

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

KATEDRA ELEKTROENERGETIKY A EKOLOGIE

DIPLOMOVÁ PRÁCE

**Simulace stability spolupráce osamoceného alternátoru
pracujícího do přenosové soustavy**

Anotace

Předkládaná diplomová práce je zaměřena na modelování a simulaci matematického modelu synchronního stroje v souřadnicích d,q. Zabývá se identifikací parametrů tohoto stroje, sestavením náhradního schéma a především vytvořením modelu lineární transformace do fázových hodnot a,b,c. Veškeré modely jsou vytvořeny v simulačním nástroji Dynast.

Klíčová slova

Dynast, synchronní stroj, matematické modelování, Parkova transformace

Abstract

This thesis is focused on mathematical modeling and simulation of synchronous machine model in coordinates d, q. It deals with the identification of parameters of the machine, setting up a replacement scheme, and particularly by creating a model of a linear transformation in phase a, b, c . All models are created in the simulation tool Dynast.

Key words

Dynast, synchronous machine, mathematical modeling, Park transformation

Prohlášení

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě diplomovou práci, zpracovanou na závěr studia na Fakultě elektrotechnické Západočeské univerzity v Plzni.

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této diplomové práce.

Dále prohlašuji, že veškerý software, použitý při řešení této diplomové práce, je legální.

V Plzni dne 11.5.2012

.....

Poděkování

Touto cestou bych rád poděkoval zejména svému vedoucímu práce Doc. Ing. Karlu Noháčovi Ph.D. za jeho vedení, rady, poskytnuté materiály a obecně velmi vřelý přístup. Dále bych rád poděkoval panu Ing. Jindřichu Valentovi CSc. a panu Ing. Janu Skřivánkovi za ochotu a poskytnuté materiály, a velký dík patří mému příteli Lukáši Kopáčkovi za pomoc a jiný úhel pohledu na danou problematiku.

Obsah:

OBSAH:	7
ÚVOD	8
SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK	9
1 MATEMATICKÝ MODEL SYNCHRONNÍHO STROJE	11
1.1. SOUŘADNÝ SYSTÉM.....	11
1.2. NAPĚŤOVÉ ROVNICE.....	13
1.2.1. <i>Soustava vztažných veličin</i>	14
1.2.2. <i>Náhradní schéma</i>	15
1.3. IDENTIFIKACE PARAMETRŮ.....	16
1.3.1. <i>Zkouška náhlým zkratem a zotaveným napětím</i>	17
1.3.2. <i>identifikace parametrů modelovaného stroje</i>	19
1.4. POHYBOVÉ ROVNICE STROJE	20
1.5. STABILITA STROJE.....	21
1.5.1. <i>Statická stabilita</i>	21
1.5.2. <i>Dynamická stabilita</i>	23
2 MODEL STROJE V PROGRAMU DYNAST	27
2.1. SIMULAČNÍ PROGRAM DYNAST	27
2.2. MODELOVÁNÍ JEDNOTLIVÝCH FUNKČNÍCH BLOKŮ	27
2.2.1. <i>Náhradní elektrické schéma</i>	28
2.2.2. <i>Zpětná lineární (Parkova) transformace</i>	28
2.2.3. <i>Mechanická část</i>	30
2.2.4. <i>Dílčí bloky vytvořené pro simulaci</i>	31
2.2.5. <i>Celkový model synchronního generátoru</i>	31
2.3. SIMULACE NA VYTVOŘENÉM MODELU	31
ZÁVĚR	35
SEZNAM POUŽITÉ A CITOVANÉ LITERATURY	36
PŘÍLOHY	

Úvod

Tato diplomová práce je zaměřena na modelování a simulování synchronního alternátoru v simulačním nástroji DYNAST. Pro práci a správný návrh synchronních alternátorů je výhodné znát průběhy veličin, které se nedají určit například měřením, kvůli fyzikálním omezením nebo kvůli nebezpečí úrazu. Pomocí modelování těchto strojů v různých provozních stavech je možné získat průběhy okamžitých veličin a správně pak dimenzovat a navrhovat části těchto strojů z různých hledisek. Modely vycházejí z obecného matematického odvození fyzikálních závislostí.

Matematický model stroje je v této diplomové práci popsán v souřadném systému $d, q, 0$. V práci jsou popsány různé způsoby modelování ohledně souřadných systémů používaných pro vyjádření proměnných veličin stroje. Jsou vyjádřeny napěťové rovnice stroje na jejichž základě je zhotoveno náhradní schéma stroje. Protože klíčová část práce je zaměřena na modelování zpětné Parkovy transformace jsou zde popsány matematické vztahy platné pro převod veličin ze souřadného systému $d, q, 0$ do souřadného systému a, b, c . V další části práce jsou určeny parametry stroje jejich obecné způsoby identifikace a následné stanovení konkrétních hodnot pro modelovaný stroj. V obecném vyjádření jsou v práci dále popsány pohybové rovnice stroje, pro výpočet změny otáček resp. úhlové rychlosti v závislosti na rozdílu momentů. Dále je v práci vysvětlen princip statické a dynamické stability. Na ilustračních závislostech jsou rozebrány možné způsoby chování stroje a jejich důsledky.

V druhé části této diplomové práce je velmi stručně popsán simulační nástroj DYNAST. Zejména seznámení s pojmy a zkratkami, používanými v této práci. Podle daného dělení jsou dále uvedeny modely a submodely, vytvořené pro simulaci alternátoru. Jsou popsány jejich schémata a vysvětleno jejich použití a funkce. Největší zaměření a testování je zaměřeno na blok zpětné Parkovy transformace. Obecný popis synchronního alternátoru je již známý, tato práce simuluje chod s převodem okamžitých hodnot z jednoho souřadného systému do druhého. Pro tuto diplomovou práci je to nejcitlivější místo modelu. Poslední částí je simulace vytvořeného modelu pracujícího do tvrdé sítě.

Výsledky simulace, průběhy veličin a zdrojové textové soubory jsou uvedeny v přílohách na konci práce. Všechny části v této práci zmíněné jsou přiloženy na CD, které je součástí této práce.

Seznam použitých zkratek

a, b, c	jednotlivé fáze 3f soustavy	
d	podélná osa rotoru	
f	frekvence	[Hz]
i	okamžitá hodnota elektrického proudu, poměrná hodnota	[-]
I_k	ustálený proud nakrátko	[A]
J	moment setrvačnosti	[kg/m ²]
L	vlastní indukčnost	[H]
l	vlastní indukčnost (poměrná hodnota)	[-]
l_{ad}	vzájemná indukčnost v podélné ose	[-]
l_{aq}	vzájemná indukčnost v příčné ose	[-]
l_D	vlastní indukčnost v podélné ose	[-]
$l_{d\sigma}$	rozptylová indukčnost statorového vinutí v podélné ose	[-]
$l_{D\sigma}$	rozptylová indukčnost tlumícího vinutí v podélné ose	[-]
l_F	vlastní indukčnost budícího vinutí	[-]
$l_{F\sigma}$	rozptylová indukčnost budícího vinutí	[-]
l_Q	vlastní indukčnost v příčné ose	[-]
$l_{Q\sigma}$	rozptylová indukčnost statorového vinutí v příčné ose	[-]
$l_{Q\sigma}$	rozptylová indukčnost tlumícího vinutí v příčné ose	[-]
P	činný výkon	[W]
q	příčná osa rotoru	
R	činný odpor	[Ω]
t	čas	[s]
$T_{d'}$	podélná přechodná časová konstanta při zkratu	[s]
$T_{d''}$	podélná rázová časová konstanta při zkratu	[s]
U_0	označení pro netočivou složkovou soustavu napětí	[V]
U_D	napětí vinutí tlumiče v podélné ose	[V]
U_F	napětí budícího vinutí	[V]
U_i	indukované napětí	[V]
U_Q	napětí vinutí tlumiče v příčné ose	[V]
$U_{\omega d}$	podélná složka rotačního napětí	[V]
$U_{\omega q}$	příčná složka rotačního napětí	[V]
X	reaktance	[-]
X_d	synchronní reaktance v podélné ose	[-]
$x_{d'}$	přechodová (transientní) reaktance v podélné ose	[-]

x_d''	rázová (subtransientní) reaktance v podélné ose	[-]
x_q	synchronní reaktance v příčné ose	[-]
x_q''	rázová (subtransientní) reaktance v příčné ose	[-]
$\Delta i'$	přechodová složka zkratového proudu (poměrná hodnota)	[-]
$\Delta i''$	rázová složka zkratového proudu (poměrná hodnota)	[-]
ϑ	úhel mezi podélnou osou a osou vinutí fáze A	[rad]
ψ	spřažený magnetický tok	[Wb]
ω	úhlová rychlost	[Rad/s]

1 Matematický model synchronního stroje

Při tvorbě matematického modelu synchronního stroje lze použít několik různých způsobů jeho popisu [2]. Rozdíly mezi těmito způsoby spočívají ve volbě :

1. Souřadného systému
2. Systému poměrných veličin
3. Použitých koeficientů v transformační matici lineární transformace, je-li použita

1.1. SOUŘADNÝ SYSTÉM

Souřadný systém matematického modelu je volen s ohledem na to, jaké požadavky jsou kladeny na výsledné hodnoty, přesnosti, možnosti výpočtů a náročnost výpočtu.

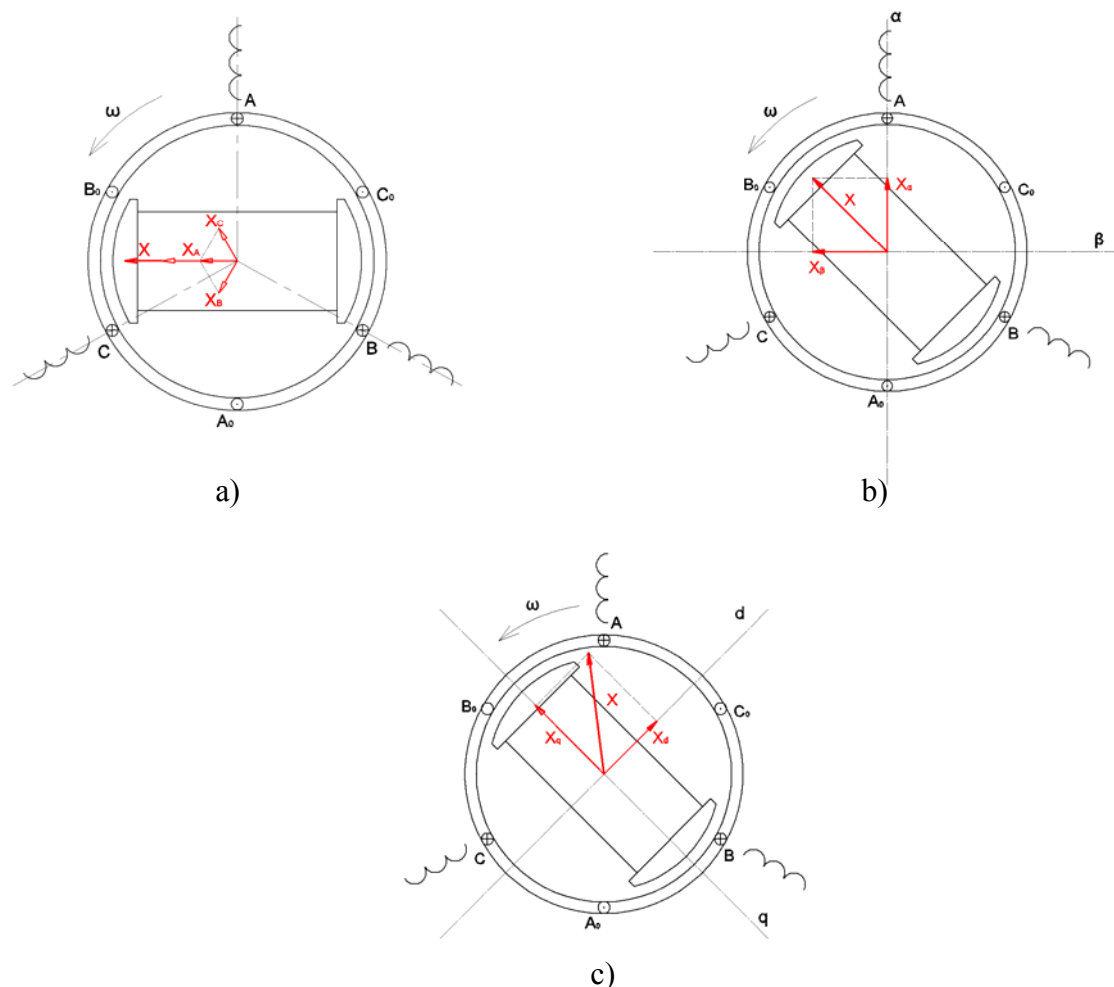
Model může být popsán jednak ve fázových souřadnicích (a, b, c), kde jsou fázory jednotlivých fází navzájem pootočené o 120° . Přičemž pohybující se rotor má vinutí rozložená do příčné a podélné osy. Všechny vzájemné indukčnosti mezi vinutími stroje, (statorové mezi sebou, nebo statorové s rotorovými) se mění v závislosti na úhlu natočení rotoru z maximální na minimální hodnotu indukčnosti. Přejídné jevy jsou v tomto případě popsány diferenciálními rovnicemi s periodicky proměnnými koeficienty.

