

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV VÝKONOVÉ ELEKTROTECHNIKY A ELEKTRONIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

DEPARTMENT OF POWER ELECTRICAL AND ELECTRONIC ENGINEERING

SYNCHRONNÍ GENERÁTOR S PERMANENTNÍMI MAGNETY A AKTIVNÍM USMĚRŇOVAČEM

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. Jan Michaliczek

BRNO 2013



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ

ÚSTAV VÝKONOVÉ ELEKTROTECHNIKY A ELEKTRONIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF POWER ELECTRICAL AND ELECTRONIC
ENGINEERING

SYNCHRONNÍ GENERÁTOR S PERMANENTNÍMI MAGNETY A AKTIVNÍM USMĚRŇOVAČEM

PERMANENT MAGNET SYNCHRONOUS GENERATOR WITH ACTIVE RECTIFIER

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. JAN MICHALICZEK

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. ONDŘEJ VÍTEK, Ph.D.

BRNO, 2013



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky

Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor
Silnoproudá elektrotechnika a výkonová elektronika

Student: Bc. Jan Michaliczek

ID: 106638

Ročník: 2

Akademický rok: 2012/2013

NÁZEV TÉMATU:

Synchronní generátor s permanentními magnety a aktivním usměrňovačem

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Popište konstrukci, princip funkce a matematický model synchronních generátorů při práci do neřízeného a aktivního usměrňovače s různými typy zátěží.
2. Simulujte soustavu generátor s permanentními magnety + aktivní usměrňovač.
3. Provedte měření na zvoleném generátoru s aktivním usměrňovačem, analyzujte výsledky.
4. Porovnejte chování generátoru při práci do neřízeného a aktivního usměrňovače.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

Dle doporučení vedoucího

Termín zadání: 17.9.2012

Termín odevzdání: 28.5.2013

Vedoucí práce: Ing. Ondřej Vítek, Ph.D.

Konzultanti diplomové práce:

Ing. Ondřej Vítek, Ph.D.

Předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

Abstrakt

Hlavním cílem diplomové práce bylo ověřit, zda dokáže daný synchronní generátor s permanentními magnety firmy JULI Motorenwerk s.r.o. při zapojení s aktivním usměřňovačem (s tranzistory MOS-FET) dosáhnout většího maximálního výkonu oproti zapojení s neřízeným šestipulsním usměřňovačem. Pro tento účel byl sestaven matematický model v programu Matlab/Simulink. Simulacemi byl zde pozorován a porovnáván hlavně vliv usměřňovačů s různými typy zátěží na jeho výstupní veličiny, hlavně sdružené napětí U_s a elektrický výkon P_e . Simulace byly porovnány s případným měřením.

Abstract

The main objective of the master's thesis was to prove, if permanent magnet synchronous generator made by company JULI Motorenwerk s.r.o. could reach higher maximum active power with active rectifier than with six-pulse bridge rectifier. For this reason a mathematical model was made in Matlab/Simulink. The influence of the rectifiers with various kinds of loading was observed and compared by simulations on output variables, like line-to-line voltage and active power. The simulations were also compared with measurement.

Klíčová slova

Synchronní generátor s permanentními magnety; matematický model; aktivní usměřovač; Matlab Simulink

Keywords

Permanent magnet synchronous generator; mathematical model; active rectifier; Matlab Simulink

Bibliografická citace

MICHALICZEK, J. *Synchronní generátor s permanentními magnety a aktivním usměrňovačem*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2013. 69 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Ondřej Vítek, Ph.D..

Prohlášení

Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma *Synchronní generátor s permanentními magnety a aktivním usměrňovačem* jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

V Brně dne

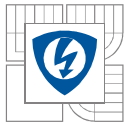
Podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucímu diplomové práce Ing. Ondřeji Vítkovi, Ph.D. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé diplomové práce.

V Brně dne

Podpis autora

**OBSAH**

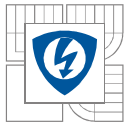
Seznam obrázků	8
Seznam tabulek.....	10
Seznam symbolů a zkratk	11
Úvod.....	16
1 Synchronní generátor s permanentními magnety	16
1.1 Konstrukce synchronního stroje s permanentními magnety	17
1.2 Usměrňovač	19
1.2.1 Neřízený a aktivní usměrňovač	20
1.2.2 Diodový (neřízený) usměrňovač	20
1.2.2.1 Neřízený trojfázový můstkový usměrňovač	21
1.2.2.2 Aktivní usměrňovač.....	23
1.3 Zátěže	24
1.3.1 R zátěž	24
1.3.2 L zátěž	25
1.3.3 C zátěž.....	26
1.3.4 RL zátěž.....	26
1.3.5 RC zátěž	28
2 Matematický model PMSG	29
2.1 Výpočet parametrů pro matematický model.....	30
2.1.1 Odpor vinutí R.....	33
2.1.2 Podélná a příčná indukčnost L_d , L_q	35
2.1.2.1 Výpočet rozptylové indukčnosti L_l	35
2.1.2.2 Magnetizační indukčnosti L_{ad} a L_{aq}	39
2.1.3 Budící magnetický spřažený tok ψ_f	40
2.2 Ztráty.....	44
3 Model PMSG v programu Matlab/Simulink	46
3.1 Matematický model v dq – osách.....	46
3.1.1 Simulace a vyhodnocení.....	49
3.1.1.1 Neřízený usměrňovač	50
3.1.1.2 Aktivní usměrňovač.....	54
3.2 Zjednodušený model	60
3.2.1 Simulace a porovnání s dq modelem.....	61
Závěr.....	64
Literatura	65
Seznam příloh	66

Seznam obrázků

<i>Obrázek 1.1: Typy rotorových konstrukcí (převzato z [4]).....</i>	<i>18</i>
<i>Obrázek 1.2: Příčná reakce kotvy v rotoru s magnety ve V-pozici (převzato z [4]).....</i>	<i>19</i>
<i>Obrázek 1.3: Srovnání pólových konstrukcí a hustot vzduchových mezer (převzato z [4])</i>	<i>19</i>
<i>Obrázek 1.4: Výstupní napětí a činný výkon diodového usměrňovače (převzato z [7]).....</i>	<i>21</i>
<i>Obrázek 1.5: Neřízený trojfázový můstkový usměrňovač - schéma</i>	<i>21</i>
<i>Obrázek 1.6: Usměrněné napětí trojfázového můstkového usměrňovače.....</i>	<i>22</i>
<i>Obrázek 1.7: Usměrněné napětí trojfázového uzlového usměrňovače</i>	<i>22</i>
<i>Obrázek 1.8: Fázorové diagramy generátoru (převzato z [7]).....</i>	<i>23</i>
<i>Obrázek 1.9: Průběh činného výkonu na fázovém proudu – srovnání aktivního a neřízeného usměrňovače (převzato z [7]).....</i>	<i>24</i>
<i>Obrázek 1.10: R zátěž - a) schéma b) fázorový diagram</i>	<i>24</i>
<i>Obrázek 1.11: L zátěž - a) schéma b) fázorový diagram</i>	<i>25</i>
<i>Obrázek 1.12: C zátěž - a) schéma b) fázorový diagram.....</i>	<i>26</i>
<i>Obrázek 1.13: RL zátěž - a) schéma b) fázorový diagram.....</i>	<i>27</i>
<i>Obrázek 1.14: RC zátěž - a) schéma b) fázorový diagram</i>	<i>28</i>
<i>Obrázek 2.1: Synchronní generátor s permanentními magnety.....</i>	<i>30</i>
<i>Obrázek 2.2: Statorové vinutí synchronního generátoru s permanentními magnety.....</i>	<i>31</i>
<i>Obrázek 2.3: Náčrt řezu synchronního generátoru s permanentními magnety.....</i>	<i>31</i>
<i>Obrázek 2.4: Částečně otevřená lichoběžníková drážka [1]</i>	<i>36</i>
<i>Obrázek 2.5: Náčrt drážky statoru.....</i>	<i>37</i>
<i>Obrázek 2.6: Theveninův ekvivalentní magnetický obvod</i>	<i>41</i>
<i>Obrázek 2.7: Upravené schéma pro nelineární magnetický obvod</i>	<i>43</i>
<i>Obrázek 2.8: Diagram toku výkonu PMSG.....</i>	<i>44</i>
<i>Obrázek 2.9: Ztráty při stavu naprázdno</i>	<i>45</i>
<i>Obrázek 3.1: Schéma matematického modelu PMSG v Simulinku</i>	<i>47</i>
<i>Obrázek 3.2: Celkový model</i>	<i>48</i>
<i>Obrázek 3.3: Zatěžovací charakteristiky dq modelu pro R a RL zátěž</i>	<i>50</i>
<i>Obrázek 3.4: Část modelu se zapojením s neřízeným usměrňovačem v Simulinku</i>	<i>51</i>
<i>Obrázek 3.5: Průběhy dq složek napětí (vlevo) a proudu (vpravo)</i>	<i>51</i>
<i>Obrázek 3.6: Střídavé průběhy napětí (nahore) a proudu (dole) při maximálním výkonu.....</i>	<i>52</i>
<i>Obrázek 3.7: Srovnání zatěžovacích charakteristik - simulace</i>	<i>53</i>

