

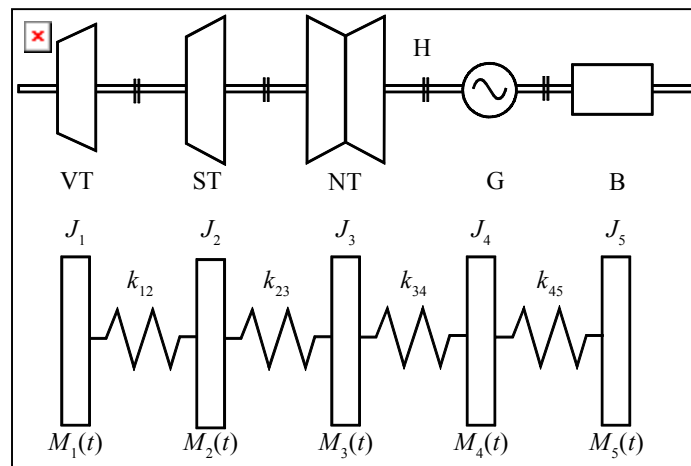
4. Elektromechanické jevy v soustavě

V této kapitole bude vysvětleno, jak elektromagnetické jevy v generátoru ovlivňují jevy mechanické a jak tyto jevy závisí na okamžitém provozním stavu. Bude zaveden pojem stability spolu se základním matematickým modelem a metodikou jeho řešení.

4.1. Rovnice kývání

V předchozích kapitolách bylo vysvětleno, jak vypadá celé rotující soustrojí sestávající z několika stupňů turbíny (vysokotlaký, středotlaký a nízkotlaký) a rotoru turbogenerátoru s rotačním budičem. Celý systém může být z mechanického hlediska modelován sérií roztočených setrvačných hmot spojených pružným hřídelem. Takový model může poskytnout vlastní torzní kmitočty a rovněž podrobnou představu o časovém průběhu momentů vznikajících během poruchy.

Základní náčrt typického uspořádání je znázorněn na obr. 4.1.



Obr. 4.1: Mechanické schéma trojstupňové turbíny s generátorem a budičem na jednom hřídeli

Obecná pohybová rovnice rotující hmotnosti je dána vztahem

$$J \cdot \frac{d\omega}{dt} + B \cdot \omega = M_h - M_b, \quad (4.1)$$

kde J označuje moment setrvačnosti roztočených hmot, B součinitel tlumení, ω úhlovou rychlost, M_h hnací moment a M_b brzdný moment opačného smyslu.

V našem případě bude zpravidla M_h hnací moment vyvozený turbínou a M_b elektromagnetický moment synchronního stroje, jenž bude v dalším textu označen jako M_e . Zatímco hnací moment turbíny se mění obvykle velmi pomalu díky velkým časovým konstantám kotle a turbíny, elektromagnetický moment se může měnit velmi rychle, prakticky téměř okamžitě, jak je zřejmé z předchozích odstavců. V ustáleném stavu, kdy je časová derivace ve vztahu (4.1) nulová, se soustava otáčí se synchronní rychlostí ω_s , zatímco hnací moment turbíny M_h je dán součtem brzdného momentu při synchronní rychlosti a členu vyjadřujícího tlumení

$$M_h = M_m + B \cdot \omega_s, \quad (4.2)$$

kde M_m je mechanický brzdý moment v ustáleném stavu. Je-li obecně hnací moment větší, než oba členy na pravé straně, rotující hmoty se urychlují, v opačném případě se zpomalují.

V předchozích kapitolách bylo vysvětleno, že poloha rotoru vůči synchronně rotující referenční ose (s úhlovou rychlostí ω_s) je popsána elektrickým úhlem δ_e (jenž odpovídá mechanickému úhlu δ_m). Tento úhel může samozřejmě být časově proměnný. Mechanickou úhlovou rychlost rotoru pak můžeme vyjádřit vztahem

$$\omega = \omega_s + \frac{d\delta_m}{dt}. \quad (4.3)$$

Dosadíme-li tento vztah do rovnice (4.1), dostaneme

$$J \cdot \frac{d^2\delta_m}{dt^2} + B \cdot \left(\omega_s + \frac{d\delta_m}{dt} \right) = M_h - M_e, \quad (4.4)$$

a s využitím rovnice (4.2)

$$J \cdot \frac{d^2\delta_m}{dt^2} + B \cdot \frac{d\delta_m}{dt} = M_h - M_e - B \cdot \omega_s = M_m - M_e. \quad (4.5)$$

Jestliže tuto rovnici přenásobíme synchronní úhlovou rychlostí ω_s a vyjádříme-li momenty na pravé straně pomocí výkonů, získáme vztah

$$J \cdot \omega_s \cdot \frac{d^2\delta_m}{dt^2} + B \cdot \omega_s \cdot \frac{d\delta_m}{dt} = \omega_s \cdot \frac{P_m}{\omega} - \omega_s \cdot \frac{P_e}{\omega}. \quad (4.6)$$

Poněvadž poměr synchronní a okamžité rychlosti je prakticky roven jedné, lze ještě rovnici (4.6) přepsat do tvaru

$$H_m \cdot \frac{d^2\delta_m}{dt^2} + B_m \cdot \frac{d\delta_m}{dt} = P_m - P_e, \quad (4.7)$$

kde $H_m = J\omega_s$ je moment hybnosti a $B_m = B\omega_s$ je modifikovaný součinitel tlumení. Této rovnici se říká rovnice kývání a má zásadní význam pro popis dynamiky rotoru.