Z důvodu odstranění časově proměnných vzájemných indukčností se převádí statorové veličiny synchronního stroje z fázových hodnot do nového, dvouosého souřadného systému. Z teorie elektrických strojů je zřejmé, že velikost výsledného magnetického toku vybuzeného třemi cívkami vzájemně pootočenými o 120° buzenými trojfázovým proudem se s časem nemění, ale fázor tohoto toku rotuje úhlovou rychlostí ω . Tento výsledný magnetický tok je při vyjádření do dvouosého souřadného systému rozložen do dvou na sebe kolmých os. Tyto osy mohou být ještě rozděleny podle toho, zda jsou souřadnice pevně spojeny s osami statorových vinutí. Pak se hovoří o souřadnicích $\alpha, \beta, 0$, nebo jsou rozloženy do příčné osy d a podélné osy q rotoru, zde se jedná o souřadný systém $d, q, 0$.

Dvouosý souřadný systém je vhodný k popisu dynamických jevů na synchronních strojích, neboť dobře popisuje fyzikální vlastnosti stroje, je matematicky jednodušší a přehledný.

Tato práce popisuje synchronní stroj v souřadnicích $d, q, 0$.

Na obr.1 jsou schematicky znázorněny různé souřadné systémy, přičemž cívky každé fáze jsou pootočené o 120° a jednotlivá statorová vinutí jsou popsána začátkem a koncem vinutí (A-A₀). Fázory X představují výslednou veličinu. Může se jednat jak o proud tak o magnetický tok.



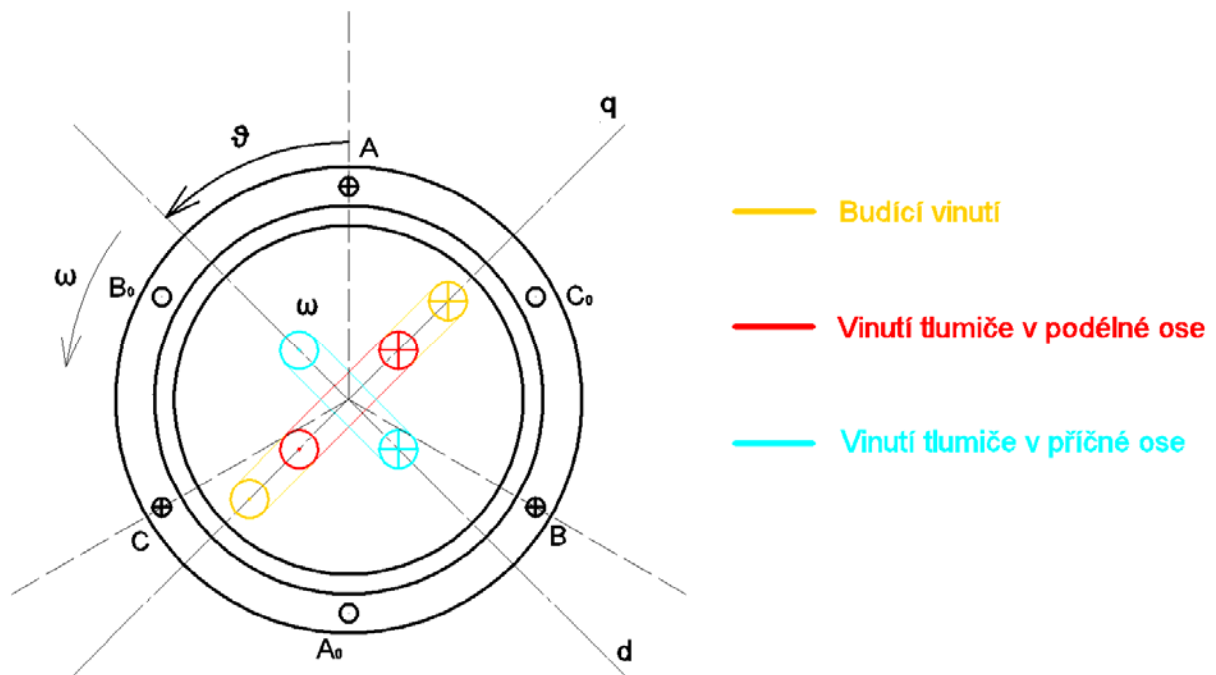
Obr. 1 Souřadné systémy synchr. stroje s vyjádřenými póly **a**) ve fázových souřadnicích (a, b, c) **b**) pevně spojené se státorem ($\alpha, \beta, 0$) **c**) pevně spojené s rotorem ($d, q, 0$)

Při modelování a výpočtech přechodných dějů na synchronních strojích jsou uvažovány zjednodušující předpoklady.

- Všechny tlumicí obvody rotoru jsou narazeny jedním tlumícím obvodem v podélné ose, a jedním obvodem v příčné ose.
- Rozložení magneto-motorického napětí ve vzduchové mezeře je sinusové.
- Statorové vinutí je symetrické a je zanedbán vliv drážkování.

Značení jednotlivých částí stroje je provedeno tak, že:

- Indexy všech statorových veličin jsou značeny malými písmeny.(a,b,c,d,q,...)
- Indexy všech rotorových veličin jsou značeny velkými písmeny.(A,B,C,D,Q,...)
- Indexy u veličin budícího vinutí jsou značeny písmenem F.



Obr. 2 Vyznačení rotorových vinutí u stroje s hladkým rotorem

1.2. NAPĚŤOVÉ ROVNICE

Pro indukované napětí ve stroji, při uvažování správných smyslů proudů a mg. toků (generatorický systém) platí rovnice

$$u_i = \frac{d\psi}{dt} \quad (1)$$

Pro každé vinutí stroje, každou uzavřenou smyčku, je možné vyjádřit napětí ve tvaru

$$U_x = -R_x i_x - \frac{d\Psi_x}{dt} \quad (2)$$

Při matematickém popisu synchronního stroje se vychází z popisu ve fázových souřadnicích. Po zadání předpokladů jsou vyjádřeny vztahy mezi jednotlivými vinutími. Použitím vzájemných indukčností jsou definovány spřažené magnetické toky ψ a podle rovnice (2) sestaveny rovnice pro jednotlivá vinutí.

$$\begin{aligned} U_A &= -R_A i_A - \frac{d\Psi_A}{dt} & U_F &= R_F i_F + \frac{d\Psi_F}{dt} \\ U_B &= -R_B i_B - \frac{d\Psi_B}{dt} & 0 &= R_D i_D + \frac{d\Psi_D}{dt} \\ U_C &= -R_C i_C - \frac{d\Psi_C}{dt} & 0 &= R_Q i_Q + \frac{d\Psi_Q}{dt} \end{aligned} \quad (3)$$

Vyjádření fázoru napětí statorových vinutí z fázových souřadnic do souřadného systému d, q, θ se provádí pomocí lineární Parkovy transformace. Souřadnice fází a, b, c , jsou rozloženy

do dvou os pevně spojených s rotorem a otáčející se úhlovou rychlostí ω . Rovnice plynoucí z Parkovy transformace, musí být pro vyjádření v d, q, θ doplněny o členy $\omega\psi_d$ a $\omega\psi_q$, aby byla splněna podmínka invariantnosti výkonů mezi oběmi vyjádřeními. Tyto členy představují rotační indukované napětí.

Parkova transformace je matematicky popsána v lit. [6]. Zpětná transformace je vyjádřena pomocí soustavy rovnic:

$$\begin{aligned} u_a &= u_d \cdot \cos \vartheta - u_q \cdot \sin \vartheta + u_0 \\ u_b &= u_d \cdot \cos(\vartheta - \frac{2\pi}{3}) - u_q \cdot \sin(\vartheta - \frac{2\pi}{3}) + u_0 \\ u_c &= u_d \cdot \cos(\vartheta + \frac{2\pi}{3}) - u_q \cdot \sin(\vartheta + \frac{2\pi}{3}) + u_0 \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} u_d &= \frac{2}{3} \cdot \left[u_a \cdot \cos \vartheta - u_b \cdot \cos(\vartheta - \frac{2\pi}{3}) + u_c \cdot \cos(\vartheta + \frac{2\pi}{3}) \right] \\ u_q &= -\frac{2}{3} \cdot \left[u_a \cdot \sin \vartheta - u_b \cdot \sin(\vartheta - \frac{2\pi}{3}) + u_c \cdot \sin(\vartheta + \frac{2\pi}{3}) \right] \\ u_0 &= \frac{1}{3} \cdot (u_a + u_b + u_c) \end{aligned} \quad (5)$$

Podle odvození v literatuře [1] jsou poté výsledné matematické rovnice, vyjádřené v souřadnicích d, q, θ .

$$\begin{aligned} U_d &= -R_d i_d - \frac{d\Psi_d}{dt} - \omega\Psi_q & U_F &= R_F i_F + \frac{d\Psi_F}{dt} \\ U_q &= -R_q i_q - \frac{d\Psi_q}{dt} + \omega\Psi_d & 0 &= R_D i_D + \frac{d\Psi_D}{dt} \\ U_0 &= -R_0 i_0 - \frac{d\Psi_0}{dt} & 0 &= R_Q i_Q + \frac{d\Psi_Q}{dt} \end{aligned} \quad (6)$$

kde jednotlivé spřažené magnetické toky jsou

$$\begin{aligned} \Psi_d &= L_d \cdot i_d + L_{dF} \cdot i_F + L_{dD} \cdot i_D \\ \Psi_q &= L_q \cdot i_q + L_{qQ} \cdot i_Q \\ \Psi_F &= L_F \cdot i_F + L_{dF} \cdot i_d + L_{FD} \cdot i_D \\ \Psi_D &= L_D \cdot i_D + L_{dF} \cdot i_d + L_{dD} \cdot i_d \\ \Psi_Q &= L_Q \cdot i_Q + L_{qQ} \cdot i_q \end{aligned} \quad (7)$$

1.2.1. Soustava vztažných veličin

Pro poměrné vyjádření hodnot je nutné určit soustavu vztažných veličin. V této práci je použita tzv. vzájemná soustava vztažných hodnot. Její výhoda spočívá v tom, že při jejím

použití vycházejí všechny vzájemné indukčnosti v příčné ose stejné. Zároveň jsou stejné i všechny vzájemné indukčnosti v ose podélné.

V těchto poměrných hodnotách je potom možné zapsat vlastní indukčnost každého vinutí jako součet rozptylové indukčnosti vinutí ($l_{x\sigma}$) a vzájemné indukčnosti, která je u všech vinutí v příslušné ose stejná (l_{ad} , resp l_{aq}).

$$\begin{aligned} l_d &= l_{d\sigma} + l_{ad} & l_F &= l_{F\sigma} + l_{ad} \\ l_q &= l_{q\sigma} + l_{aq} & l_D &= l_{D\sigma} + l_{ad} \\ & & l_Q &= l_{Q\sigma} + l_{aq} \end{aligned} \quad (8)$$

Pro vztažené hodnoty indukčností lze zapsat i rovnice pro spřažené mg. toky

$$\begin{aligned} \psi_d &= l_d \cdot i_d + l_{ad} \cdot i_F + l_{ad} \cdot i_D & \psi_f &= l_F \cdot i_F + l_{ad} \cdot i_d + l_{ad} \cdot i_D \\ \psi_q &= l_{aq} \cdot i_q + l_{aq} \cdot i_Q & \psi_D &= l_D \cdot i_D + l_{ad} \cdot i_D + l_{ad} \cdot i_d \\ & & \psi_Q &= l_Q \cdot i_Q + l_{aq} \cdot i_q \end{aligned} \quad (9)$$