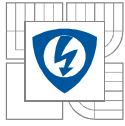


Obrázek 3.8: Vliv kondenzátoru na napětí (nahore) a proud (dole).....	53
Obrázek 3.9: Principiální blokové schéma řízení	54
Obrázek 3.10: Blokové schéma proudové smyčky	54
Obrázek 3.11: Regulátor proudu d -složky R_{id} v Simulinku.....	56
Obrázek 3.12: Část modelu se zapojením s aktivním usměrňovačem s RC zátěží.....	57
Obrázek 3.13: Průběhy dq složek napětí (vlevo) a proudu (vpravo)	57
Obrázek 3.14: Příklad střídavého průběhu fázového napětí (nahore) a proudu (dole)	58
Obrázek 3.15: Zatěžovací charakteristiky $U_s = f(P_e)$ - aktivní usměrňovač.....	59
Obrázek 3.16: Charakteristiky činného výkonu na fázovém proudu $P_e = f(I_f)$	59
Obrázek 3.17: Zjednodušený model PMSG s neřízeným usměrňovačem	60
Obrázek 3.18: Generátor (jedna fáze) – náhradní schéma.....	60
Obrázek 3.19: Zkušebna + přívodní kabely - náhradní schéma.....	61
Obrázek 3.20: Zatěžovací charakteristiky – simulace – neřízený usměrňovač + srovnání.....	62
Obrázek 3.21: Zatěžovací charakteristiky – aktivní usměrňovač + srovnání.....	62
Obrázek 3.22: Střídavé průběhy napětí (nahore) a proudu (dole) - neřízený usměrňovač.....	63
Obrázek 3.23: Střídavé průběhy napětí (nahore) a proudu (dole) - aktivní usměrňovač.....	63



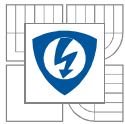
Seznam tabulek

<i>Tabulka 2.1: Štítkové hodnoty</i>	<i>32</i>
<i>Tabulka 2.2: Údaje synchronního generátoru s permanentními magnety</i>	<i>32</i>
<i>Tabulka 2.3: Materiál permanentních magnetů NdFeB 230/175W</i>	<i>32</i>

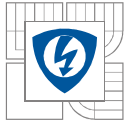


Seznam symbolů a zkratk

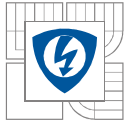
Symbol	Popis	Jednotka
a	počet paralelních větví	[-]
A	průřez materiálu	[m ²]
A_G	průřez vzduchové mezery nad magnetem	[m ²]
A_m	průřez permanentního magnetu	[m ²]
b	šířka drážky	[m]
B_r	magnetická indukce	[T]
$\cos \varphi$	účinník	[-]
d	průměr drátu	[m]
D	vrtání statoru	[m]
$D_{\bar{c}}$	střední drážkový průměr	[m]
f	frekvence	[Hz]
f_M	vzorkovací frekvence měniče	[Hz]
F_g	přenosová funkce generátoru	[-]
$F_{g,d}$	přenosová funkce d-složky generátoru	[-]
$F_{g,q}$	přenosová funkce q-složky generátoru	[-]
F_M	přenosová funkce aktivního usměrňovače	[-]
F_s	přenosová funkce soustavy	[-]
$F_{s,d}$	přenosová funkce d-složky soustavy	[-]
F_o	přenosová funkce metody optimálního modulu	[-]
g	vzduchová mezera	[m]
g'	ekvivalentní vzduchová mezera	[m]
g_d'	ekvivalentní vzduchová mezera v d-ose	[m]
g_q'	ekvivalentní vzduchová mezera v q-ose	[m]
h	výška drážky	[m]
h_M	výška magnetu	[m]
H_c	koercivita magnetu	[A/m]
i	okamžitý proud	[A]
i_d	proud v d-ose	[A]
i_{d_ref}	referenční hodnota proudu i_d	[A]
i_q	proud v q-ose	[A]
i_{q_ref}	referenční hodnota proudu i_q	[A]
I_{ef}, I_f	efektivní fázový proud	[A]
I_{fn}	jmenovitý fázový proud	[A]
I_d	střední hodnota proudu usměrňovače	[A]
I_C	proud ideálním kondenzátorem	[A]
I_L	proud ideální cívkou	[A]



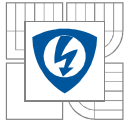
I_R	proud rezistorem	[A]
I_{RC}	proud RC zátěží	[A]
I_{RL}	proud RL zátěží	[A]
I_z	proud na zátěži	[A]
J	moment setrvačnosti	[kg m ²]
k_C	Carterův činitel	[-]
$k_{\check{c}}$	činitel délky čel	[-]
k_{d1}	činitel rozlohy	[-]
k_h	činitel hysterezních ztrát	[-]
k_k	pólový krytí	[-]
k_{p1}	činitel kroku	[-]
k_r	činitel rozptylu	[-]
$k_{sat.}$	činitel nasycení	[-]
k_v	činitel ztrát vířivých proudů	[-]
k_{w1}	činitel vinutí	[-]
K_M	zesílení měniče	[-]
l	délka	[m]
$l_{\check{c}}$	délka čela vinutí	[m]
l_v	dodatečná délka vývodů	[m]
l_z	délka závitů	[m]
L_i	délka stroje	[m]
L_{ad}	magnetizační indukčnost d-osy	[H]
L_d	podélná indukčnost - d-osa	[H]
L_{aq}	magnetizační indukčnost q-osy	[H]
L_q	příčná indukčnost - q-osa	[H]
L_p	parazitní indukčnost	[H]
L_s	synchronní indukčnost	[H]
L_l	rozptylová indukčnost	[H]
m	hmotnost magnetického materiálu	[kg]
m_l	počet fází	[-]
M_d	dynamický moment	[Nm]
M_i	vnitřní moment	[Nm]
M_{mech}	mechanický moment	[Nm]
n	otáčky	[min ⁻¹]
N	počet závitů v sérii	[-]
N_a	počet paralelních drátů	[-]
p	počet pólových dvojic	[-]
p_e	okamžitý výkon	[W]