Běžnou praxí je vyjadřovat moment hybnosti rotoru pomocí normalizované setrvačné konstanty stroje H , která je definována jako

$$H = \frac{1}{2} \cdot \frac{J\omega_s^2}{S_n}, \quad (4.8)$$

kde S_n označuje jmenovitý výkon stroje v MVA. Pak

$$H_m = H \cdot \frac{2S_n}{\omega_s}. \quad (4.9)$$

Veličinu H_m lze vyjádřit i pomocí časové konstanty T_m definované jako

$$T_m = \frac{J\omega_s^2}{S_n} \Rightarrow H_m = T_m \cdot \frac{S_n}{\omega_s}, \quad (4.10)$$

kteřá vyjadřuje, za jak dlouho dosáhne rotor soustrojí synchronní mechanické rychlosti, jestliže je roztáčen konstantním momentem o velikosti S_n/ω_s . Rovnici (4.7) lze samozřejmě vyjádřit i v elektrických veličinách, zavedeme-li

$$\delta_e = \delta_m \cdot \frac{p}{2}, \quad \omega_{es} = \omega_s \cdot \frac{p}{2}, \quad \omega_e = \omega \cdot \frac{p}{2}, \quad (4.11)$$

kde p je počet pólů. V takovém případě má tvar

$$\frac{T_m \cdot S_n}{\omega_{es}} \cdot \frac{d^2\delta_e}{dt^2} + B_e \cdot \frac{d\delta_e}{dt} = P_m - P_e, \quad (4.12)$$

kde $B_e = 2B_m/p$. Další možností je vyjádřit celou rovnici (4.7) nebo (4.12) v poměrných hodnotách. V takovém případě se vydělí levá i pravá strana jmenovitým výkonem S_n .

4.2. Tlumení

Tlumení pohybu rotoru v důsledku mechanických ztrát je malé a při většině úvah i výpočtů je lze zanedbat. Hlavním zdrojem tlumení je tlumící vinutí s velkým poměrem rezistance/reaktance. V rázovém stavu zpravidla perfektně odstiňuje budící vinutí tak, aby tok vyvolaný proudy statoru nepronikal do tělesa rotoru. V přechodném stavu proniká tok ve vzducho-

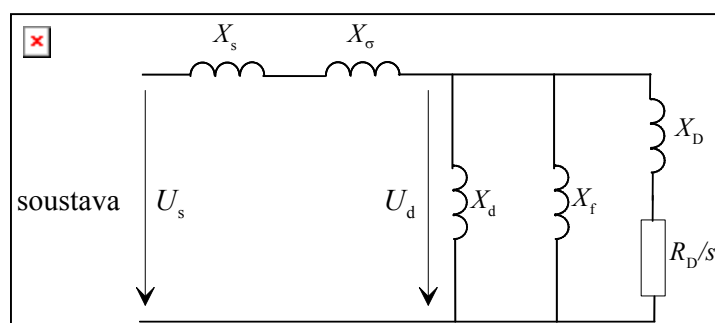
vé mezeře (jenž rotuje synchronní rychlostí) do rotoru a indukuje v tlumicím vinutí proudy kdykoli se synchronní rychlost odlišuje od okamžité rychlosti rotoru. Tyto proudy vytvářejí tlumicí moment, který se snaží udržet rychlost rotoru na synchronní hodnotě. A poněvadž tento dodatečný moment se objevuje jen při $\omega \neq \omega_s$ a je úměrný $\Delta\omega$, nazývá se asynchronní moment.

Tlumicí vinutí je buď v obou osách rotoru nebo pouze v ose d . V turbogenerátorech vyrobených z masivní oceli se mohou dobře uzavírat vířivé proudy, které mají samy o sobě tlumicí účinek. V generátorech s vyniklými póly, jež jsou laminovány, musí být toto vinutí explicitně přítomno, aby se docílilo požadovaných tlumicích účinků.

Přesné odvození velikosti tlumicích účinků je dosti obtížné. Nicméně, pro soustavu generátor – soustava neomezeného výkonu lze tyto účinky rozumně kvantifikovat, zavedeme-li následující zjednodušující předpoklady:

- rezistance statorového a budicího vinutí je zanedbatelná,
- tlumení je realizováno výlučně tlumicím vinutím,
- zanedbá se rozptylová reaktance statoru,
- tlumení není ovlivněno budicím proudem (budicí vinutí je zkratováno).

Nyní lze velikost tlumicího momentu odvodit z náhradního schématu pro asynchronní motor, jak je zakresleno na obr. 2.20. Přijmeme-li za fakt, že synchronní stroj pracuje během první fáze poruchy jako asynchronní stroj, lze na něj z hlediska soustavy pohlížet jak je znázorněno na obr. 4.2. Symbol X_s označuje reaktanci soustavy, X_σ rozptylovou reaktanci statoru a U_s napětí soustavy. Význam ostatních označení v obrázku odpovídá klasickým schématům synchronního stroje. Skluz s je dán jako $\Delta\omega/\omega_s$.