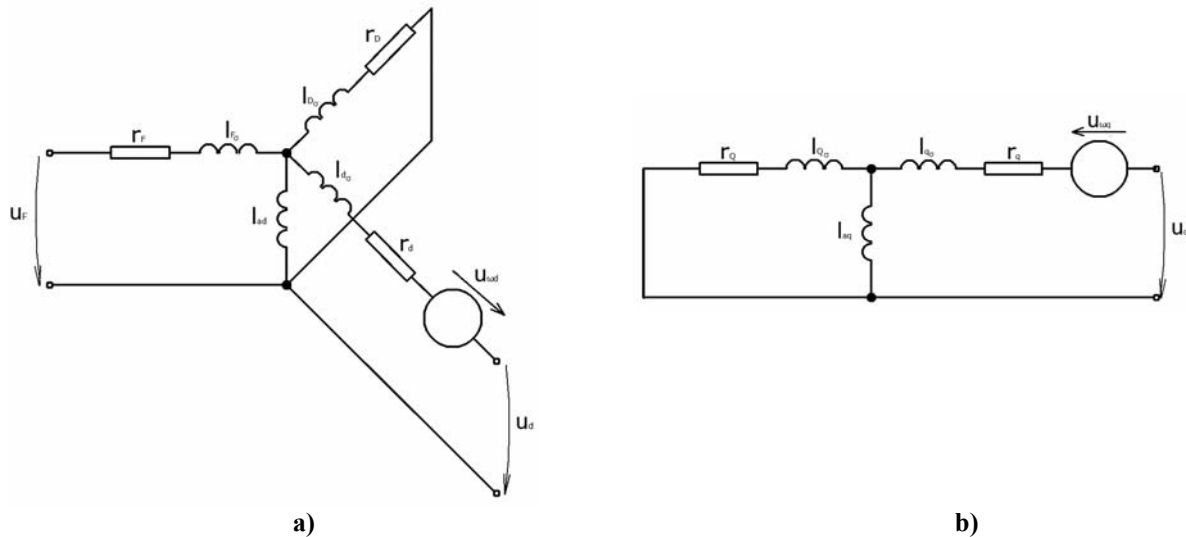
Z odvození a výsledného tvaru rovnic lit.[1], ve vztaženém tvaru vlastních indukčností je zřejmé, že netočivá složka závisí pouze na proudu i_0 . Napěťová rovnice pro u_0 se tak může řešit samostatně, mimo řešení soustavy rovnic (6).

$$\begin{aligned} u_0 &= -r_0 \cdot i_0 - \frac{d\psi_0}{dt} \\ u_0 &= -r_0 \cdot i_0 - l_0 \frac{di_0}{dt} \end{aligned} \quad (10)$$

1.2.2. Náhradní schéma

Pro každou napěťovou rovnici ze soustavy rovnic (6) lze sestavit náhradní elektrický obvod. Díky soustavě vztažných hodnot jsou v každé ose vzájemné indukčnosti stejné (l_{ad} , resp. l_{aq}). Rovnice je tudíž možné upravit, do výsledných tvarů (11). Na základě takto upravených rovnic je vytvořeno schéma pro příčnou a podélnou osu, v nichž je vzájemná indukčnost společná pro všechny obvody dané osy.

$$\begin{aligned} u_d &= -r_d \cdot i_d - l_{d\sigma} \cdot i_d - l_{ad} \cdot \frac{d(i_d + i_F + i_D)}{dt} - \omega(l_{q\sigma} \cdot i_q + l_{aq} \cdot (i_q + i_Q)) \\ u_q &= -r_q \cdot i_q - l_{q\sigma} \cdot i_q - l_{aq} \cdot \frac{d(i_q + i_Q)}{dt} - \omega[l_{d\sigma} \cdot i_d + l_{ad} \cdot (i_d + i_F + i_D)] \\ u_F &= r_F i_F + l_{F\sigma} \cdot i_F + l_{ad} \cdot \frac{d(i_d + i_F + i_D)}{dt} \\ 0 &= r_D i_D + l_{D\sigma} \cdot i_D + l_{ad} \cdot \frac{d(i_d + i_F + i_D)}{dt} \\ 0 &= r_Q i_Q + l_{Q\sigma} \cdot i_Q + l_{aq} \cdot \frac{d(i_q + i_Q)}{dt} \end{aligned} \quad (11)$$



Obr. 3 Náhradní schéma a) podélná osa; b) příčná osa

1.3. IDENTIFIKACE PARAMETRŮ

Identifikace parametrů tvoří podstatnou část při modelování elektrických strojů. Přesné určování umožňuje stanovit reálné velikosti proudů při přechodných dějích, vhodnou volbu ochranných prvků, správné dimenzování vinutí na dynamické účinky zejména zkratových proudů, a návrh dalších částí stroje, které jsou při přechodových dějích at' elektricky nebo mechanicky více namáhané. Zanedbáním nevýznamných hodnot a různými matematickými zjednodušeními při určování parametrů mohou vzniknout značné rozdíly od hodnot skutečných strojů.

Při ustáleném chodu platí $di/dt=0$. Impedance stroje je dána činným odporem, rozptylovou reaktancí statorového vinutí a reaktancí hlavní (synchronní reaktance $x_d=x_{d\sigma}+x_{ad}$). Při změně zátěže, nebo obecně přechodném ději, dochází ke změně odebíraného proudu, což má za následek změnu mg. toků vinutí stroje a následný vznik indukovaných napětí, jejichž smysl určuje Lenzovo pravidlo.

Vzhledem k rozdílným velikostem reaktancí uvažovaných vinutí ve stroji, je možné rozdělit průběh přechodového děje do tří časových úseků. V každém z těchto úseků je uvažována jiná celková reaktance stroje, podle toho, která z vinutí stroje jsou do děje zahrnuta, resp. kterými se uzavírá mg. tok, a ve kterých již doznělo působení indukovaných napětí v důsledku časové změny mg. toku. Tyto reaktance se nazývají:

- synchronní reaktance x_d
- přechodová (transientní) reaktance x_d'
- rázová (subtransientní) reaktance x_d''

Pro popis synchronního stroje je nutné určit hodnoty reaktancí k vytvoření náhradního schéma. Tyto hodnoty musí být vyjádřeny z hodnot, které je možné určit z měření na stroji, nebo výpočtem.

veličina	název	určení	
		výpočtem	měřením
$X_{d\sigma}$ $X_{q\sigma}$	rozptylová reaktance statorového vinutí	údaj výrobce	-
X_d X_q	Synchronní reaktance		skluzová metoda
r_d r_q	činný odpor statorového vinutí		ohmova metoda
r_F	činný odpor budícího vinutí		ohmova metoda
J	moment setrvačnosti		doběhová zkouška
X_d'	přechodová (transientní) reaktance		zkouška náhlým zkratem zkouška zotaveným napětím
X_d'' X_q''	rázová (subtransientní) reaktance		
T_d'	přechodová časová konstanta		
T_d'' T_q''	Rázová časová konstanta		

tab. 1 parametry stroje určené měřením, dané výrobcem

1.3.1. Zkouška náhlým zkratem a zotaveným napětím

Vychází z normy ČSNEN 60034-4. Tyto zkoušky mají za úkol stanovit maximální hodnoty zkratových proudů jednotlivých fází stroje. Každá z nich dává jiné výsledky z důvodu různého nasycení magnetického obvodu.

Zkouška náhlým zkratem je popsána v lit. [7]. Na základě naměřených obálek zkratových proudů, po stanovení periodické a aperiodické složky, a po odečtení známého ustáleného zkratového proudu, lze vynést závislost $(\Delta i' + \Delta i'') = f(t)$. Přičemž čas t je v [s] a proud je vynesena v log. měřítku. Tak přejdou exponenciální průběhy v průběhy lineární jejichž extrapolací do $t=0$ lze určit maximální hodnoty. Časové konstanty T_d' , T_d'' , T_q'' , značí časy, kdy příslušné složky zkratového proudu klesnou na hodnotu $1/e$ své počáteční hodnoty.

Jednotlivé reaktance jsou potom:

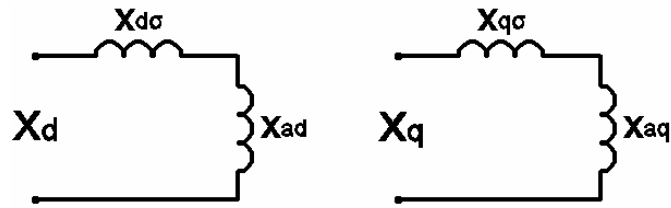
$$X_d = \frac{U \cdot \sqrt{2}}{\sqrt{3} \cdot I_K} \tag{12}$$

$$X_d' = \frac{U \cdot \sqrt{2}}{\sqrt{3} \cdot (I_K + \Delta i'_{(0)})} \tag{13}$$

$$X_d'' = \frac{U \cdot \sqrt{2}}{\sqrt{3} \cdot (I_K + \Delta i'_{(0)} + \Delta i''_{(0)})} \tag{14}$$

Z takto získaných hodnot je možné dopočítat chybějící reaktance.

V ustáleném stavu se synchronní reaktance skládá z hlavní reaktance a rozptylové reaktance statorového vinutí.

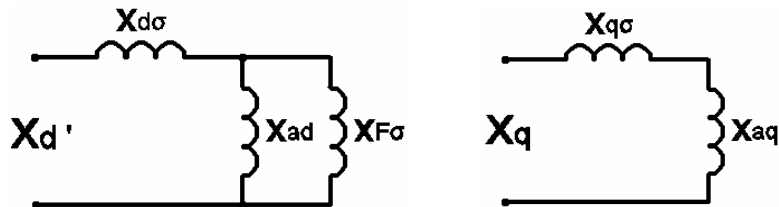


Obr. 4 Schéma pro určení synchronní reaktance

Nyní je možné dopočítat hlavní reaktance x_{ad} a x_{aq} .

$$\begin{aligned} x_{ad} &= x_d - x_{d\sigma} \\ x_{aq} &= x_q - x_{q\sigma} \end{aligned} \tag{15}$$

Po odeznění přechodového děje ve vinutí tlumiče je obvod pro přechodnou reaktanci tvořen hlavní reaktancí a rozptylovými reaktancemi satorového a budícího vinutí. Budící vinutí působí pouze v podélné ose. ($Xq = Xq'$)



Obr. 5 Schéma pro určení přechodné reaktance

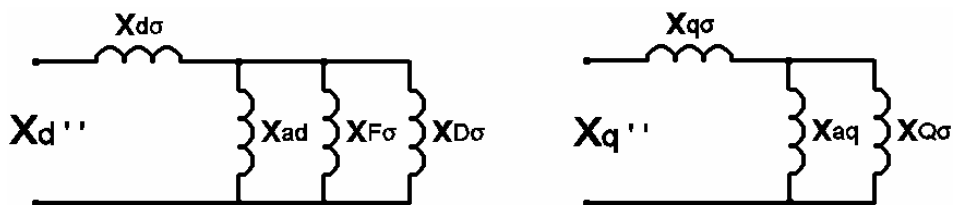
Pro přechodovou reaktanci platí

$$x_d' = x_{d\sigma} + \frac{x_{d\sigma} \cdot x_{F\sigma}}{x_{d\sigma} + x_{F\sigma}} \tag{16}$$

z toho

$$x_{F\sigma} = \left(\frac{1}{x_d' - x_{d\sigma}} - \frac{1}{x_{ad}} \right)^{-1} \tag{17}$$

V prvním okamžiku přechodného děje je obvod pro rázovou reaktanci sestaven z hlavní reaktance a rozptylových reaktancí všech uvažovaných vinutí.



Obr. 6 Schéma pro určení rázové reaktance

Pro podélnou osu platí

$$x_d'' = x_{d\sigma} + \frac{x_{F\sigma} x_{ad} x_{D\sigma}}{x_{F\sigma} x_{ad} + x_{F\sigma} x_{D\sigma} + x_{ad} x_{D\sigma}} \quad (18)$$

z toho

$$x_{D\sigma} = \frac{x_{ad} x_{F\sigma} (x_{d\sigma} - x_d'')}{x_{ad} (x_d'' - x_{d\sigma} - x_{F\sigma}) + x_{F\sigma} (x_d'' - x_{d\sigma})} \quad (19)$$

Pro příčnou osu platí

$$x_q'' = x_{q\sigma} + \frac{x_{aq} x_{Q\sigma}}{x_{aq} + x_{Q\sigma}} \quad (20)$$

z toho

$$x_{Q\sigma} = \left(\frac{1}{x_q'' - x_{q\sigma}} - \frac{1}{x_{aq}} \right)^{-1} \quad (21)$$

Z naměřených hodnot T_d'' a T_q'' , zbývá určit hodnoty činných odporů tlumiče

$$T_d'' = \frac{L_d''}{R_D} \rightarrow R_D = \frac{L_d''}{T_d''} \quad (22)$$

$$T_q'' = \frac{L_q''}{R_Q} \rightarrow R_Q = \frac{L_q''}{T_q''} \quad (23)$$

Tímto způsobem jsou určeny všechny hodnoty potřebné pro sestavení náhradního schéma.