P_{mech}	mechanický příkon	[W]
P_e	elektrický výkon	[W]
P_z	výkon na zátěži	[W]
ΔP_{Cu}	Joulovy ztráty ve vinutí statoru	[W]
ΔP_d	dodatečné ztráty	[W]
$\Delta P_{Fe_rot.}$	ztráty v železe rotoru	[W]
$\Delta P_{Fe_st.}$	ztráty v železe statoru	[W]
ΔP_h	hysterezní ztráty	[W]
ΔP_{mech}	mechanické ztráty	[W]
ΔP_v	ztráty vířivými proudy	[W]
q_l	počet drážek na pól a fázi	[-]
Q_l	počet drážek	[-]
R	celkový odpor vinutí	[Ω]
R_d	odpor vývodů	[Ω]
R_G	magnetický odpor vzduchové mezery	[H^{-1}]
R_i	proudový regulátor	[-]
R_{id}	regulátor proudu i_d	[-]
R_{iq}	regulátor proudu i_q	[-]
R_{jrot}	magnetický odpor jha rotoru	[H^{-1}]
R_{jst}	magnetický odpor jha statoru	[H^{-1}]
R_{zst}	magnetický odpor zubu statoru	[H^{-1}]
R_m	magnetický odpor	[H^{-1}]
R_{PM}	magnetický odpor permanentních magnetů	[H^{-1}]
R_{k1}, R_{k2}	odpory přívodních kabelů	[Ω]
R_s	odpor vinutí na statoru	[Ω]
R_{st}	stabilizační odpor	[Ω]
R_z	ohmická zátěž	[Ω]
u	okamžité napětí	[V]
u_d	napětí v d-ose	[V]
u_q	napětí v q-ose	[V]
U_{of}	indukované fázové napětí	[V]
U_{0s}	indukované sdružené napětí	[V]
U_{ef}, U_f	efektivní hodnota fázového napětí	[V]
U_{fn}	jmenovité fázové napětí	[V]
U_M	magnetomotorické napětí	[A]
U_d	střední hodnota napětí usměrňovače	[V]
U_C	napětí ideálního kondenzátoru	[V]
U_L	napětí ideální cívky	[V]



U_R	napětí rezistoru	[V]
U_{RC}	napětí RC zátěže	[V]
U_{RL}	napětí RL zátěže	[V]
U_s	sdružené napětí	[V]
U_z	napětí na zátěži	[V]
S	průřez drátu	[m ²]
ΔT	rozdíl teplot	[°C]
X_a	magnetizační reaktance	[Ω]
X_{ad}	magnetizační reaktance v d-ose	[Ω]
X_d	celková reaktance v d-ose	[Ω]
X_{aq}	magnetizační reaktance v q-ose	[Ω]
X_q	celková reaktance v q-ose	[Ω]
X_l	rozptylová reaktance	[Ω]
X_C	reaktance ideálního kondenzátoru	[Ω]
X_L	reaktance ideální cívky	[Ω]
y_e	elektrický krok vinutí	[-]
y_m	mechanický krok vinutí	[-]
Y_{RC}	admitance RC zátěže	[S]
Z_C	impedance ideálního kondenzátoru	[Ω]
Z_L	impedance ideální cívky	[Ω]
Z_R	impedance rezistoru	[Ω]
Z_{RL}	impedance RL zátěže	[Ω]
α	teplotní součinitel elektrického odporu	[K ⁻¹]
α_{Br}	teplotní součinitel magnetické indukce	[%/K]
ϕ_M	celkový magnetický tok	[Wb]
ϕ_G	magnetický tok procházející vzduchovou mezerou	[Wb]
λ_{ls}	jednotková magnetická vodivost drážky statoru	[-]
λ_{le}	jednotková magnetická vodivost čel vinutí	[-]
λ_{ld}	jednotková magnetická vodivost diferenčního rozptylu	[-]
λ_{lf}	jednotková magnetická vodivost mezi hlavami zubů	[-]
μ_0	permeabilita vakua	[H/m]
μ_r	relativní permeabilita	[-]
μ_{r1}	relativní permeabilita magnetů	[-]
μ_{r2}	relativní permeabilita vzduchové mezery	[-]
ρ_{Cu}	rezistivita mědi	[Ωm]
τ	pólová rozteč	[m]
τ_{d1}	diferenční činitel	[-]
τ_d	časová konstanta d-osy generátoru	[s]



τ_q	časová konstanta q-osy generátoru	[s]
τ_M	časová konstanta měniče	[s]
τ_σ, τ_0	součtové časové konstanty	[s]
φ_C	fázový posuv v obvodu s ideálním kondenzátorem	[°]
φ_L	fázový posuv v obvodu s ideální cívkou	[°]
φ_R	fázový posuv v obvodu s rezistorem	[°]
φ_{RC}	fázový posuv v obvodu s RC zátěží	[°]
φ_{RL}	fázový posuv v obvodu s RL zátěží	[°]
Ψ_f	budící magnetický spřažený tok	[H]
Ψ_d	magnetický spřažený tok v d-ose	[H]
Ψ_q	magnetický spřažený tok v q-ose	[H]
ω	úhlová rychlost	[rad s ⁻¹]

Zkratka Význam

PMSG Synchronní generátor s permanentními magnety
(Permanent Magnet Synchronous Generator)

Úvod

Hlavním cílem diplomové práce je dokázat, že synchronní generátor s permanentními magnety (PMSG) firmy JULI Motorenwerk s.r.o. může dosáhnout vyšších výkonů s aktivním usměrňovačem než s usměrňovačem neřízeným. Ověření se provede na základě simulací matematického modelu sestaveného v Matlab/Simulink pro tři hlavní stavy/situace: *bez usměrňovače (třífázová zátěž)*, *s neřízeným usměrňovačem* a *aktivním usměrňovačem*. Důraz je kladen zejména na charakteristiky veličin na výstupních svorkách generátoru.

První část práce slouží k seznámení s konstrukcí a principem funkce synchronních strojů s permanentními magnety. Menší pozornost je zaměřena na usměrňovače a možné zátěže. Samotnému matematickému modelu generátoru je věnována druhá část obsahující rovnice matematického modelu a jeho výpočty parametrů a veličin. Třetí a poslední část se zabývá samotnými simulacemi v Matlab/Simulink pro kýžené stavy, jejich vyhodnocováním, vzájemným porovnáváním, případně srovnáváním s příslušnými měřeními.

1 Synchronní generátor s permanentními magnety

Aplikace permanentních magnetů v synchronních strojích přinesla velký obrat v různých oblastech využití. Velkou roli na tom sehrály magnety ze speciálních sloučenin, jako je například Samarium-Kobalt ($SmCO_5$, $SmCO_{17}$) nebo Neodym-Železo-Bór (NdFeB), jejichž magnetické vlastnosti předčí například běžné magnety na bázi feritů. Hlavními nevýhodami těchto permanentních magnetů je jejich vysoká cena a možná demagnetizace při překročení určité provozní teploty (u NdFeB – v současnosti 200°C, u SmCO – v současnosti 350°C) [5].

Použití permanentních magnetů v konstrukcích strojů poskytuje několik výhod oproti klasickým synchronním strojům s elektromagnetickým buzením. Například budící vinutí obvyklé u klasických synchronních strojů je nahrazeno právě permanentními magnety, čímž odpadá ztráty v buzení a zvyšují tak účinnost stroje a zároveň zjednodušují i samotnou konstrukci stroje, ale výrazně se tím omezí schopnost regulace napětí (důležité pro generátory). V rotoru nejsou dále umístěny kroužky či kartáče vyžadující údržbu.

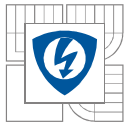
Shrnutí výhod a nevýhod synchronního stroje s permanentními magnety:

Výhody:

- žádné ztráty v buzení – zvýšení účinnosti stroje
- vyšší moment a výkon na jednotku objemu (menší rozměry)
- lepší dynamické vlastnosti (vyšší magnetická indukce ve vzduchové mezeře)
- jednodušší konstrukce a údržba (absence kroužků a kartáčů)

Nevýhody:

- vysoká cena magnetického materiálu (hlavně ze speciálních sloučenin)
- možná demagnetizace magnetů při překročení maximální provozní teploty
- horší regulace napětí



Synchronní motory s permanentními magnety (PMSM) se běžně používají v servotechnice, robotice a automatizační technice v pohonech o výkonech v rozsahu stovek W až desítek kW, kde nahrazují zejména stejnosměrné a krokové motory a začaly se využívat i v trakčních elektrických pohonech [5].