Obr. 4.2: Schéma alternátoru napájeného při poruše ze soustavy

Uvažujme nejprve stroj s hladkým rotorem. Zanedbáme-li rozptylovou reaktanci X_σ , je přibližně

$$X'_d \cong \frac{1}{\frac{1}{X_d} + \frac{1}{X_f}}, \quad X''_d \cong \frac{1}{\frac{1}{X_d} + \frac{1}{X_f} + \frac{1}{X_D}} \Rightarrow X_D \cong \frac{X'_d \cdot X''_d}{X'_d - X''_d}. \quad (4.13)$$

Rázovou časovou konstantu můžeme nyní určit jako

$$T''_d = \frac{X_D}{\omega_s R_D} \cong \frac{X'_d \cdot X''_d}{\omega_s R_D \cdot (X'_d - X''_d)} \quad (4.14)$$

a odtud

$$\frac{R_D}{s} \cong \frac{X'_d \cdot X''_d}{T''_d \cdot \Delta\omega \cdot (X'_d - X''_d)}. \quad (4.15)$$

Pro malé odchylky rychlosti $\Delta\omega$ je podíl R_D/s velký a proud protéká zejména oběma větvemi obsahujícími reaktance X_f a X_d . Zapojení s reaktancemi X_s a X'_d pak funguje jako napěťový dělič. Pak je napětí U_d na reaktanci X'_d dáno vztahem

$$U_d = U_s \cdot \frac{X'_d}{X'_d + X_s} \quad (4.16)$$

a proud I_D protékající větví tlumícího vinutí (jenž je na stejné hodnotě napětí) má pak velikost

$$I_D = U_s \cdot \frac{X'_d}{X'_d + X_s} \cdot \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{R_D}{s}\right)^2 + X_D^2}}. \quad (4.17)$$

Výkon spotřebovaný v tlumícím vinutí pak obdržíme s využitím rovnice (4.15) jako

$$P_D = I_D^2 \cdot \frac{R_D}{s} \cong U_s^2 \cdot \frac{X'_d - X''_d}{(X + X'_d)^2} \cdot \frac{X'_d}{X''_d} \cdot \frac{\Delta\omega \cdot T''_d}{1 + (\Delta\omega \cdot T''_d)^2}. \quad (4.18)$$

Uvážíme-li rotor s vyniklými póly, získali bychom podobný vztah i pro osu q . Místo napětí U_s však v ose d použijeme jeho průmět $U_s \cdot \sin\delta$, v ose q pak $U_s \cdot \cos\delta$. Výsledný výraz má pak tvar

$$P_D \cong U_s^2 \cdot \left[\frac{X'_d - X''_d}{(X + X'_d)^2} \cdot \frac{X'_d}{X''_d} \cdot \frac{\Delta\omega \cdot T''_d}{1 + (\Delta\omega \cdot T''_d)^2} \cdot \sin^2\delta_e + \frac{X'_q - X''_q}{(X + X'_q)^2} \cdot \frac{X'_q}{X''_q} \cdot \frac{\Delta\omega \cdot T''_q}{1 + (\Delta\omega \cdot T''_q)^2} \cdot \cos^2\delta_e \right]. \quad (4.19)$$

Pro malé skluzy lze zpravidla zanedbat součin $\Delta\omega T''_d$ proti jedné a podobně $\Delta\omega T''_q$. Předchozí vztah je pak možno přepsat do tvaru

$$P_D \cong U_s^2 \cdot \left[\frac{X'_d - X''_d}{(X + X'_d)^2} \cdot \frac{X'_d}{X''_d} \cdot T''_d \cdot \sin^2\delta_e + \frac{X'_q - X''_q}{(X + X'_q)^2} \cdot \frac{X'_q}{X''_q} \cdot T''_q \cdot \cos^2\delta_e \right] \cdot \Delta\omega, \quad (4.20)$$

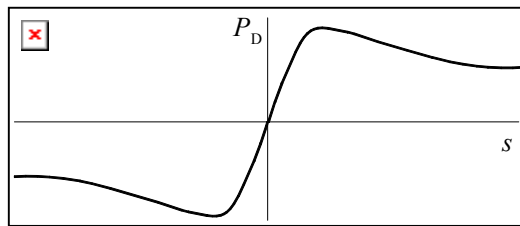
či formálně

$$\Pi_D \cong Y_s^2 \cdot [B_d \cdot \sin^2\delta_e + B_q \cdot \cos^2\delta_e] \cdot \Delta\omega = B_e \cdot \frac{d\delta_e}{d\tau}, \quad (4.21)$$

kde B_d a B_q jsou součinitelé tlumení v obou osách a B_e viz (4.12). Výkon P_D závisí na $\Delta\omega$ lineárně. Pro větší úhly δ_e je tlumení silnější v ose d , pro menší úhly v ose q . Střední hodnota součinitele tlumení je

$$B_{\text{str}} \cong \frac{1}{2} \cdot (B_d + B_q). \quad (4.22)$$

Pokud jsou odchylky rychlosti od synchronní hodnoty vyšší, závislost výkonu P_D na $\Delta\omega$ už není přímková, ale plyne z rovnice (4.19). Její tvar plyne z obr. 4.3.