1.3.2. identifikace parametrů modelovaného stroje

jmenovité parametry

<i>zdánlivý výkon</i>	S_N	78,8	[MVA]
<i>činný výkon</i>	P_N	67	[MW]
<i>napětí</i>	U_N	10500	[V]
<i>proud statoru</i>	I_N	3684	[A]
<i>moment setrvačnosti soustrojí</i>	J	10000	[kg.m ²]
<i>frekvence</i>	f	50	[Hz]
<i>otáčky</i>	n	3000	[ot/min]
<i>účinník</i>	$\cos\varphi$	0,85	[-]
<i>počet pólových dvojic</i>	pp	1	[-]

změřené, vypočtené parametry

<i>podélná synchronní reaktance</i>	x_d	2,27	[-]
<i>příčná synchronní reaktance</i>	x_q	2,14	[-]

podélná přechodná reaktance	x_d'	0,214	[-]	
podélná rázová reaktance	x_d''	0,162	[-]	
příčná rázová reaktance	x_q''	0,165	[-]	
podélná přechodná čas.konstanta	T_d'	0,757	[s]	
příčná přechodná čas.konstanta	T_q'	0,047	[s]	
podélná rázová čas.konstanta	T_d''	0,02	[s]	
příčná rázová čas.konstanta	T_q''	0,019	[s]	
podélná rozptylová reaktance stat. vinutí	$x_{d\sigma}$	0,15	[-]	
příčná rozptylová reaktance stat. vinutí	$x_{q\sigma}$	0,15	[-]	
reaktance reakce kotvy v podélné ose	x_{ad}	2,12	[-]	
reaktance reakce kotvy v příčné ose	x_{aq}	1,99	[-]	
rozptylová reaktance budícího vinutí	$x_{F\sigma}$	0,446	[-]	
podélná rozptylová reaktance tl. vinutí	$x_{D\sigma}$	0,71	[-]	
příčná rozptylová reaktance tl. vinutí	$x_{Q\sigma}$	0,286	[-]	
činný odpor statorového vinutí	R	$1,1 \cdot 10^{-3}$	[Ω]	
činný odpor budícího vinutí	R_F	$2,18 \cdot 10^{-3}$	[Ω]	
činný odpor tl. vinutí v podélné ose	R_D	$36,1 \cdot 10^{-3}$	[Ω]	
činný odpor tl. vinutí v příčné ose	R_Q	$38,7 \cdot 10^{-3}$	[Ω]	[Ω]

1.4. POHYBOVÉ ROVNICE STROJE

Přechodové jevy, které mohou při provozu na generátoru nastat se obecně dělí podle doby jejich trvání na rázové, elektromagnetické a elektromechanické [2],[3]. Rázové přechodné děje trvají řádově μs až ms . Při jejich trvání se popisuje elektrizační soustava svými vlnovými parametry. Pro výpočet elektromagnetických přechodových jevů se předpokládá konstantní úhlová rychlost ω , neboť přechodové děje odezní dříve než se navzdory setrvačnosti soustrojí jeho otáčky změní. V případě dějů elektromechanických již tento předpoklad uvažovat nelze a je nutné vyjádřit úhlovou rychlost pomocí tzv. pohybových rovnic, které uvažují proměnou ω v závislost na měnicím se výkonu odebíraným ze stroje.

Momentová rovnice stroje [3] má tvar

$$J \cdot \frac{d\omega_{mech}}{dt} = M_i + M_z \quad (24)$$

kde:

J	moment setrvačnosti	[$kg \cdot m^2$]
M_i	vnitřní elektromagnetický moment (závislý na velikosti a charakteru zátěže)	[$N \cdot m$]
M_z	záběrný mechanický moment (závislý na momentu turbíny)	[$N \cdot m$]
ω_{mech}	mechanická úhlová rychlost	[rad/s]

$$\omega_{mech} = \omega \cdot pp \quad (25)$$

ω	úhlová rychlost	[rad/s]
pp	počet pólových dvojic stroje	

Vnitřní elektromagnetický moment M_i je dán rotačními napětími stroje [3] a lze jej vypočítat podle rovnice

$$m_i = \frac{P_i}{\omega_{mech}} \quad (26)$$

P_i vnitřní výkon stroje [-]

po úpravách je výsledný tvar

$$m_i = PP \cdot (\psi_d \cdot i_q - \psi_q \cdot i_d) \quad (27)$$

Pro určování stavu stroje při jeho provozních podmínkách je nutné vyjádřit také zátěžný úhel ϑ , který představuje úhel natočení osy rotoru vůči ose statoru Obr. 2.

$$\frac{d\vartheta}{dt} = \omega_{mech} \quad (28)$$

Pohybovou rovnicí, nebo také rovnicí kývání rotoru synchronního stroje (24), je možné zapsat ve vyjádření za pomoci činných výkonů (odebíraného a dodávaného) při použití závislosti (26).

$$\frac{d^2\vartheta}{dt^2} = \frac{\omega_0 \cdot (P_t - P)}{T_m \cdot S_n} \quad (29)$$

P_t	výkon dodávaný turbínou	[W]
P	výkon odebíraný ze stroje	[W]
ω_0	synchronní úhlová rychlost	[Rad/s]
S_n	zdánlivý výkon	[VA]
T_m	mechanická konstanta	[s]

Ve výrazu je zavedena tzv. *mechanická konstanta* T_m . Tuto časovou konstantu je možné určit měřením.

$$T_m = \frac{J \cdot \omega_{0mech}^2}{S_n} \quad (30)$$

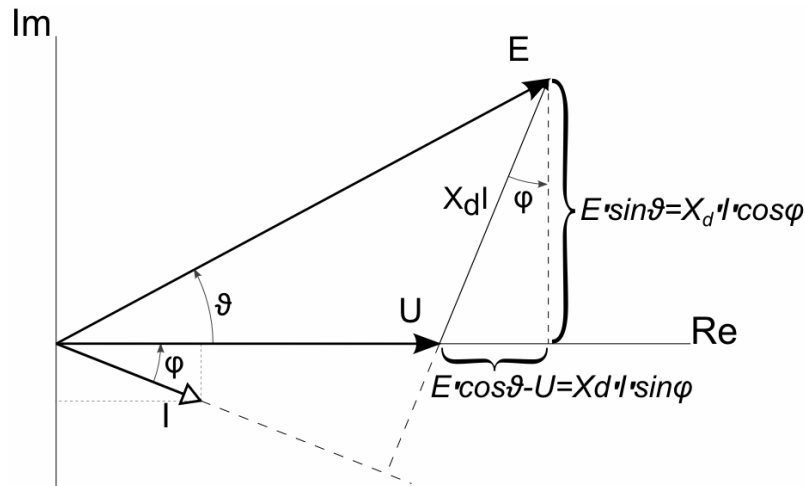
1.5. STABILITA STROJE

1.5.1. Statická stabilita

Problém statické stability je detailně rozebrán v [1]. Jedná se o schopnost systému nalézt při nekonečně malých změnách zátěžného úhlu nový stav s konstantní hodnotou zátěžného úhlu. V podstatě se prostřednictvím výpočtu statické stability zjišťuje, zda-li je provoz při daných podmínkách vůbec možný.

Obecně je energetická soustava množství navzájem spolupracujících alternátorů. Rozbor takto uvažovaného systému by byl velmi obtížný a výpočetně náročný. Ve většině případů je

vyšetřována pouze malá část celé soustavy. Potom je možné, nahradit zbývající alternátory jedním jediným zdrojem konstantního napětí a konstantní frekvence. Jedná se pak o tzv. *tvrdou síť*. Tato náhrada však nesmí zhoršit přesnost výsledků od hodnot ve skutečné soustavě v závislosti na požadavcích řešení. Tak je při uvažování stroje s hladkým rotorem a konstantní velikostí budícího proudu i_F napětí tvrdé sítě U konstantní a v komplexní rovině se při poruše mění úhel natočení fázoru E .



Obr. 7 Fázorový diagram alternátoru pracujícího do tvrdé sítě

Z Obr. 7 a z rovnice pro činný výkon stroje [1] pracujícího do tvrdé sítě plyne závislost

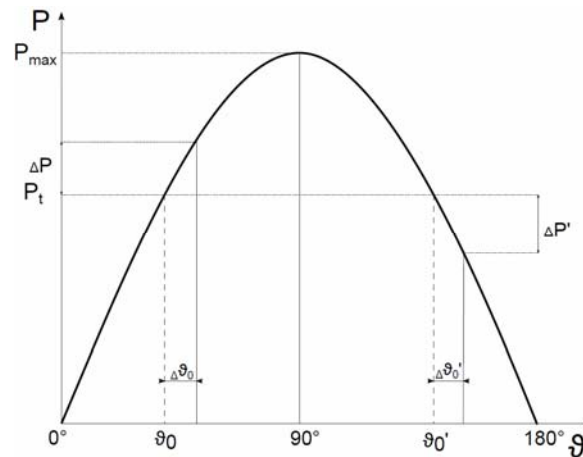
$$P = 3 \cdot \frac{E \cdot U}{X} \cdot \sin \vartheta \quad (31)$$

Z tohoto vztahu je zřejmé, že graficky znázorněná rovnice (31) má tvar sinusové křivky. Pro stroj tedy existuje maximální dodávaný výkon P_{max} . Ten se nachází v bodě kdy $\vartheta = 90^\circ$. Sinusoida je rozdělena na dvě oblasti ($0 < \vartheta < 90^\circ$ a $90 < \vartheta < 180^\circ$). Každé hodnotě činného výkonu P tak odpovídají dvě hodnoty zátěžného úhlu ϑ . Jen jedna z těchto velikostí úhlu ϑ však splňuje podmínku pro nalezení nového ustáleného stavu a splnění statické stability.

Tato podmínka je

$$\frac{dP}{d\vartheta} > 0 \quad (32)$$

Aby byla splněna (32) je rozsah zátěžného úhlu omezen na rozmezí $0 < \vartheta < 90^\circ$, Jen tehdy zvětšení zátěžného úhlu - vlivem zátěže vyvolá kladnou změnu činného výkonu P (odebíraného ze stroje) a za předpokladu konstantního záběrného momentu turbíny, snižuje celkové otáčky a tím i zátěžný úhel ϑ . Tato oblast se nazývá oblast přirozené stability.



Obr. 8 Vnitřní charakteristika stroje

ΔP	změna výkonu dodávaného turbínou vlivem změny zátěžného úhlu	[W]
P_{max}	maximální možný výkon dosažitelný strojem	[W]
$\Delta \vartheta$	změna zátěžného úhlu	[°]

1.5.2. Dynamická stabilita

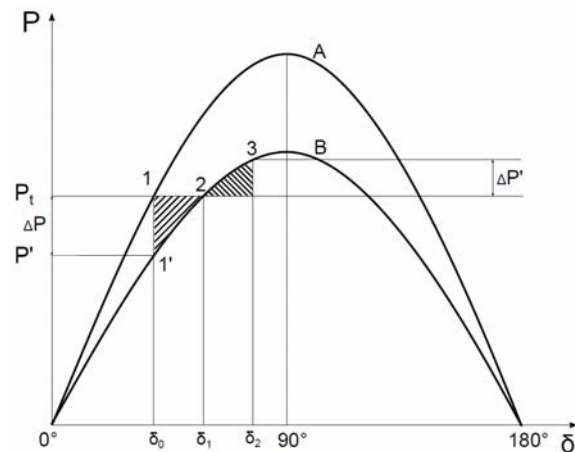
V běžných provozních podmínkách se vlivem změny zátěže neustále mění zátěžný úhel. Toto připnutí či odepnutí zátěže je skokové a změny zátěžného úhlu jsou velké. Vlivem setrvačnosti rotujících částí stroje se ale zátěžný úhel změnit skokem nemůže. Nastává tak kmitavý přechod do nového ustáleného stavu. Zátěžný úhel se nakonec ustálí na nové hodnotě. Tato schopnost nalézt novou ustálenou hodnotu zátěžného úhlu se nazývá dynamická stabilita.

Stanovení dynamické stability se provádí pomocí tzv. *metody ploch*. Z této metody je také stanovena kritická hodnota zátěžného úhlu ϑ , po jejímž překročení je ztracena stabilita stroje. Pro každý stav zatížení a změnu existuje čas po který může tato změna trvat, aby byl systém stabilní.

Důsledkem značného momentu setrvačných hmot, časových zpoždění či různých pásem necitlivosti regulátorů stroje, popř. skutečnost mechanických omezení při rychlosti regulace, a při uvažování ustáleného stavu stroje se pro krátké elektromagnetické přechodové jevy předpokládá úhlová rychlost ω konstantní.

METODA PLOCH

Je uvažován alternátor pracující do tvrdé sítě. Při popisu chování soustavy z hlediska dynamické stability mají největší význam přechodné parametry stroje. Závislost charakterizující přechodové stavy je v tomto případě závislost činného výkonu P na zátěžném úhlu δ . Při předpokladu, že budící proud je konstantní $i_b = konst$ má tato závislost tvar sinusovky.