Permanentní magnety ze speciálních sloučenin jsou v současnosti použity i v synchronních motorech s výkony většími než 1 MW. Synchronní motory velkých výkonů mohou být použity, jak v nízko-rychlostních (např. pohon lodí), tak i ve vysokorychlostních pohonech (pumpy a kompresory) [1].

U synchronních generátorů s permanentními magnety (PMSG) se používají rotory válcového nebo diskového tvaru s magnety na povrchu, nebo uvnitř (viz kap. 1.1). Většinou se však používají generátory s magnety na povrchu rotoru.

Rozsah využití sahá od generátorů přímo poháněných větrnými, nebo mikro-vodními turbínami po startovací generátory v automobilech, nebo generátory pouze v automobilových aplikacích (hybridní vozidla), mobilních nebo záložních kombinacích „motor-generátor“ s několika výstupy, a systémy superrychlých plynových turbín (s výkony až do několika MW) pro rozvodné systémy [2].

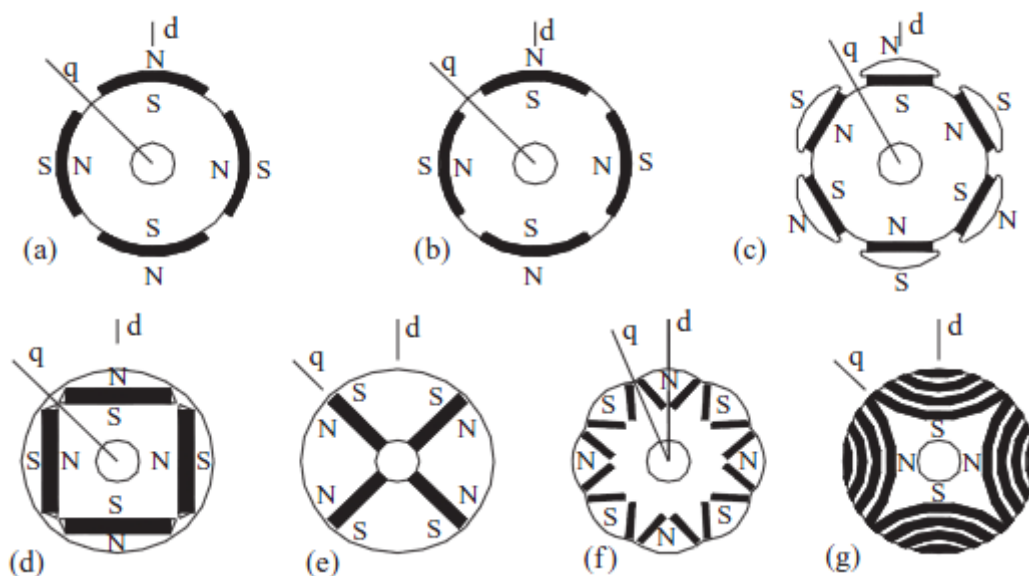
1.1 Konstrukce synchronního stroje s permanentními magnety

Stejně jako u klasického synchronního stroje s vinutým rotorem je na statoru třífázové vinutí. V rotoru jsou umístěny permanentní magnety.

Permanentní magnety na rozdíl od budícího vinutí zajišťují konstantní spřažený tok Ψ_f a nejsou tedy žádné ztráty v buzení. Buzení permanentních magnetů se nemění, což vznáší určité požadavky na návrh stroje. Jelikož magnety mají velmi nízkou permeabilitu, bývá indukčnost stroje s permanentními magnety malá. Synchronní podélná indukčnost taky musí být malá, protože maximální moment stroje k ní je nepřímo úměrný.

Na *obrázku 1.1* jsou zobrazeny typy rotorových konstrukcí stroje s permanentními magnety (dle literatury [4]):

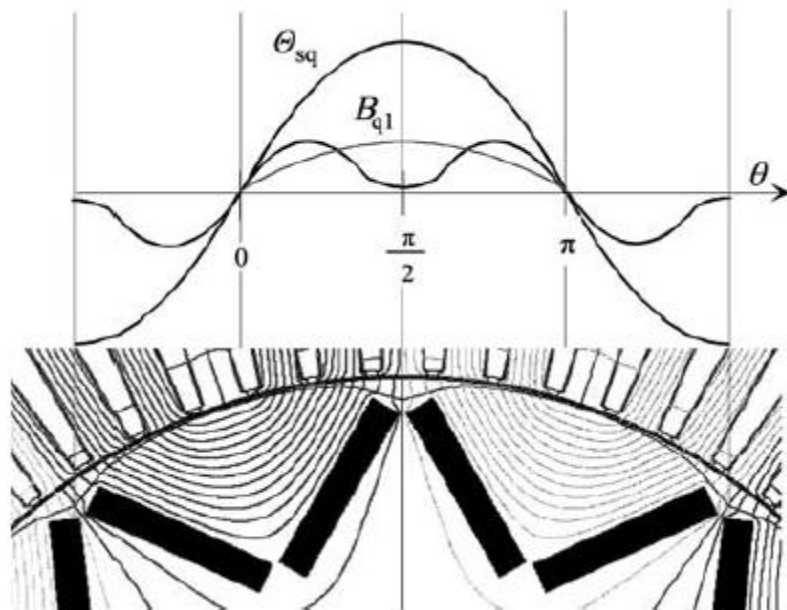
- a) s magnety na povrchu rotoru
- b) s magnety vloženými do povrchu rotoru
- c) rotor s pólovými nástavci
- d) s tangenciálně vloženými magnety
- e) s příčně vloženými magnety
- f) s dvěma magnety na jeden pól ve V-pozici
- g) synchronní reluktanční rotor s permanentními magnety



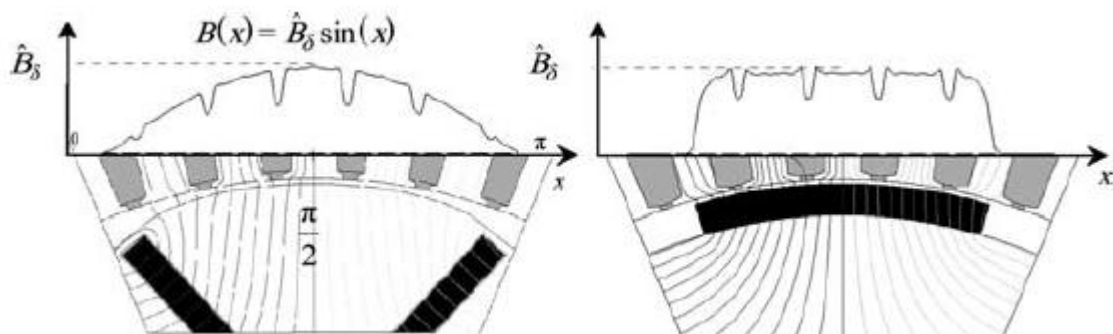
Obrázek 1.1: Typy rotorových konstrukcí (převzato z [4])

Jsou-li magnety umístěny na povrchu rotoru, je rotor v principu hladký, jelikož relativní permeabilita magnetů je přibližně rovna jedné ($\mu_r = 1,04 - 1,05$). Jsou-li magnety vloženy do tělesa rotoru, je příčná synchronní indukčnost L_q větší, než podélná synchronní indukčnost L_d .

Úplným vkládáním magnetického materiálu do struktury rotoru se ztrácí podstatná část magnetického toku magnetu. V rotoru dochází k rozptylu magnetického toku, ale na druhé straně jsou magnety chráněny, jak mechanicky, tak magneticky. V případě úplného vkládání můžeme využít dva magnety na jeden pól (obrázek 1.1 f), v takovém případě je možné dosáhnout vyšších hodnot magnetické indukce ve vzduchové mezeře ve stavu naprázdno. V případě výskytu železa na povrchu rotoru nastane reakce kotvy, která poněkud zeslabuje charakteristiky stroje (obrázek 1.2).