Obr. 4.3: Obecná závislost P_D na $\Delta\omega$ podle vztahu (4.19)

4.3. Rovnovážné body

Jak již bylo naznačeno, mechanický výkon je dodáván turbínou, která je řízená primárním regulátorem. Elektrický výkon ve vzduchové mezeře závisí na zátěži generátoru a mění se s jeho parametry a zátěžným úhlem. Závisí rovněž na provozním režimu, na tomto místě však budeme uvažovat pouze případ ustáleného chodu do soustavy neomezeného výkonu. Již dříve bylo vypočteno, že elektrický výkon dodávaný do soustavy má velikost

$$P_e = \frac{E_q \cdot U_s}{X_1} \cdot \sin \delta_e + \frac{U_s^2}{2} \cdot \frac{X_1 - X_2}{X_1 \cdot X_2} \cdot \sin 2\delta_e, \quad X_1 = X_d + X_s, \quad X_2 = X_q + X_s, \quad (4.23)$$

příčemž reaktance X_s zahrnuje výslednou reaktanci soustavy od svorek generátoru až do soustavy neomezeného výkonu (zahrnuje například reaktanci blokového transformátoru a ekvivalentní části sítě) a napětí E_q se pokládá za konstantní.

Rovnici (4.12) lze nyní převést do tvaru

$$\frac{T_m \cdot S_n}{\omega_{es}} \cdot \frac{d^2 \delta_e}{dt^2} + B_e \cdot \frac{d\delta_e}{dt} + P_e(\delta_e) = P_m. \quad (4.24)$$

Počáteční podmínky k této rovnici plynou z předchozího ustáleného chodu při synchronní rychlosti, tedy

$$\frac{d\delta_e}{d\tau}(\delta_e = \delta_0) = 0, \quad \frac{d^2 \delta_e}{d\tau^2}(\delta_e = \delta_0) = 0, \quad (4.25)$$

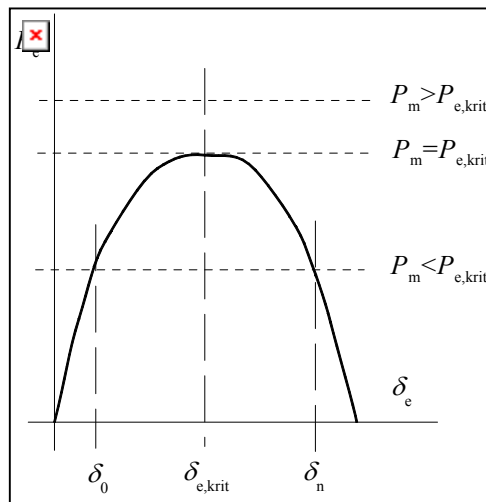
kde δ_0 je úhel dynamické rovnováhy rotoru při synchronní rychlosti; pro tento úhel platí, že

$$P_e(\delta_0) = P_m. \quad (4.26)$$

V dalších úvahách zjednodušíme situaci tím, že budeme uvažovat stroj s hladkým rotorem. Rovnici (4.23) lze pro takový případ přepsat do tvaru

$$P_e(\delta_e) = \frac{E_q \cdot U_s}{X_1} \cdot \sin \delta_e. \quad (4.27)$$

Tato charakteristika je znázorněna na obr. 4.4. Maximální hodnotu dodávaného výkonu pro $\sin \delta_e = 1$ označme $P_{e,krit}$ a nazvěme ji kritickým výkonem (příslušný kritický úhel $\delta_{e,krit} = \pi/2$). Pokud bychom ovšem uvažovali kompletní rovnici (4.23), kritické hodnoty by se určovaly poněkud složitěji.



Obr. 4.4: K vysvětlení maximálního dodávaného výkonu a kritického úhlu

Poněvadž mechanický výkon turbíny P_m je závislý výlučně na množství a parametrech proudícího média a nikoli na úhlu δ_e , lze jej zakreslit do grafu vodorovnou čarou. Průsečíky této čáry s křivkou P_e (na obrázku sinusovkou) udávají rovnovážné body generátoru. Přitom mohou nastat tři případy:

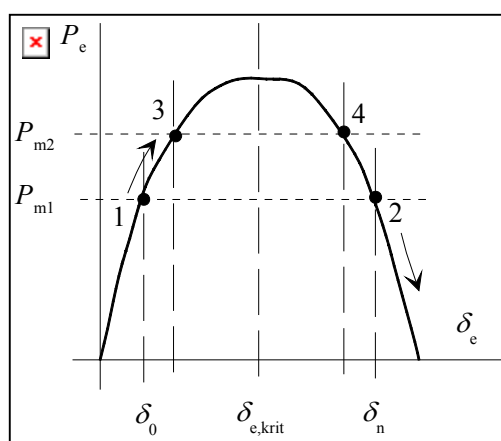
- $P_m > P_{e,krit}$ – neexistuje žádný rovnovážný bod a generátor za této podmínky nemůže pracovat,
- $P_m = P_{e,krit}$ – existuje pouze jeden rovnovážný bod v místě kritického úhlu $\delta_{e,krit}$,
- $P_m < P_{e,krit}$ – existují dva rovnovážné body, což odpovídá dvěma rovnovážným bodům (běžný provozní stav) δ_0 a δ_n , jež budou diskutovány v dalším textu.