Obr. 9 Vnitřní charakteristika při dynamické stabilitě

δ zátěžný úhel [°]

Za ustáleného jmenovitého provozního stavu určuje výkon P_t velikost zátěžného úhlu δ_0 v bodě 1. Při zvětšení impedance zátěže klesne celková závislost A na novou, danou sinusovkou B . Touto změnou platí pro stejný zátěžný úhel δ_0 jiná hodnota činného výkonu P' v bodě 1'. Protože se zátěžný úhel nemůže měnit skokem, vlivem setrvačnosti soustrojí, vzniká rozdíl výkonů ΔP resp. rozdíl momentů, jež má za následek zvyšování úhlové rychlosti stroje ω . Urychlovaný stroj bude zvyšovat svůj zátěžný úhel až do maximální hodnoty δ_1 v bodě 2, ve kterém je rozdíl momentů hnacího (od turbíny) a brzdícího (vnitřního elektromagnetického) nulový. Opět vlivem setrvačnosti bude zátěžný úhel stále vzrůstat, ale v oblasti mezi body 2 a 3 je výkon odebíraný strojem vyšší než výkon dodávaný turbínou. Znovu vzniká rozdíl výkonů, avšak tentokrát se jedná o záporný výkon $\Delta P'$, který brzdí otáčející se rotor a snižuje jeho úhlovou rychlost. Úhlová rychlost dosáhne synchronní rychlosti právě v bodě 3 při hodnotě zátěžného úhlu δ_2 . Protože ale stále platí nerovnováha výkonů, začne se úhlová rychlost znovu snižovat. Takto se celý proces opakuje v opačném sledu, než stroj znovu nedosáhne synchronní rychlosti s jistým zátěžným úhlem v oblasti mezi body 1' a 2. Dochází ke kývání a postupnému utlumování odchylek zátěžného úhlu až se nakonec stroj ustálí na hodnotě činného výkonu P_t , které odpovídá zátěžný úhel δ_1 a synchronní úhlová rychlost ω_s .

Tlumení stroje je způsobeno mechanickými třením a především působením elektromagnetické indukce ve vinutích rotoru. Při zanedbání těchto faktorů by kývání mělo netlumený periodický charakter.

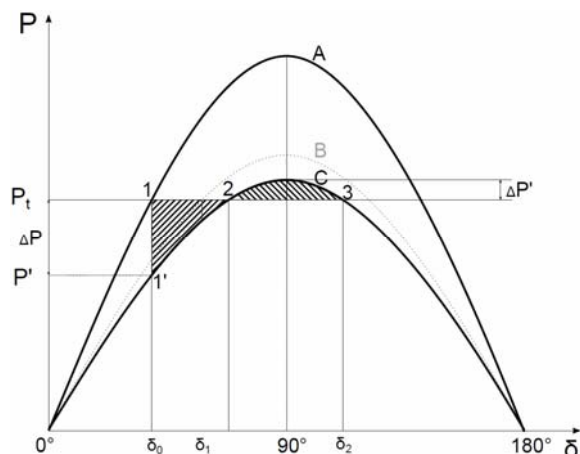
Pro splnění dynamické stability je v lit.[1] vyjádřena podmínka, vycházející z rovnice (29) pro popis kývání rotoru synchronního stroje. Hodnoty T_m , S_n a ω_s jsou konstantní. Po úpravách rovnice je zřejmá podmínka pro zachování stability stroje:

$$\int_{\delta_0}^{\delta_2} \Delta P d\delta = 0 \quad (33)$$

ΔP zde představuje rozdíl výkonů vzniklý na základě změny impedance v obvodu a všechny další změny výkonů, vzniklé kýváním rotoru. Jejich integrál pak představuje vyšrafované plochy na .Tyto plochy lze rozdělit na dva samostatné integrály v závislosti na jejich znaménkách. Vzniknou tak dvě plochy: jedna představující urychlovací energii a druhá energii brzdící. Pravidlo ploch vyjadřuje skutečnost, že proto aby byl systém dynamicky stabilní musí platit nerovnost těchto dvou ploch a to taková, že brzdící plocha musí být větší než plocha urychlovací.

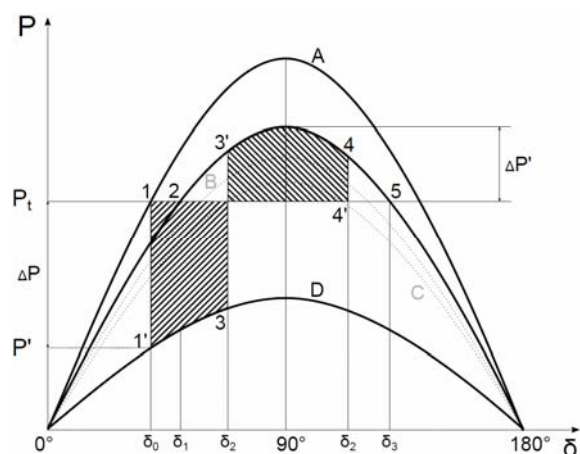
Mez dynamické stability je pak stav, kdy se obě plochy sobě rovnají.

V případě, že impedance obvodu vzroste na hodnotu, které odpovídá křivka *C* na Obr. 10. Slaběji zvýrazněná křivka *B* je závislost pro impedanci odpovídající Obr. 9. Je zde zřejmé, že urychlovací plocha je větší než maximální možná plocha brzdící. Energie kterou rotor získá z kladného rozdílu výkonů mezi body **1'-2** je zmenšována v oblasti **2-3**. Není však dosaženo synchronní rychlosti a zátěžný úhel se zvětší za hodnotu δ_2 . V této části je však výkon turbíny opět větší než výkon stroje a tento rozdíl způsobí další urychlování stroje a ztrátu stability. Pro mezní podmínku dynamické stability, tedy proto, aby obě plochy byly stejně velké, existuje tedy mezní (hraniční) činný výkon *P*.



Obr. 10 Vnitřní charakteristika při ztrátě dynamické stability

Nejnepříznivější případy, velké změny impedancí, představují v reálném systému zkraty. Velký význam pro udržení dynamické stability má místo vzniku zkratu, od toho ze odvíjí impedance přenosové cesty a od ní pak odvislý výkon působící do vzniklého zkratu. Při těchto stavech mají důležitý význam ochranné prvky, které vadné místo odpínají a tím zmenšují odlehčení stroje. Průběh při vzniku zkratu a následného odpojení od sítě ukazuje Obr. 11.



Obr. 11 vnitřní charakteristika při zkratu

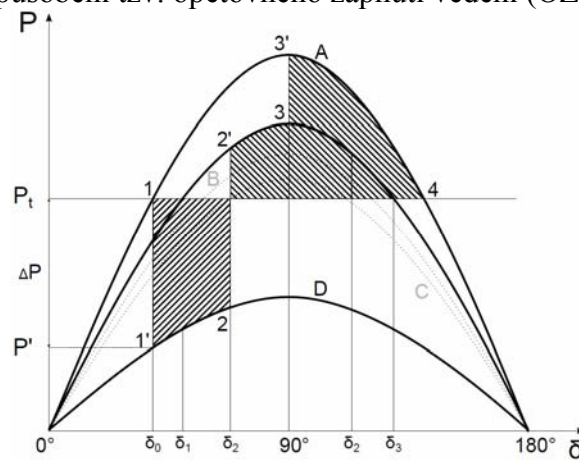
Alternátor pracuje v ustáleném stavu se synchronní úhlovou rychlostí. Jeho chodu odpovídá zátěžný úhel δ_0 a křivka *A*. V tomto okamžiku dojde ke zkratu a činný výkon dodávaný strojem spadne do bodu **1'**. Rotor stroje je vzhledem k rozdílu výkonů P_t a P_i okamžitě urychlován. Velikost zátěžného úhlu roste až do hodnoty δ_2 ve které zapůsobí ochrany a

odpojí vadnou větev od sítě. Z bodu **3** se tedy hodnota dodávaného činného výkonu změní na hodnotu v bodě **3'**. Křivka činného výkonu se změnila v závislosti na impedanci nového topologického uspořádání sítě. V tomto stavu je však výkon dodávaný strojem již větší než výkon dodávaný turbínou a začíná působit brzdící moment úměrný rozdílu těchto výkonů.

V této situaci může úhlová rychlost dosáhnout synchronní úhlové rychlosti, pokud plocha brzdící dosáhne velikosti plochy urychlovací. Dynamická stabilita je splněna. Nebo je důsledkem dlouhé vypínací prodlevy ochran naakumulovaná urychlovací energie natolik velká, že maximální možná brzdící plocha, vymezená danou křivkou činného výkonu, nestačí k tomu, aby úhlová rychlost klesla na rychlost synchronní. V tomto případě dochází ke ztrátě dynamické stability. Situace je pak stejná jako na Obr. 10.

Mez dynamické stability značí bod **5** a jemu odpovídající zátěžný úhel δ_3 .

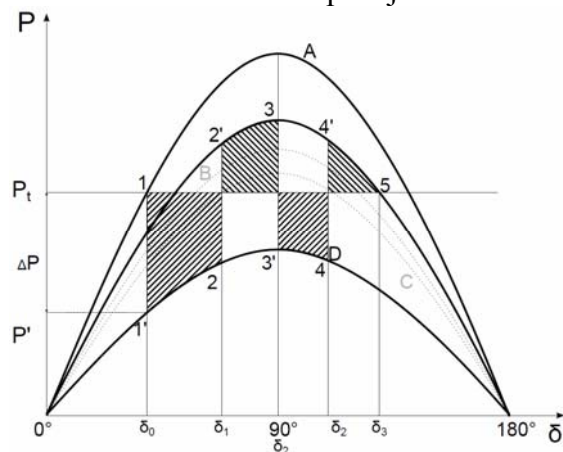
Skutečnost, že velká část poruch na venkovních vedeních je pouze krátkodobých, vede v praxi často k uvažování působení tzv. opětovného zapnutí vedení (OZ).



Obr. 12 Vnitřní charakteristika při pozitivním působení OZ

Na Obr. 12 je zakresleno jaký vliv má OZ na kývání stroje. Potom co výkon klesl do **1'** a po zapůsobení ochran se dostal do bodu **2'**. Je brzděn do bodu **3**, kdy zapůsobí OZ a výkon se dostane do hodnoty **3'**. Po zjištění, že je vše v pořádku je nahromaděná urychlovací energie tlumena brzdící energií, jejíž plocha je dána celou vyšrafovanou plochou v horní části grafu na hodnotu výkonu P_t .

Na Obr. 13 jsou vyznačeny plochy při působení OZ avšak při stále trvající poruše. Při zapůsobení -OZ v bodě **3** výkon znovu klesne na hodnotu odpovídající hodnotě zkratových poměrů a proces urychlování a brzdění se znovu opakuje.



Obr. 13 Vnitřní charakteristika při negativním působení OZ

2 MODEL STROJE V PROGRAMU DYNAST

2.1. SIMULAČNÍ PROGRAM DYNAST

Program DYNAST, jeho zaměření a použití, možnosti simulace a analýzy dynamických soustav, a celkové schopnosti výpočtů detailně popisuje lit. [5].

Obecně je DYNAST rozdělen na oblast pracovního prostředí DYNAST Shell, který je volně šířitelný a slouží uživatelům pro zadání úloh a modelování. V prostředí Shell je možné vytvářet hlavní úlohy, nebo části hlavních modelů tzv. submodely. Podle způsobu zadávání a vytváření modelu se mění i typy souborů, se kterými je pracováno.

přípona souboru	typ souboru
hlavní úlohy	
*.PRB	<i>text zadání soustavy a její analýzy</i>
*.DIA	<i>schéma soustavy v grafické podobě</i>
*.O	<i>výsledky analýz</i>
submodely	
*.MOD	<i>text zadání submodelu</i>
*.DIA	<i>schéma submodelu v grafické podobě</i>
*.LBR	<i>knihovna grafických značek</i>

tab. 2 přípony souborů používané v programu DYNAST

Druhou částí je prostředí řešení takto namodelovaných úloh DYNAST Solver. Tento řešič načítá pro řešení data v textové podobě ať už se jedná o data jakákoliv. Proto je u každé úlohy nutný soubor s příponou *.PRB, jelikož ten udává Solveru všechny informace o úloze.

V této práci je upřednostněno vytváření submodelů i hlavních úloh použitím blokových schémat v grafické podobě. Tento postup je zvolen pro lepší orientaci a představu problému pro jakéhokoliv uživatele.

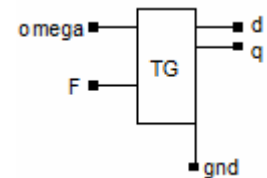
2.2. MODELOVÁNÍ JEDNOTLIVÝCH FUNKČNÍCH BLOKŮ

Model celého systému vytvořeného v této práci se skládá ze tří hlavních částí, které jsou zastoupeny třemi hlavními submodely.

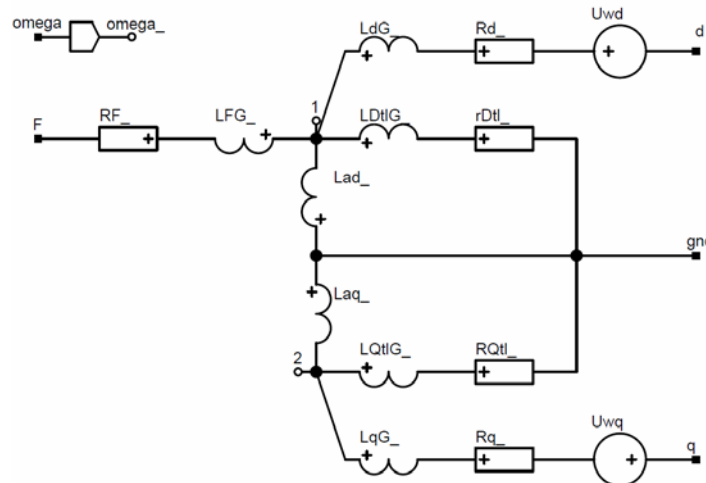
1. Náhradní elektrické schéma
2. Zpětná lineární (Parkova) transformace
3. Mechanická část

Při vytváření modelu byla vytvořena řada "účelových" funkčních bloků použitých v jednotlivých submodelech. Tyto bloky nejsou standardním vybavením knihovny DYNASTU, avšak jejich použití je možné využít i v jiných simulacích. Tyto bloky jsou umístěny na příloženém CD k této práci.