Obrázek 1.2: Příčná reakce kotvy v rotoru s magnety ve V-pozici (převzato z [4])



Obrázek 1.3: Srovnání pólových konstrukcí a hustot vzduchových mezer (převzato z [4])

Materiál permanentních magnetů je nejlépe využitelný ve strojích s magnety na povrchu rotoru. Díky vysokému magnetickému odporu jsou synchronní indukčnosti malé a stroje tohoto typu mají tendenci vypadnout ze synchronismu. Samotné magnety na povrchu rotoru jsou mechanicky i magneticky namáhány. Obrázek 1.3 porovnává hustoty vzduchové mezery mezi rotorem s magnety ve V-pozici a rotorem s magnety na povrchu [4].

1.2 Usměrňovač

Usměrňovač je elektrické zařízení přeměňující střídavou elektrickou energii na energii stejnosměrnou. Ve fyzickém provedení mohou obsahovat elektronkové diody, rtuťové elektronky, polovodičové diody, tyristory a další polovodičové prvky. Mají mnoho využití, ale nejčastěji jsou využity při stejnosměrných napájeních (elektrické regulované pohony) a v systémech vysokonapěťového přenosu stejnosměrného proudu. Bývají také součástí jiných polovodičových měničů (např.: frekvenční měnič).

Usměrňovače rozdělujeme podle nejrůznějších kritérií, z nichž ty nejzákladnější jsou:

- podle říditelnosti: neřízené, řízené, polořízené, aktivní
- podle zapojení: uzlové, můstkové
- podle počtu fází: jednofázové, trojfázové (bez transformátoru)
- podle počtu usměrněných pulsů: jednopulsní, dvoupulsní, trojpulsní, šestipulsní, ...
- s nulovou diodou nebo bez nulové diody

1.2.1 Neřízený a aktivní usměrňovač

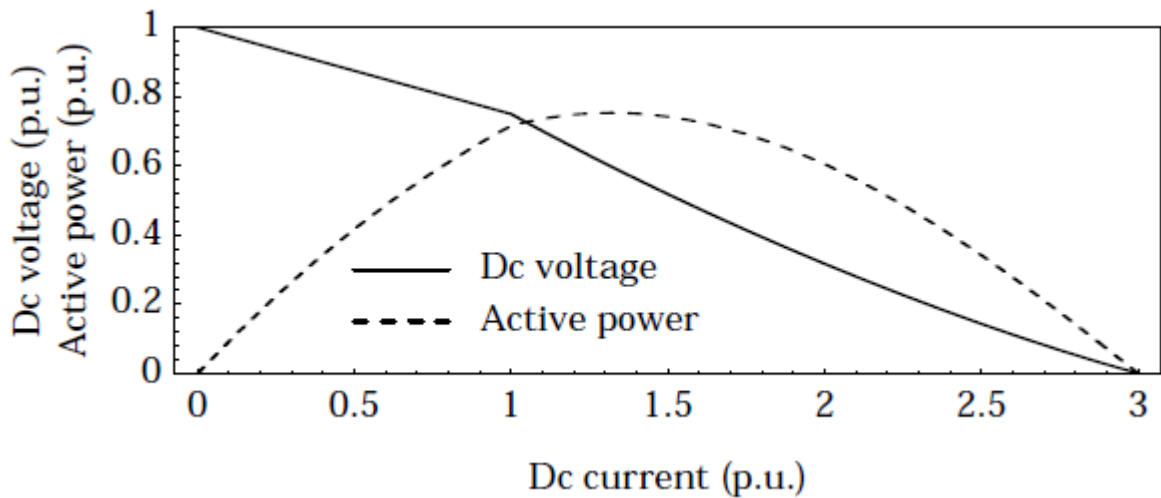
Jsou dva hlavní typy usměrňovačů, které se mohou použít pro různě-otáčkové generátory: neřízené a aktivní usměrňovače. Diodový (neřízený) usměrňovač je jednodušší, levnější a má větší účinnost než usměrňovač aktivní, ale nedokáže měnit fázový úhel proudu a, když je reaktance generátoru velká, generátor nebude dobře využit. Aktivní usměrňovač dokáže napájet generátor jalovým výkonem a tím pádem můžeme udržet malý fázový úhel mezi proudem a indukovaným napětím, umožňující vysokou momentovou hustotu, i když je reaktance vysoká (čerpáno z literatury [7]).

1.2.2 Diodový (neřízený) usměrňovač

Komutační úbytek napětí způsobí, že výstupní napětí diodového usměrňovače závisí na stejnosměrném proudu I_d . Proudové ve dvou fázích se překrývají v době, kdy dochází ke komutaci proudu z jedné fáze na druhou. Úroveň překrytí může být vyhodnocena pomocí elektrických stupňů a, je-li úhel překrytí menší než 60 stupňů, může být napětí U_d vypočteno následovně:

$$U_d = \frac{3}{\pi} \sqrt{2} U_{0s} - \frac{3}{\pi} X_a I_d \quad (1.1)$$

Kde U_{0s} je sdružené indukované napětí generátoru a X_a je magnetizační reaktance. Je-li úhel překrytí větší než 60 stupňů, bude diodový můstek zcela zkratován po nějakou část periody. Stejnosměrné napětí začne rychleji klesat se zvětšujícím se proudem, dokud nedosáhne nuly. Výstupní výkon jako funkce proudu může být počítán z výstupního napětí. Jelikož napětí vždy klesá s rostoucím proudem, bude při určité velikosti proudu výstupní činný výkon na maximální hodnotě, která nemůže být při dalším zvyšování proudu překročena. Výstupní napětí (Dc voltage) a činný výkon (Active power) diodového usměrňovače napájený generátorem s reaktancí 0,5 p.u. a nulovým odporem jsou znázorněny na *obrázku 1.4*. Průběhy napětí a činného výkonu jako funkce proudu budou vždy mít stejný tvar nezávisle na hodnotě magnetizační reaktance (čerpáno z literatury [7]).

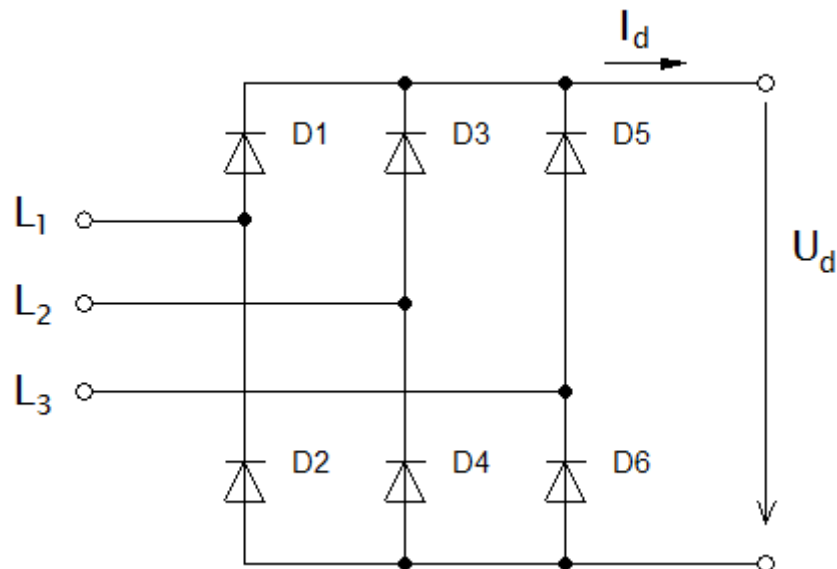


Obrázek 1.4: Výstupní napětí a činný výkon diodového usměrňovače (převzato z [7])

Generátor bude zatěžován přes neřízený trojfázový můstkový usměrňovač, zvýšená pozornost bude proto věnována v další části tomuto konkrétnímu typu usměrňovače.