4.4. Statická stabilita

O systému se říká, že je staticky stabilní v určitém provozním režimu tehdy, jestliže se po malé poruše dostane do stavu, který je buď identický s předporuchovým režimem, nebo je jenom o málo odlišný. Malou poruchou zpravidla rozumíme poruchu, pro niž se dají rovnice popisující dynamiku systému bez větší chyby linearizovat.

Dynamika generátoru a jeho stabilita jsou obecně ovlivňovány automatickým řízením generátoru a turbíny. V dalším textu se budeme zabývat nejprve dynamikou neregulovaného systému (mechanický výkon a budicí napětí během poruchy se nemění).

Uvažujme nejprve případ synchronizace. Během synchronizace by se měl rotor připojovaného alternátoru otáčet synchronní rychlostí a jeho svorkové napětí co do hodnoty i fáze by mělo odpovídat napětí soustavy. V okamžiku synchronizace je statická rovnováha nastavena při úhlu $\delta_e = 0$ a $P_m = 0$. Odpovídá tak počátečnímu bodu křivky na obr. 4.4. Pokud se nyní po malých hodnotách zvyšuje dodávaný mechanický výkon, musí se odpovídajícím způsobem zvyšovat i dodávaný elektrický výkon P_e , aby byla trvale zachována rovnováha $P_m = P_e$. Statické stability je tedy dosaženo vždy, když jakákoli změna mechanického výkonu vede k adekvátní změně výkonu elektrického. V případě, že reakce systému je opačná (nárůst mechanického výkonu vede k poklesu výkonu elektrického), je příslušný bod nestabilní a rovnováhy zde nemůže být dosaženo. Situace je vysvětlena na obr. 4.5.



Obr. 4.5: K posouzení stabilních a nestabilních bodů

Předpokládejme, že stroj pracuje v rovnovážném stavu 1 (při dodávaném mechanickém výkonu P_{m1}) a tento výkon se zvýší na hodnotu P_{m2} . Nadbytek mechanického výkonu urychlí rotor, zvětší úhel δ_e a tedy i elektrický výkon. Stroj se tak dostane do nového rovnovážného stavu 3. Pokud by stroj pracoval v bodě 2, zvýšení mechanického výkonu opět povede k urychlení rotoru a zvýšení zátěžného úhlu δ_e . Poněvadž se tento úhel nyní ale pohybuje v intervalu $\langle \pi/2, \pi \rangle$, elektrický výkon začne klesat podle šipky. Bod 2 je tedy nestabilní. Ke stejným závěrům bychom dospěli, kdyby došlo k poklesu mechanického výkonu.

Z uvedené diskuse plyne, že generátor pracuje ve vyšetřovaném případě ve stabilním stavu jen tehdy, leží-li pracovní bod na té části křivky $P_e(\delta)$, která má kladnou směrnici, tedy

$$\frac{\partial P_e}{\partial \delta_e} = K > 0. \quad (4.28)$$

Veličina K se nazývá součinitel synchronizačního výkonu. Přesáhne-li mechanický výkon P_m hodnotu $P_{e,krit}$, vypadne generátor ze synchronismu se soustavou.

Na závěr je třeba připomenout, že předchozí úvahy se týkaly pouze pomalých změn. Ve skutečnosti se soustava chová dynamicky a i tehdy, nepřekročí-li P_m kritickou hodnotu $P_{e,krit}$, může se během přechodného děje překročit kritický úhel a stroj vypadne ze synchronismu.

4.5. Přebodná charakteristika výkon-úhel

Předpoklad, že budící napětí zůstává konstantní, silně zjednodušuje celý pohled na elektromechanický přechodný děj. V budicím vinutí se totiž během tohoto děje indukují i další proudy, které toto napětí ovlivňují. Rotorové proudy ovšem zanikají s tím, jak magnetický tok začne pronikat do tělesa rotoru. Kmitočet rotorových oscilací je asi 1–2 Hz a tyto oscilace trvají půl vteřiny až jednu vteřinu. Uvažme dále, že časové konstanty T_{d0}'' a T_{q0}'' dosahují setin vteřiny zatímco konstanta T_{d0}' několika vteřin a T_{q0}' zhruba vteřiny. Ve světle těchto časových měřítek lze předpokládat, že napětí E_d' a E_q' jsou během elektromechanického přechodného děje konstantní.

