématu trojúhelník – hvězda.