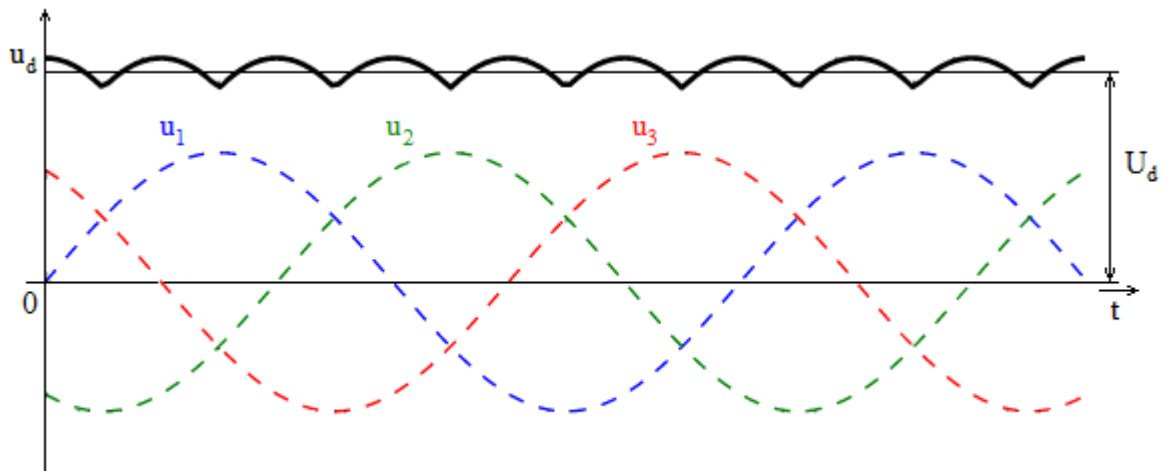
1.2.2.1 Neřízený trojfázový můstkový usměrňovač

Schéma neřízeného trojfázového můstkového usměrňovače je znázorněno na *obrázku 1.5*. Je tvořen z šesti diod, což jsou neřiditelné polovodičové prvky.

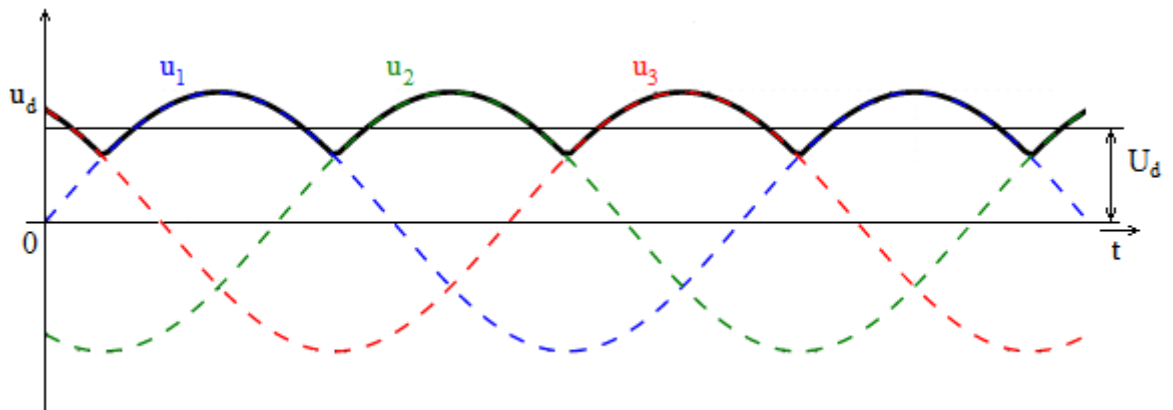


Obrázek 1.5: Neřízený trojfázový můstkový usměrňovač - schéma

Jak naznačuje *obrázek 1.6*, usměrněné napětí na výstupu usměrňovače U_d nikdy neklesá k nule (na rozdíl od usměrňovače jednofázového) a ve srovnání s usměrněným napětím trojfázového uzlového usměrňovače (*obrázek 1.7*) má dvojnásobný počet pulsů (tedy celkem šest pulsů za periodu) a tím pádem hladší průběh.



Obrázek 1.6: Usměrněné napětí trojfázového můstkového usměrňovače



Obrázek 1.7: Usměrněné napětí trojfázového uzlového usměrňovače

Střední hodnota napětí U_d trojfázového můstkového usměrňovače se vypočítá následovně [6]:

$$U_d = \frac{2}{2\pi/3} \int_{\pi/6}^{5\pi/6} u \, d\omega t = \frac{3}{\pi} \int_{\pi/6}^{5\pi/6} U_m \sin \omega t \, d\omega t = \frac{3}{\pi} \sqrt{2} U_{ef} \sqrt{3} = 2,34 U_{ef} \quad (1.2)$$

Výstupní napětí U_d je tedy asi 2,34 krát větší, než je fázová efektivní hodnota napětí U_{ef} na vstupu.

1.2.2.2 Aktivní usměrňovač

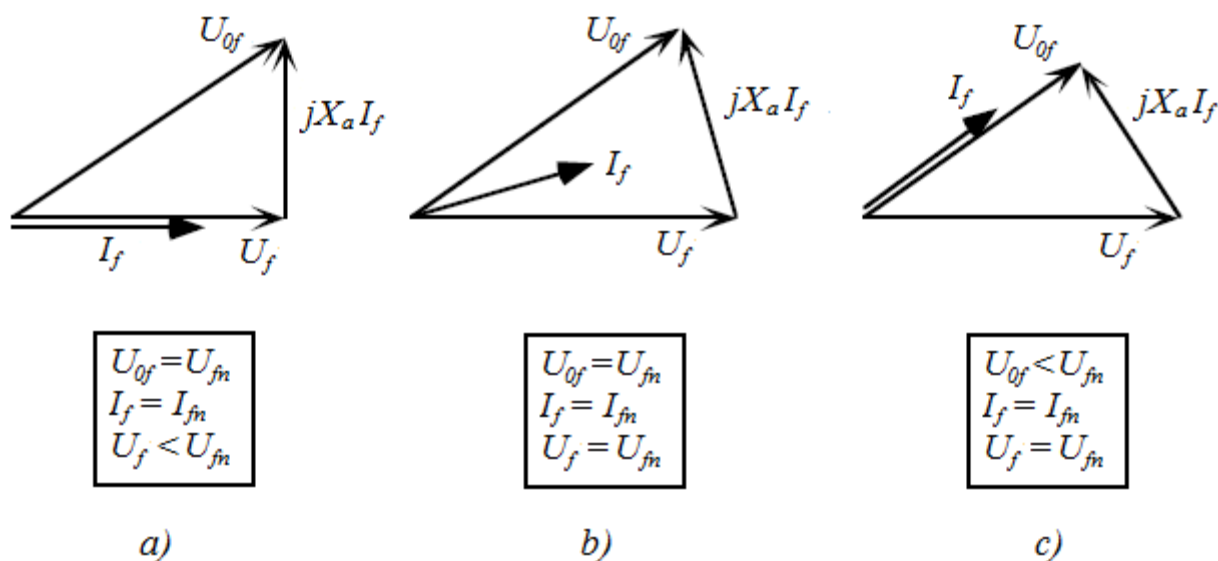
Je-li použit aktivní usměrňovač, může být velikost svorkového napětí nastavována pomocí jalového výkonu. Velikost výkonu generátoru je obvykle určena jmenovitým fázovým proudem I_{fn} a jmenovitým fázovým napětím U_{fn} a v závislosti na tom, jak je fázový úhel proudu nastavován, může činný výkon dosáhnout různých hodnot. Aby byl tedy činný výkon co nejvyšší, musí mít hodnoty napětí, proudu a účinníku maximální velikost.