Předpokládejme, že generátor je připojen k soustavě neomezeného výkonu a všechny rezistance mezi generátorem a soustavou jsou zanedbatelné. Celkovou reaktanci od generátoru až do soustavy označíme symbolem X_s . Označme pak

$$X_1 = X_d' + X_s, \quad X_2 = X_q' + X_s. \quad (4.29)$$

Napětíové rovnice v osách d a q nyní můžeme zapsat jako

$$E_d' = U_{sd} + X_2 \cdot I_q, \quad E_q' = U_{sq} - X_1 \cdot I_d, \quad U_{sd} = -U_s \cdot \sin \delta_e, \quad U_{sq} = U_s \cdot \cos \delta_e \quad (4.30)$$

a elektrický výkon přenášený přes vzduchovou mezeru do soustavy má velikost (odvozeno již dříve)

$$P_e = U_{sd} \cdot I_d + U_{sq} \cdot I_q. \quad (4.31)$$

Po dosazení z (4.30) konečně obdržíme

$$P_e = \frac{E_q' \cdot U_s}{X_1} \cdot \sin \delta_e + \frac{E_d' \cdot U_s}{X_2} \cdot \cos \delta_e - \frac{U_s^2}{2} \cdot \frac{X_2 - X_1}{X_1 \cdot X_2} \cdot \sin 2\delta_e. \quad (4.32)$$

Tato rovnice platí jak pro stroj s hladkým rotorem, tak i s rotorem s vyniklými póly. Ještě lze zavést relace

$$E_d' = -E' \cdot \sin \alpha, \quad E_q' = E' \cdot \cos \alpha, \quad (4.33)$$

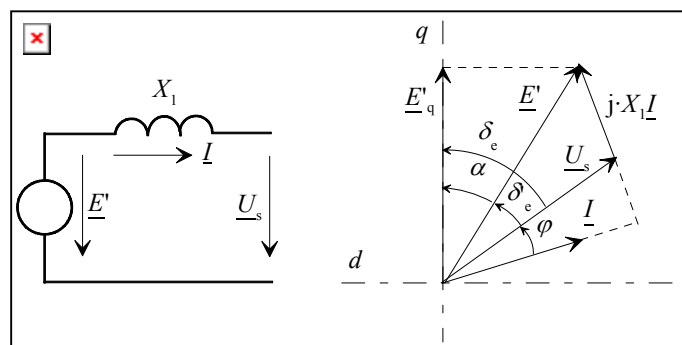
kde α je úhel mezi fázorem napětí \underline{E}' a osou q a položit $\delta_e = \delta_e + \alpha$, kde δ_e je úhel mezi napětím \underline{E}' a \underline{E} . Během přechodného jevu je, jak již bylo řečeno, napětí \underline{E}' a také úhel α konstantní, takže po určitých úpravách lze výkon P_e z rovnice (4.32) vyjádřit jako funkci úhlu δ_e .

Zkoumáme-li v tomto ohledu s generátor s rotorem s vyniklými laminovanými póly, kde v ose q neexistuje tlumič a proto $X_q' = X_q$, musí E_q' ležet v ose q , takže $\alpha = 0$ a $\delta_e = \delta_e$. Tím se výsledné vztahy dále výrazně zjednoduší.

Dalšího zjednodušení se docílí tehdy, zanedbáme-li rozdíl mezi X_d' a X_q' . Pak obdržíme velmi jednoduchý vztah

$$P_e = \frac{E' \cdot U_s}{X_1} \cdot \sin \delta_e'. \quad (4.34)$$

Tomu odpovídá náhradní schéma a fázorový diagram na obr. 4.6.



Obr. 4.6: Klasický model generátoru v přechodném stavu (náhradní schéma a fázorový diagram)

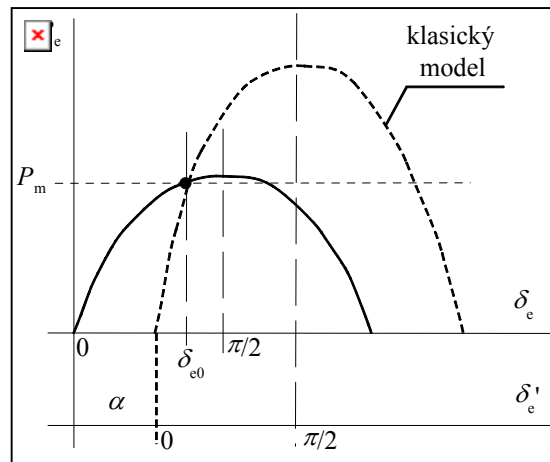
Nyní již lze psát

$$\delta_e = \delta'_e + \alpha, \quad \frac{d\delta_e}{dt} = \frac{d\delta'_e}{dt}, \quad \frac{d^2\delta_e}{dt^2} = \frac{d^2\delta'_e}{dt^2} \quad (4.35)$$

a rovnici (4.24) nyní můžeme přepsat do tvaru

$$\frac{T_m \cdot S_n}{\omega_{es}} \cdot \frac{d^2\delta'_e}{dt^2} + B_e \cdot \frac{d\delta'_e}{dt} + \frac{E' \cdot U_s}{X_1} \cdot \sin\delta'_e = P_m. \quad (4.36)$$

Nyní je třeba zahrnout dynamickou charakteristiku do grafu výkon-úhel. V daném rovnovážném bodě musí být dodržena rovnováha $P_e = P_m$, ať se jedná o statickou či dynamickou charakteristiku. Obecně je úhel α mezi δ_0 a δ'_0 nenulový a přechodná charakteristika je proto posunuta doprava. Pro stroje s vyniklými póly je úhel α nulový, obě charakteristiky začínají ve stejném bodě a jejich průsečík v rovnovážném bodě vzniká díky zkreslení přechodné charakteristiky. Situace je znázorněna na obr. 4.7.