2.2.1. Náhradní elektrické schéma



Náhradní elektrické schéma vychází z matematického popisu stroje. Je vytvořeno podle schéma na Obr. 3.



Obr. 14 Náhradní schéma alternátoru

Schéma je zakresleno tak, že pro obě souřadné osy d i q je uzemnění gnd společné. Toto uspořádání se společnou zemnicí svorkou je výhodné např. pro zadávání velikostí rotačních napětí. Bez obtíží je možné odkázat na velikosti průtokových a spádových veličin jakékoliv části.

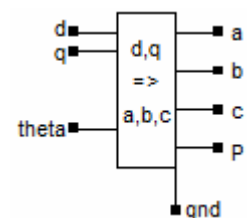
Svorka F značí vstup pro připojení budícího proudu. V důsledku výpočtu parametrů stroje v pojmenovaných jednotkách je velikost budícího proudu také převedena do jistých pojmenovaných jednotek, které nejsou shodné s reálnou hodnotou budícího proudu skutečného stroje. Jelikož je při simulaci ustálených dějů předpokládána velikost budícího proudu konstantní $i_b = i_F = konst.$, není třeba regulace a tato nesrovnalost je možná.

Velikosti jednotlivých prvků ve schématu jsou určeny dle části 3.3. Blok je zpracován tak, že jednotlivé parametry jako velikosti činných odporů a velikosti rozptylových a vzájemných indukčností je možné pozměnit ve vlastnostech bloku.

Napět'ové zdroje U_{wd} a U_{wq} představují rotační indukovaná napětí, blíže v [1].

Soubor zdrojového textu náhradního schéma je uveden v příloze 1.1

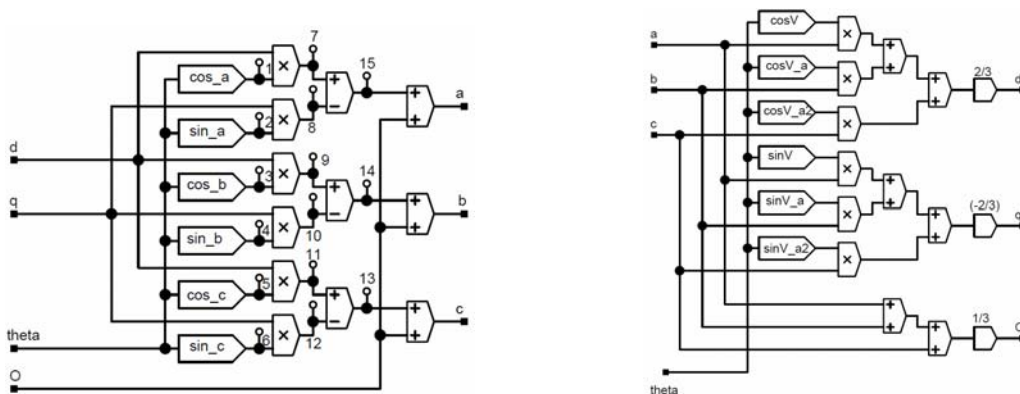
2.2.2. Zpětná lineární (Parkova) transformace



Pro možnost použití modelovaného synchronního stroje v programu DYNAST jako součást knihovny, je nutné vyjádřit jeho výstupní hodnoty - svorkové napětí a proudy - ve fázovém souřadném systému, neboť pro simulace dějů např. v rozvodných sítích nepřicházejí hodnoty v jiných souřadných systémech v úvahu. Tak je možné uplatnit model pro širší aplikace, než pouze pro zjištění průběhů různých veličin v samotném stroji.

Lineární transformace je odvozena a popsána v lit.[6]. Výsledná podoba rovnic zpětné Parkovy transformace, které převádějí veličiny z hodnot v $d, q, 0$ do fázových hodnot a, b, c má tvar uvedený v odstavci 1.2.

Podle těchto rovnic byly vytvořeny dílčí submodely Parkovy transformace nazvané "**PT**", a submodel zpětné Parkovy transformace nazvaný "**ZPT**".



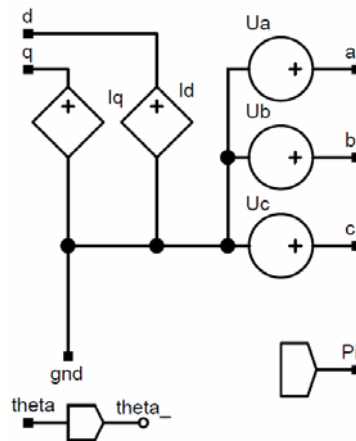
Obr. 15

a) Schéma bloku Parkovy transformace (PT)

b) Schéma bloku zpětné Parkovy transformace (ZPT)

Oba tyto bloky jsou použity ve vytvoření hlavního bloku zpětné lineární (Parkovy) transformace Obr. 16. V podstatě se jedná o grafické zapsání převodových vztahů z rovnic (4) a (5). K vytvoření těchto submodelů byl vytvořen blok "six_fi" jehož text je uveden v příloženém CD. Po zhodnocení složitosti a časové úspory během výpočtu byly schémata na Obr. 15 přepsány do matematických rovnic v souboru .PRB.

Blok zpětné lineární Parkovy transformace převádí svorkové napětí do souřadnic a, b, c a tyto hodnoty jsou dosazeny jako velikosti napětí napěťových zdrojů U_a, U_b, U_c . V závislosti na připojené zátěži začne protékat proud jehož velikosti v jednotlivých fázích jsou pomocí transformačních rovnic pro přímou Parkovu transformaci převedeny do souřadnic d, q . Výpočty přes transformační rovnice jsou uvedeny v příloze 1.2. Velikosti hodnot proudů přepočtených do souřadnicového systému d, q jsou hodnotami pro proudové zdroje I_d, I_q . Takto je zajištěna zpětná vazba, která udává hodnotu odebíraného proudu stroji, který v závislosti na ní mění své parametry. Protože není řešen nesymetrický stav, netočivá složková soustava je rovna nule. Její vsup není vyveden z důvodu použití této transformace pro souměrnou, symetrickou zátěž. Pro nesouměrnou zátěž by musel být vytvořen samostatný model pro netočivou složkovou soustavu. Jen tak by byla zajištěna úplná transformace i pro případ nesymetrického zatížení.



Obr. 16 Schema submodelu zpětné lineární (Parkovy) transformace (d,q_to_a,b,c)

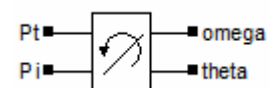
Ve schématu je také vývod P_i , který představuje okamžitý výkon stroje.

Funkčnost bloku Parkovy zpětné transformace je ukázána na příkladu zapojení v příloze.2

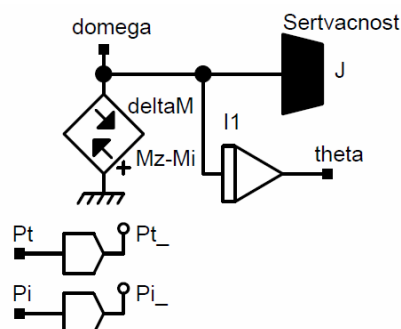
Blok Parkovy transformace dq_to_abc1 je připojen na napěťové zdroje E_1 a E_2 , jejichž hodnoty neodpovídají hodnotám reálného napětí v osách d a q při ustáleném chodu synchronního alternátoru, pro účely zkoušky převodu z jednoho souřadného systému do druhého však vyhovují. V příloze jsou zobrazeny průběhy hodnot pro dva krajní případy zatížení.

Model bloku Parkovy transformace původně zahrnoval také transformační vztah pro netočivou složkovou soustavu. Protože simulace je provedena pro symetrickou zátěž a netočivá složka je nulová, byly vztahy pro ní odebrány.

2.2.3. Mechanická část



Pohybový blok matematicky řeší pohybové rovnice stroje viz. odstavec 3.4. Blok je vytvořen pomocí knihovny DYNASTU, konkrétně pro rotační proměnné. Zdroj ΔM představuje zdroj momentu síly. Jeho velikost je dána rozdílem momentů ve stroji a to momentu záběrného od turbíny M_z a vnitřního elektromagnetického momentu M_i . Ke zdroji je připojena také setrvačnost, která představuje nejen setrvačnost rotujících hmot alternátoru, ale celého rotujícího soustrojí. V závislosti na změnách momentů je počítána změna úhlové rychlosti ω . Takto je prakticky vyjádřena rovnice (24). Z velikosti změny úhlové rychlosti je také počítána velikost a změna zátěžného úhlu $\vartheta(\theta)$.



Obr. 17 Schéma pohybového bloku (MC)

Hodnoty momentů M_i a M_z jsou vypočítávány z hodnot výkonů turbíny P_t , vnitřního výkonu P_i a velikosti synchronní úhlové rychlosti ω_0 . Hodnoty těchto výkonů jsou přivedené na vstup mechanického bloku prostřednictvím svorek P_i , P_t .

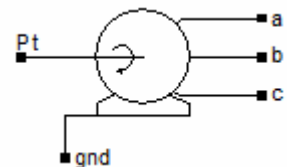
Hodnotu momentu setrvačnosti J je možné nastavit ve vlastnostech bloku.

Zdrojový text souboru pro mechanický blok je uveden v příloze 1.3.

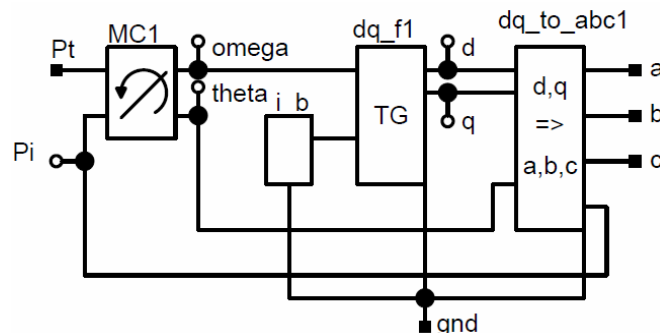
2.2.4. Dílčí bloky vytvořené pro simulaci

Dílčích bloků vytvořených během modelování je celá řada. V podstatě jsou to bloky, které zmenšují čas při vytváření složitějších celků tím, že v sobě zahrnují buďto všechny tři fáze, nebo matematický výpočet, který by musel být zapsán v rovnicích či namodelován za pomoci blokových schémat. Za zmínku stojí jednoduché RL symetrické zatížení a několik bloků počítajících $\sin(x)$ z daných vstupů. Všechny takto vytvořené bloky, jejich soubory, jsou uloženy na CD odevzdaném spolu s touto prací ve složce **bloky**.

2.2.5. Celkový model synchronního generátoru



Pro celkový model byly všechna tři hlavní schémata spojena s přidáním proudového i_b zdroje coby zdrojem budícího proudu do jednoho modelu. Jeho schéma je na Obr. 18



Obr. 18 Schéma celkového modelu synchronního alternátoru

Model stroje má vstupující vývod pro přivedení velikosti mechanického výkonu turbíny a vývody svorek, představující fáze a,b,c.

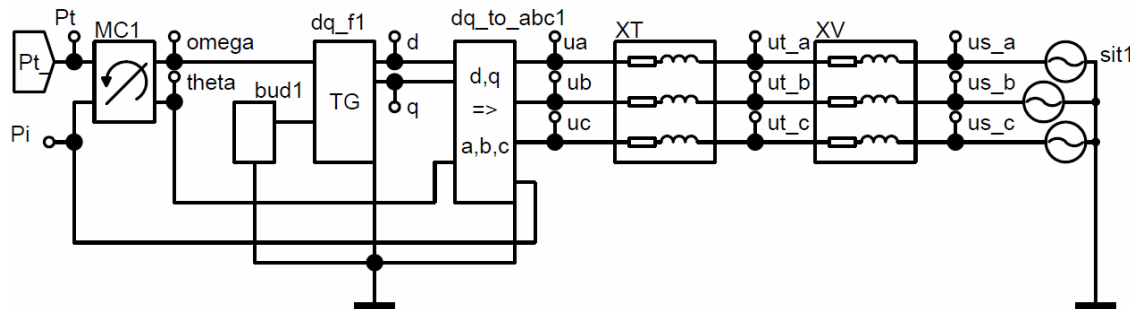
2.3. SIMULACE NA VYTVOŘENÉM MODELU

Vytvořený model synchronního alternátoru, jehož parametry jsou identifikovány v odstavci 1.3.2. byl zapojen pro simulaci do tvrdé sítě, kterou představuje třífázový napěťový zdroj s hodnotou fázového napětí 6062V a frekvencí 50Hz. Jako reaktance vedení byly zvoleny orientační hodnoty které jsou rovny v poměrných jednotkách. Reaktance X_T představuje reaktanci transformátoru a X_V reaktanci venkovního vedení.

reaktance	[-]	[Ω]
X_T	0,1	0,14
X_V	0,5	0,7
X_S	0,01	0,014
indukčnost	-	[mH]
L_T	-	0,45
L_V	-	2,2
L_S	-	0,045

tab. 3 hodnoty reaktancí pro simulování spolupráce do tvrdé sítě

Schéma zapojení s reaktancemi a tvrdou sítí je na Obr. 19 **schéma zapojení alternátoru v grafické podobě**. Model stroje je zde zobrazen pomocí schéma celkového modelu. Ze schématu je vidět, že blok Parkovy transformace pouze převádí veličiny do jiných souřadnic, ale z hlediska výkonu je to v podstatě jeden bod.