Jak naznačují fázorové diagramy na *obrázku 1.8*, napětí na svorkách generátoru se dá řídit třemi základními způsoby (dle literatury [7]):

- Účinník $\cos \varphi = 1$ na svorkách a indukované napětí U_{of} je rovno jmenovité hodnotě fázového napětí U_{fn} .
- Fázové napětí U_f a indukované napětí U_{of} je rovno jmenovité hodnotě napětí U_{fn} .
- Proud I_f je ve fázi s indukovaným napětím U_{of} .

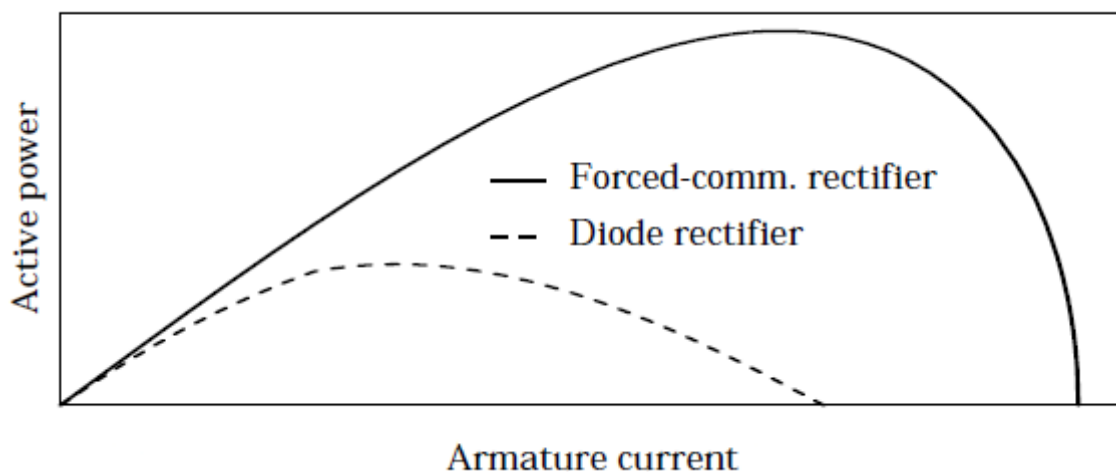
Zvýšením účinníku na maximální hodnotu (řízení *a*) se výkon nemaximalizuje, protože napětí na svorkách musí být nižší, než je indukované napětí. Místo toho je možné udržovat svorkové napětí na hodnotě indukovaného napětí při nezátíženém stavu (*b*) dodáváním jalového výkonu z usměrňovače. Tenhle způsob řízení maximalizuje činný výkon generátoru a usměrňovače se stejnou hodnotou *kVA*.

Je-li generátor navrhován s nižším indukovaným napětím, než je jmenovitá hodnota napětí, může být výkon zvýšen udržováním fázového úhlu mezi indukovaným napětím a fázovým proudem (*c*). Výhodou je menší využití magnetického materiálu oproti variantě *b*) a ztráty v železe v nezátíženém stavu jsou menší. Statorový tok je udržován vysoký jen při velkém zatížení dodáváním jalového výkonu do vinutí kotvy. Háček je ale v tom, že činný výkon nedosáhne nejvyšší hodnoty. Ten samý generátor by byl o něco výkonnější, kdyby se indukované napětí zvýšilo na hodnotu jmenovitého napětí a byl by použit způsob řízení *b*).



Obrázek 1.8: Fázorové diagramy generátoru (převzato z [7])

Na *obrázku 1.9* je zobrazen průběh činného výkonu (Active power) na proudu (Armature current) generátoru s aktivním usměřňovačem pro variantu řízení *b*) a jeho srovnání s průběhem u neřízeného usměřňovače. Zpočátku výstupní činný výkon roste lineárně s proudem, protože aktivní usměřňovač udržuje napětí na svorkách konstantní a účinník je skoro roven jedné. Při dalším zvyšování proudu účinník klesá (aktivní usměřňovač začíná dodávat jalový výkon) a výkon roste nelineárně, dokud nedosáhne maxima, kdy je zatěžovací úhel roven 90° . Pak s dalším zvyšováním proudu činný výkon klesá.



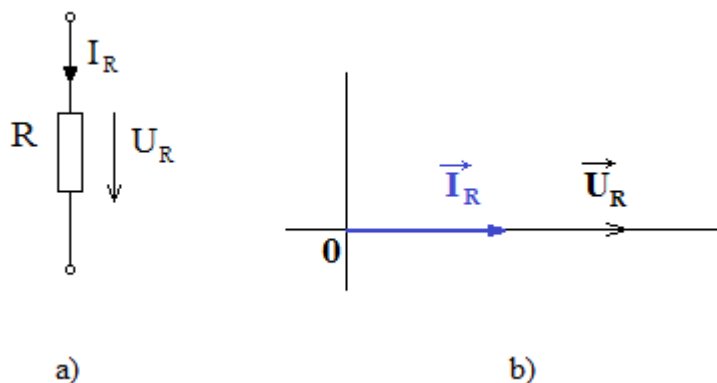
Obrázek 1.9: Průběh činného výkonu na fázovém proudu – srovnání aktivního a neřízeného usměřňovače (převzato z [7])

Ze srovnání charakteristik daných usměřňovačů (*obrázku 1.9*) vyplývá, že rozdíly ve velikostech činných výkonů závisejí na velikosti proudu generátoru.

1.3 Zátěže

1.3.1 R zátěž

Schematické označení a fázorový diagram odporové R zátěže je zobrazen na *obrázku 1.10*.



Obrázek 1.10: R zátěž - a) schéma b) fázorový diagram

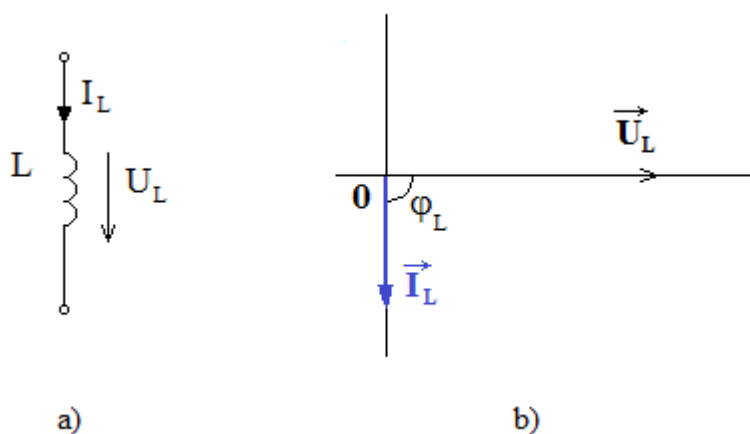
Pracuje-li generátor do symetrické čistě odporové zátěže, jsou průběhy napětí a proudu (v rámci jedné fáze) ve fázi.

Impedance Z_R a fáze φ_R :

$$|Z_R| = R \quad ; \quad \varphi_R = 0^\circ \quad (1.3 - 1.4)$$

1.3.2 L zátěž

Pod L zátěží se uvádí ideální cívka s indukčností. Náhradní schéma je na *obrázku 1.11 a*).



Obrázek 1.11: L zátěž - a) schéma b) fázorový diagram

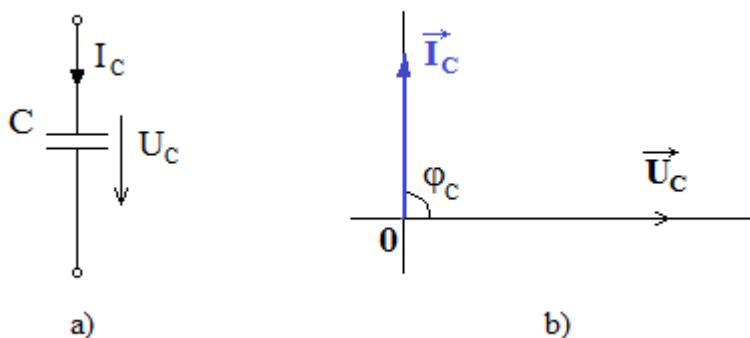
V ustáleném stavu se proud I_L opožďuje za napětím U_L , tedy je vůči napětí fázově posunutý a to o 90° (viz. fázorový diagram – obrázek 1.11 b)). Velikost impedance bude záviset nejen na indukčnosti L , ale i na kmitočtu ω .