Obr. 4.7: Ustálená a přechodná charakteristika stroje s hladkým rotorem

4.6. Kývání rotoru a kritérium rovných ploch

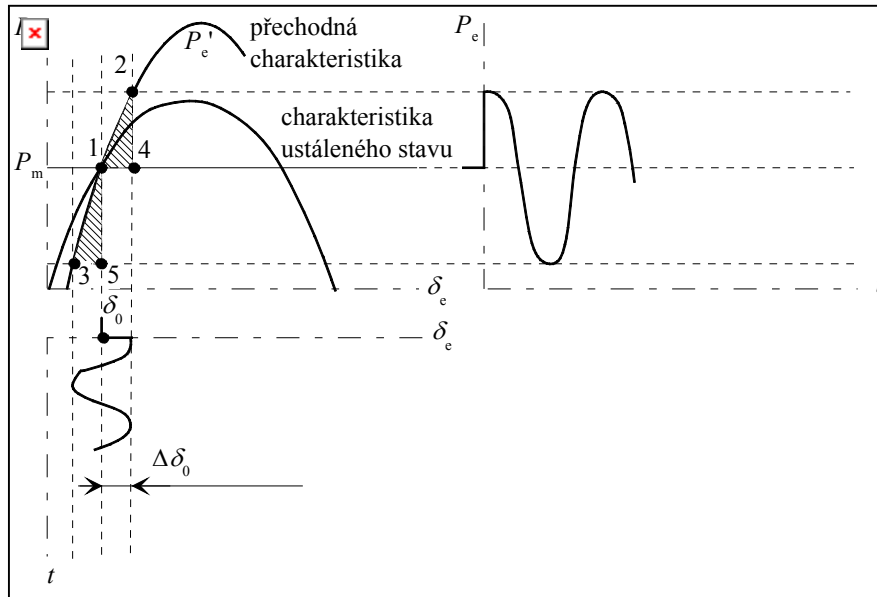
Modelů generátorů, které byly navrženy v předchozí kapitole, lze nyní využít k analýze dynamiky rotoru za předpokladu, že je generátor vystaven náhlé změně. Taková změna se vždy projeví ve vzniku dodatečných proudů v rotorových vinutích, aby se zachovalo konstantní tokové spřažení a tudíž konstantní napětí E' za přechodnou reaktanci. Poněvadž synchronní indukovaná napětí E_d a E_q se odvozují od proudů v budicím vinutí (a případně v tělese rotoru), nelze je pokládat za konstantní a jakékoli kývání rotoru je proto nutno odvozovat od charakteristiky $P_e(\delta_e)$.

K poruše v soustavě neomezeného výkonu může dojít například při náhlé změně mechanického výkonu dodávaného turbínou nebo při změně ekvivalentní reaktance sítě. Na samotné příčině poruchy však příliš nezáleží. Stačí uvažovat ten důsledek, že se rotorový úhel δ_e prakticky okamžitě změní z rovnovážné hodnoty δ_0 na $\delta_0 + \Delta\delta_0$. To nám umožní zavést řadu důležitých pojmů, jejichž prostřednictvím pak lze nahlížet na různé praktické typy poruch. Diferenciální rovnice popisující poruchu mají nyní tyto počáteční podmínky:

$$\Delta\delta_e(t=0^+) = \Delta\delta_0 \neq 0, \quad \Delta\omega(t=0^+) = \Delta\omega_0 = 0. \quad (4.37)$$

Reakce na poruchu je naznačena na obr. 4.8, jenž obsahuje ustálenou i přechodnou charakteristiku jakožto funkci rotorového úhlu δ_e . Poněvadž žádná porucha nemůže změnit tokové spřažení v rotoru, počáteční provozní stav generátoru po poruše se nachází v průsečíku čáry poporuchového mechanického výkonu a přechodné charakteristiky výkon-úhel (tato charakte-

ristika rovněž prochází bodem 1 předporuchového stavu).



Obr. 4.8: Časový průběh poruchy bez uvažování tlumení

Aby vůbec mohlo dojít ke změně rotorového úhlu δ_0 o hodnotu $\Delta\delta_0$ (a tedy abychom se dostali z bodu 1 do bodu 2), musí se vykonat určitá práce. Tato práce se určí integrací točivého momentu přes úhel $\Delta\delta_0$. V našem případě je tento moment dán rozdílem mechanického momentu a elektrického momentu. Vzhledem k tomu, že výkon je dán součinem výkonu a úhlové rychlosti (kterou však můžeme pokládat prakticky za synchronní), je tato práce úměrná integrálu výkonu přes úhel $\Delta\delta_0$, takže

$$W_{1-2} \approx \int_{\delta_0}^{\delta_0 + \Delta\delta_0} [P_e'(\delta_e) - P_m] \cdot d\delta_e, \quad (4.38)$$