Obr. 19 schéma zapojení alternátoru v grafické podobě

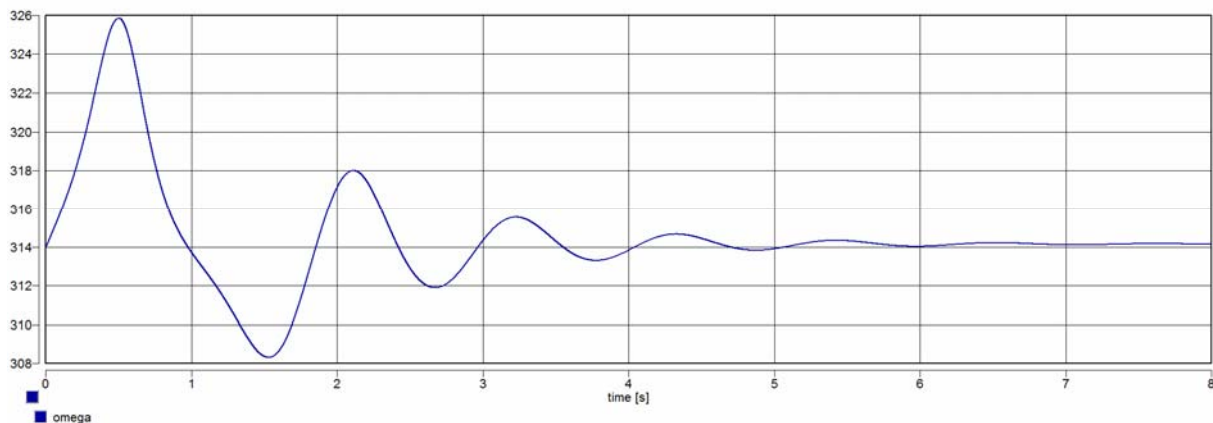
Výkon turbíny P_t je nastaven na 80% své jmenovité hodnoty $P_t=53MW$.

Efektivní hodnota napětí na svorkách tvrdé sítě je $U_{sef}=6062V$. Napětí sítě je uvažováno na hladině alternátoru, tím odpadá uvažování modelu transformátoru, který se zde projevuje pouze reaktancí v cestě spojení alternátoru a tvrdé sítě X_T .

Hodnota budícího proudu je nastavena na hodnotu 10000A. Tato hodnota však není reálná ve srovnání se skutečnou hodnotou budícího proudu. Je to způsobeno přepočtem do pojmenovaných jednotek v identifikaci parametrů stroje.

V programu DYNAST byla nastavena transienční analýza a čas výpočtu byl stanoven na 10s.

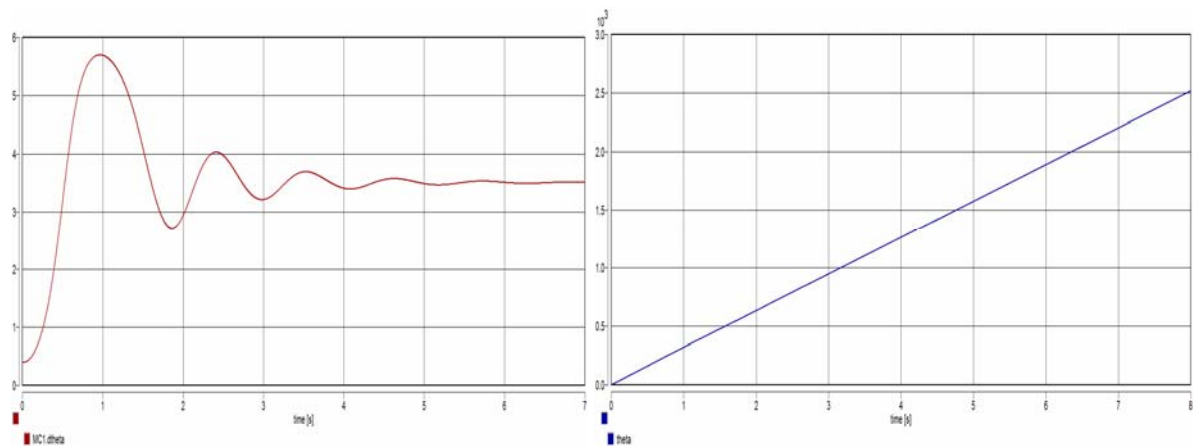
Pro popis výsledného průběhu simulovaného alternátoru byla vybrána časová závislost úhlové rychlosti. Obr. 20. a průběh zátěžného úhlu theta Obr. 21. Počáteční podmínky pro simulaci uvažují úhlovou rychlost synchronní $\omega=\omega_s$. Z průběhu úhlové rychlosti na Obr 20 je zřejmé, že z počáteční hodnoty $\omega=314 \text{ rad/s}$ je v důsledku připojení alternátoru k tvrdé sítí úhlová rychlost kýváním ustálena na hodnotě $\omega=314,162 \text{ rad/s}$. Znamená to tedy, že výkon turbíny je větší než výkon dodávaný strojem do sítě.



Obr. 20 Průběh úhlové rychlosti

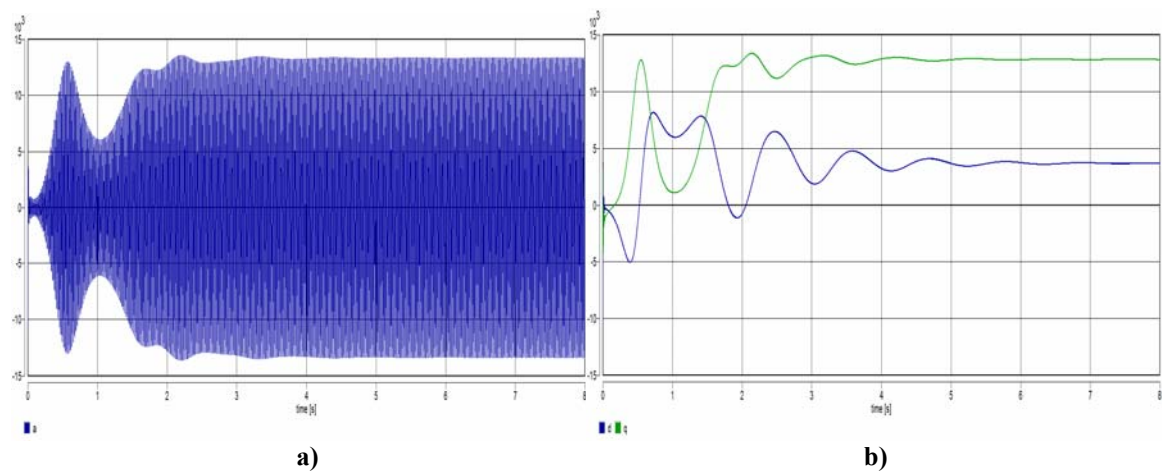
Z výsledných nasimulovaných hodnot je zřejmé, že synchronní stroj nalezl ustálený stav.

Při popisu změny a ustálení zátěžného úhlu je zřejmé že hodnota, na které se úhel ustálil je $3,51 \text{ rad}$. To odpovídá $201,21^\circ$. Tato hodnota může být způsobena protočením stroje a až poté jeho ustálením.



Obr. 21 Průběh $\Delta\theta$

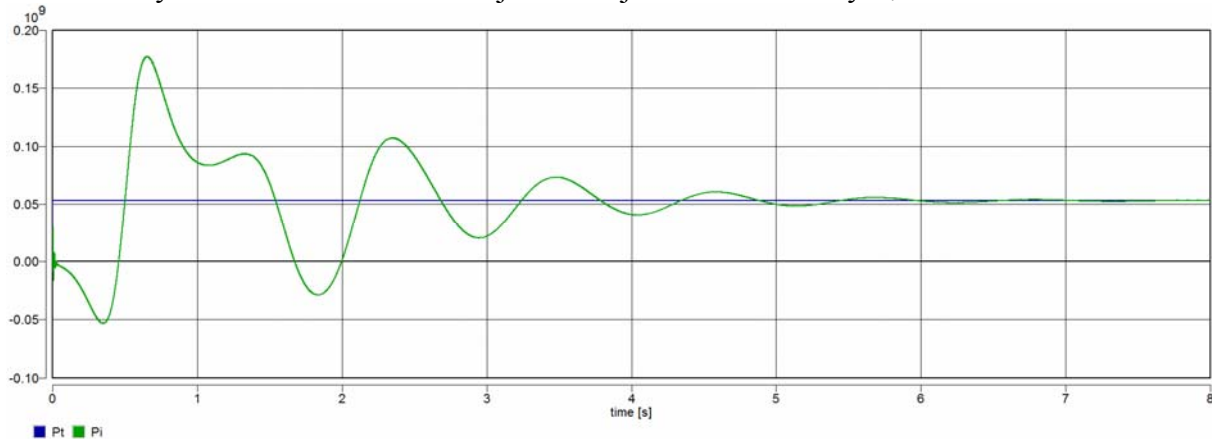
Označení *MCI.theta* se vztahuje k označení v rámci modelu a submodelu simulované soustavy. *MCI* znamená, že se jedná o parametr, který je počítán uvnitř submodelu *MCI*, což je blok *mechanická část*.



Obr. 22 Průběhy napětí na svorkách stroje a) fáze a b) hodnoty d, q .

Ze zaznamenaných hodnot napětí a proudů je vidět graficky působení Parkovy transformace při převodu mezi souřadnými systémy. Čas, za který se napětí ustálilo je shodný u všech průběhů. $t \approx 8s$. Velikost maximální hodnoty napětí na svorkách stroje je ovšem větší než velikost maximální hodnoty která odpovídá přibližně $110\% U_S$, jak tomu bývá u reálně provozovaných alternátorů.

Na Obr. 23 je průběh výkonu stroje. Pro porovnání je zobrazen i konstantní výkon turbíny kolem kterého je kýváním ustalována hodnota P_i . Z průběhu je zřejmé, že maximální hodnota okamžitého výkonu dosáhla více než trojnásobku jmenovité hodnoty P_i .



Obr. 23 průběh výkonů turbíny a vnitřního výkonu stroje

Výsledný model synchronního stroje je velmi citlivý při spolupráci do tvrdé sítě. Při změně nastavených parametrů např. velikosti reaktance představující reaktanci venkovního vedení spojovací cesty mezi alternátorem a sítí, nedochází k tlumení a ustálení veličin na nové hodnotě.

V řešené simulaci musí být k reaktancím uvažován i jistý činný odpor (0.05Ω). Při jeho zanedbání, hodnotě $R=0$ je výsledný průběh veličin kmitavý a ničím netlumený. V bloku Parkovy transformace jsou po převedení napětí do souřadnic a, b, c jejich okamžité hodnoty použity jako velikosti ideálních napěťových zdrojů.

Pravděpodobný důsledek tohoto uspořádání je, že netlumené průběhy proudů a napětí v souřadném systému a, b, c jsou transformovány v bloku Parkovy transformace i s těmito kmity a tím se zachovává toto kmitání i v souřadném systému d, q . Těmito veličinami jsou nepříznivě ovlivňovány veličiny v náhradním schéma stroje a to má za následek další kmitání s větší amplitudou při převodu ze souřadnic d, q do a, b, c , opět přes blok Parkovy transformace.

To je také zřejmě důvodem nemožnosti nalezení ustáleného stavu při práci alternátoru do tvrdé sítě, neboť při nevhodných počátečních podmínkách již není možné dosáhnout ustáleného stavu i při správně identifikovaných parametrech stroje.

Správná identifikace parametrů alternátoru je dalším významným faktorem pro dosažení požadovaných průběhů veličin a správný chod celé modelované soustavy.

Závěr

Výsledkem předkládané práce je model konkrétního synchronního alternátoru modelovaný v souřadnicích d, q, θ , jehož veličiny jsou pomocí Parkovy transformace převedeny do souřadnic a, b, c . K těmto svorkám je připojena tvrdá síť. Vytvořený model však nepracuje optimálně pro všechny stavy.