což je vlastně obsah vyšrafované plochy 1-2-4-1. Protože rychlost rotoru v bodech 1 a 2 pokládáme za stejnou ($\Delta\omega = 0$), je i kinetická energie rotoru v těchto bodech stejná. To ale znamená, že vložená práce W_{1-2} zvýší potenciální energii systému (vzhledem k bodu 1), která se snaží vrátit rotor zpět do polohy 1. V bodě 2 je mechanický moment (a tedy i výkon) nižší než elektrický a rotor začne zpomalovat, čímž se zmenšuje i rotorový úhel. Příslušný pokles rychlosti $\Delta\omega$ se určí ze vztahu

$$\Delta E_k = \frac{1}{2} \cdot J \Delta\omega^2 = W_{1-2}. \quad (4.39)$$

Kinetická energie se však zmenšuje až do bodu 3, kde již převažuje mechanický moment a výkon nad elektrickým. Zde se pokles rychlosti zastaví a rotor se začne znovu urychlovat. Aby byla zachována energetická bilance, musí pro bod 3 platit, že plocha 1-3-5-1 je rovna ploše 1-2-4-1.

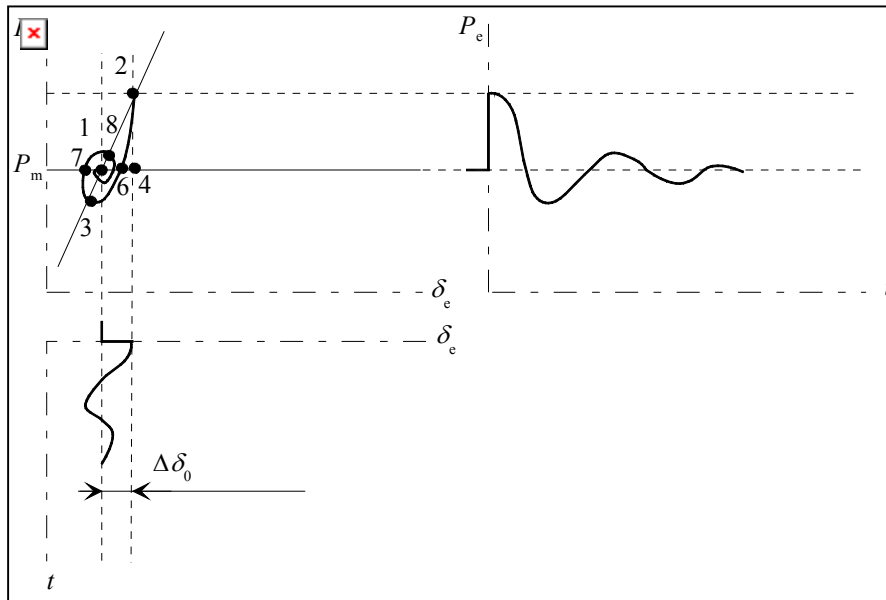
Pokud by nyní neexistovalo tlumení, bude časový vývoj elektrického výkonu i rotorového úhlu periodický.

Vliv tlumících vinutí

Již dříve bylo odvozeno, že pro malé odchylky rotorové rychlosti produkují tlumicí vinutí tlumicí výkon $P_D = B \cdot \Delta\omega$. Přepíšme nyní rovnici kývání (4.36) do tvaru

$$M \cdot \frac{d^2\delta_e}{dt^2} = P_m - [P_e(\delta_e) + P_D(\delta_e)]. \quad (4.40)$$

Z takto přepsané rovnice je zřejmé, že tlumicí výkon se přičítá nebo odečítá k elektrickému výkonu v závislosti na znaménku $\Delta\omega$. Pokud je toto znaménko záporné, celkový výkon v hranaté závorce se snižuje a naopak. To znamená, že fiktivní charakteristika $P_e + P_D$ se posunuje proti P_e dolů nebo nahoru. Rotor se bude proto pohybovat podél modifikované trajektorie naznačené na obr. 4.9.



Obr. 4.9: Dynamická charakteristika s vlivem tlumení rotoru

Podobně, jako tomu bylo v předchozím případě, úhel rotoru se skokově změní z bodu 1 do bodu 2. V bodě 2 je mechanický výkon a moment menší než elektrický a zpožďující moment bude rotor zpomalovat zpět do rovnovážného bodu 1. Zde klesá rychlost a tlumicí výkon je tedy záporný. Rotor se proto pohybuje po křivce 2-6, přičemž se vykoná práce úměrná ploše 2-4-6-2. Tato plocha je menší než plocha 1-2-4-1 (kdyby nebylo tlumení). Rotor se dále zpomaluje až do bodu 3, kde převažující mechanický moment začne rotor zase urychlovat. To je podporováno nyní kladným tlumicím členem. Rotor se do rovnováhy dostane v bodě 7, přičemž se musí přibližně rovnat plochy 2-4-6-2 a 6-3-7-6. Této rovnováhy se dosáhne dříve, než v případě bez tlumení. Poté se ještě dále urychluje až do bodu 8 a po několika dalších cyklech dospěje do rovnovážného bodu 1.

Vysvětlení není zcela rigorózní (např. uvedená plocha 6-3-7-6 by měla být ve skutečnosti nahrazena plochou ohraničenou tečnou vedenou bodem nejmenšího úhlu δ_e), avšak pro názornou představu je postačující.