Identifikovaný model synchronního alternátoru byl namodelován a následně byla spuštěna simulace jeho připojení k tvrdé síti. Z výsledných průběhů sledovaných veličin je zřejmé, že připojení proběhlo a stroj začal dodávat činný výkon do sítě. Při změnách parametrů (velikost mechanického výkonu dodávaného turbínou, velikost impedancí v propojovací cestě mezi alternátorem a tvrdou sítí), začal simulovaný model vykazovat singularitu řešení.

Tento problém je způsoben blokem zpětné Parkovy transformace. Důvodem je s největší pravděpodobností vnitřní stavba bloku, který převádí indukované napětí na svorkách stroje ze souřadnic d, q do souřadnic a, b, c . viz. odstavec 2.2.2 této práce, a nevhodné použití proudových zdrojů jako zpětné proudové vazby, která určuje stroji velikost odebíraného proudu v souřadnicích d, q . Převod okamžitých hodnot elektrických veličin do souřadného systému a, b, c , je nejcitlivější místo této práce, a také první, kde je třeba hledat příčinu nefunkčnosti modelu.

Další možné ovlivnění výsledků je v nesprávném, či nepřesném stanovení parametrů stroje.

Jako další postup pro dosažení přesných výsledků v této diplomové práci je nutné ošetřit blok zpětné Parkovy transformace s ohledem na přesné dodržení zásad příčin a důsledků při transformaci mezi souřadnými systémy. Pokusit se přesněji identifikovat parametry stroje, nebo i změnit modelovaný synchronní alternátor.

Za předpokladu absolutně správné funkce bloku zpětné Parkovy transformace je možné rozšířit simulaci o průběhy při různých přechodových dějích např. odlehčení stroje při spínacích pochodech až po simulování zkratu s následným uvažováním automatiky opětovného zapnutí ochran.

Seznam použité a citované literatury

- [1] Trojánek, Z.; Hájek, J.; Kvasnica, P.: *Přechodné jevy v elektrizačních soustavách*, SNTL/ALFA, Praha 1987.
- [2] Mühlbacher, J.: *Metody řešení přechodných jevů v elektrizačních soustavách, I.-díl*, Plzeň 1993.
- [3] Mühlbacher, J.: *Metody řešení přechodných jevů v elektrizačních soustavách, II.-díl*, Plzeň 1993.
- [4] Mühlbacher, J.; Noháč, K.: *Přechodné jevy v elektrizačních soustavách - řešené příklady*, Plzeň 1995.
- [5] Mann H.; Ševčenko, M.: *Snadné počítačové modelování dynamických soustav, příručka k simulačnímu systému DYNAST*, Praha, 2008.
- [6] Měřička J.; Zoubek Z.: *Obecná teorie elektrického stroje*, SNTL, Praha 1973.
- [7] Bartoš, V.; Linda, J.; Štolba, Z.; Švajcr, J.; Telín, J.: *Teorie a měření elektrických strojů, laboratorní cvičení*, Plzeň 1984.

Přílohy

1 ZDROJOVÉ TEXTY HLAVNÍCH SUBMODELŮ

- 1.1 NÁHRADNÍ ELEKTRICKÉ SCHÉMA V D,Q
- 1.2 ZPĚTNÁ LIENÁRNÍ (PARKOVA) TRANSFORMACE
- 1.3 MECHANICKÁ ČÁST

2 FUNKČNOST BLOKU PARKOVY TRANSFORMACE

- 2.1 PŘÍPAD ZATÍŽENÍ $R=0.02\Omega$, $L=0.2\text{MH}$
- 2.2 PŘÍPAD ZATÍŽENÍ $R=1\text{T}\Omega$

1 ZDROJOVÉ TEXTY HLAVNÍCH SUBMODELŮ

1.1 náhradní elektrické schéma v d,q

```

:: nahradni_schema_SG
SCHEMA_DQ_PLZEN_FAZ
d,
q,
gnd,
F,
omega/
Rd=1.1m,                ::[Ohm]cinny odpor statoroveho vinuti v ose d
RF=2.18m,              ::[Ohm]cinny odpor budiciho vinuti
RDtl=62.5m,           ::[Ohm]cinny odpor vinuti tlumice v ose d

LFG=0.294m,           ::[H] indukcnost budiciho vinuti
LDG=0.668m,           ::[H] indukcnost statoroveho vinuti v ose d
LDtlG=0.0658m,        ::[H] indukcnost vinuti tlumice v ose d
Lad=9.444m,           ::[H] vzajemna indukcnost v ose d

Rq=1.1m,              ::[Ohm]cinny odpor statoroveho vinuti v ose q
RQt1=67m,             ::[Ohm]cinny odpor vinuti tlumice v ose q

LqG=0.668m,           ::[H] indukcnost statoroveho vinuti v ose q
LQt1G=0.0673m,        ::[H] indukcnost vinuti tlumice v ose q
Laq=8.865m;           ::[H] vzajemna indukcnost v ose q
:-----
:zapis diagramu stroje
RF_ 4-F = RF;
rDtl_ 5-gnd = rDtl;
Rd_ 6-7 = Rd;
LFG_ 1-4 = LFG;
LDG_ 1-6 = LDG;
LDtlG_ 1-5 = LDtlG;
LqG_ 2-8 = LqG;
LQt1G_ 2-9 = LQt1G;
RQt1_ 9-gnd = RQt1;
Rq_ 8-10 = Rq;
Lad_ gnd-1 = Lad;
Laq_ gnd-2 = Laq;

:hodnoty rotacnich napeti
Uwd > E 7-d = omega*((LqG*I.LqG_)+(Laq*I.Laq_));
Uwq > E q-10 = omega*((LDG*I.LDG_)+(Lad*I.Lad_));

BS1 > @BS1 omega,3;
EO@;

```

1.2 zpětná lienární (Parkova) transformace

```

:: zpetna Parkova transformace
ZPET_PARK_TRANSFORMACE
d,
q,
gnd,
a,
b,
c,
Pi,
theta;
u_a = V.d*cos(theta)-V.q*sin(theta);
u_b = V.d*cos(theta-(2pi/3))-V.q*sin(theta-(2pi/3));
u_c = V.d*cos(theta+(2pi/3))-V.q*sin(theta+(2pi/3));

:Parkova transformace
:hodnoty pro proudove zdroje Id,Iq
i_d = (2/3)*(I.Ua*cos(theta)+I.Ub*cos(theta-(2pi/3))
+I.Uc*cos(theta+(2pi/3)));
i_q = -(2/3)*(I.Ua*sin(theta)+I.Ub*sin(theta-(2pi/3))
+I.Uc*sin(theta+(2pi/3)));

```

```

:vy pocit vykonu P v souradnicich a,b,c
P_abc = u_a*I.Ua+u_b*I.Ub+u_c*I.Uc;

:vy pocit vykonu P v souradnicich dq
P_dq = (3/2)*(V.d*i_d+V.q*i_q);

Iq > J q-gnd = i_q;
Id > J d-gnd = i_d;
Ua > E a-gnd = u_a;
Ub > E b-gnd = u_b;
Uc > E c-gnd = u_c;
P > BS Pi = -(P_abc);
BS1 > @BS1 theta,theta_;
EO@;
    
```

1.3 mechanická část

```

:: Mechanicky blok
MECH_BLOK
theta,
domega,
Pt,
Pi/
J = 10000;          ::moment setrvacnosti [kg.m2]

:Pt      -      vykon dodavany turbinou [W]
:Pi      -      vnitřni moment [N.m]

:synchronni uhlova rychlost
omegas=2pi*50;

: Vypocet momentu: zaberneho turbiny Mz a vnitřniho stroje Mi
Mi = Pi/omegas;
Mz = Pt/omegas;

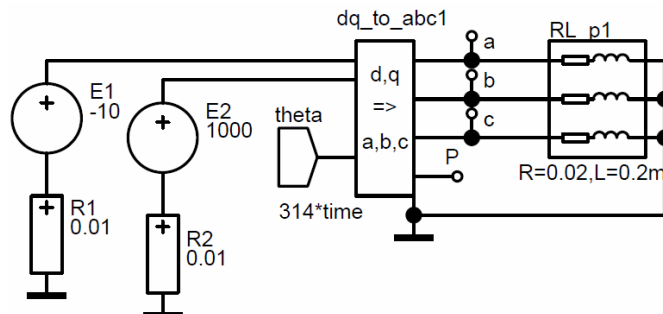
: Vypocet zatezneho uhlu theta pri synchronni uhlove rychlosti
thetaS = omegas*time;

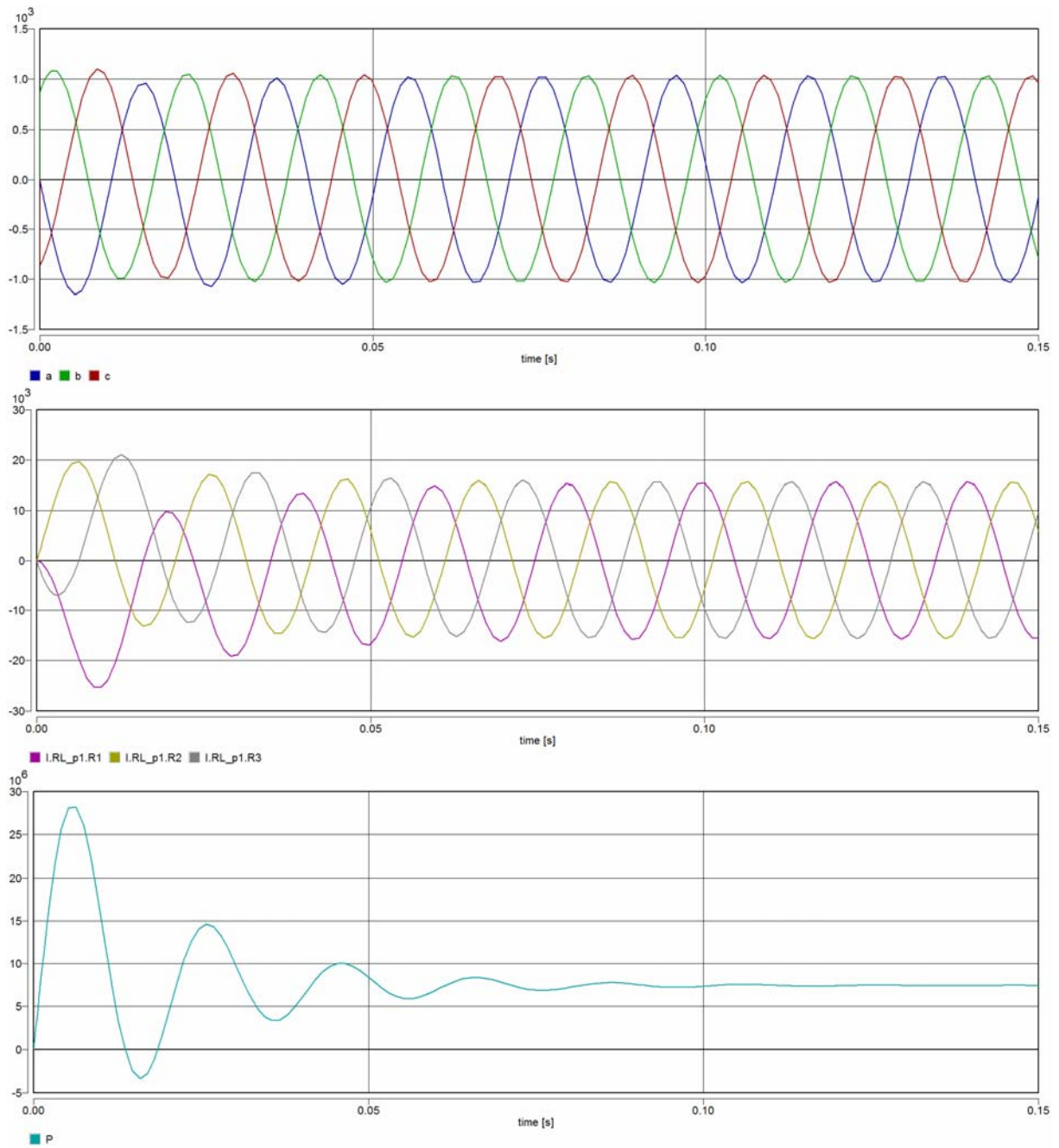
: Vypocet okamzite velikosti zatezneho uhlu theta
dtheta = theta-thetaS;

deltaM > J 0-domega = Mz-Mi;
Sertvacnost > C domega = J;
I1 > @Int domega,theta;
BS1 > @BS1 Pt,1;
BS2 > @BS1 Pi,2;
EO@;
    
```

2 FUNKČNOST BLOKU PARKOVY TRANSFORMACE

2.1 Příklad zatížení R=0.02Ω, L=0.2mH





2.2 Příklad zatížení $R=1T\Omega$