Impedance Z_L a φ_L :

$$|Z_L| = X_L = \omega L \quad ; \quad \varphi_L = 90^\circ \quad (1.5 - 1.6)$$

1.3.3 C zátěž

Pod tento druh zátěže spadá ideální kondenzátor (schematická značka – *obrázek 1.12 a*).



Obrázek 1.12: C zátěž - a) schéma b) fázorový diagram

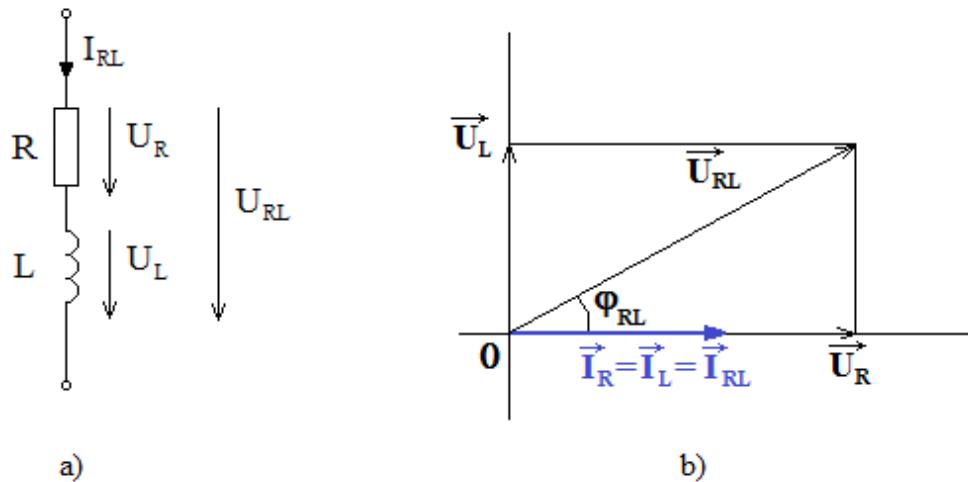
I zde je proud I_C fázově posunut vůči napětí U_C , ale na rozdíl od L zátěže proud naopak napětí předbíhá o 90° , tedy $\varphi_C = -90^\circ$ (viz. fázorový diagram – *obrázek 1.12 b*). Podobně jako v případě cívky, bude i zde velikost impedance záviset kromě kapacity C na kmitočtu ω .

Impedance Z_C a fáze φ_C :

$$|Z_C| = X_C = \frac{1}{\omega C} \quad ; \quad \varphi_C = -90^\circ \quad (1.7 - 1.8)$$

1.3.4 RL zátěž

Schematicky se RL zátěž značí jako sériové zapojení ideálního odporu a ideální cívky (*obrázek 1.13 a*).



Obrázek 1.13: *RL zátěž - a) schéma b) fázorový diagram*

Jelikož jsou oba prvky sériově zapojené, budou efektivní hodnoty proudů protékající oběma prvky stejné, platí:

$$I_R = I_L = I_{RL} \quad (1.9)$$

Pro efektivní hodnotu napětí U_{RL} bude platit:

$$U_{RL} = \sqrt{U_R^2 + U_L^2} \quad (1.10)$$

Impedance Z_{RL} :

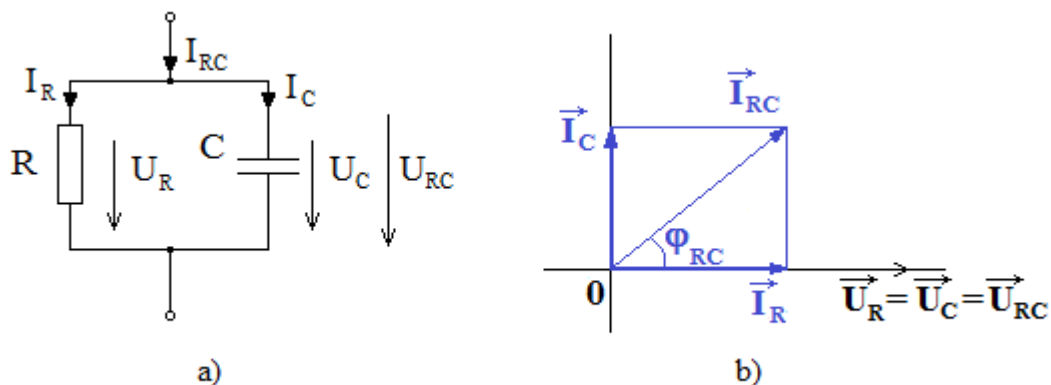
$$Z_{RL} = \sqrt{R^2 + X_L^2} = \sqrt{R^2 + (\omega L)^2} \quad (1.11)$$

Fázový posuv φ_{RL} nebude v tomto případě 90° (jako v případě ideální cívky), ale určí se následovně:

$$\tan \varphi_{RL} = \frac{U_L}{U_R} = \frac{X_L}{R} = \frac{\omega L}{R} \quad (1.12)$$

1.3.5 RC zátěž

Náhradní schéma je na *obrázku 1.14 a*). Jedná se o paralelní zapojení ideálního odporu a ideálního kondenzátoru.



Obrázek 1.14: RC zátěž - a) schéma b) fázorový diagram

Efektivní hodnoty napětí prvků jsou v paralelním zapojení stejná, platí:

$$U_R = U_C = U_{RC} \quad (1.13)$$

Pro efektivní hodnoty proudů platí podle fázorového diagramu (*obrázek 1.14 b*):

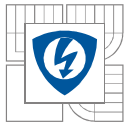
$$I_{RC} = \sqrt{I_R^2 + I_C^2} \quad (1.14)$$

Admittance Y_{RC} :

$$Y_{RC} = \sqrt{\left(\frac{1}{R}\right)^2 + \left(\frac{1}{X_C}\right)^2} = \sqrt{\left(\frac{1}{R}\right)^2 + (\omega C)^2} \quad (1.15)$$

Fáze φ_{RC} :

$$\tan \varphi_{RC} = -\frac{I_C}{I_R} = -\frac{\frac{1}{X_C}}{\frac{1}{R}} = -\omega RC \quad (1.16)$$



2 Matematický model PMSG

Matematický model PMSG je založen na zjednodušujících předpokladech:

- sinusový průběh magnetické indukce i indukovaného napětí ve vzduchové mezeře
- parametry (odpor R , indukčnost L) jsou konstantní a stejné v každé fázi
- zanedbány ztráty v železe
- absence tlumicích vinutí a zanedbání tlumicích účinků materiálu rotoru

Magnetické spřažené toky ψ_d, ψ_q :

$$\psi_d = L_d i_d + \psi_f \quad (2.1)$$

$$\psi_q = L_q i_q \quad (2.2)$$

Napěťové rovnice obecného synchronního stroje i s dosazením vztahů (2.1) a (2.2):

$$u_d = R i_d + \frac{d\psi_d}{dt} - \omega \psi_q = R i_d + L_d \frac{di_d}{dt} - \omega L_q i_q \quad (2.3)$$

$$u_q = R i_q + \frac{d\psi_q}{dt} + \omega \psi_d = R i_q + L_q \frac{di_q}{dt} + \omega (L_d i_d + \psi_f) \quad (2.4)$$

Pro generátor platí momentová rovnice:

$$-M_i = M_d - M_{mech.} \quad (2.5)$$

Kde pro dynamický moment M_d platí:

$$M_d = J \frac{d\omega}{dt} \quad (2.6)$$

Vnitřní moment M_i :

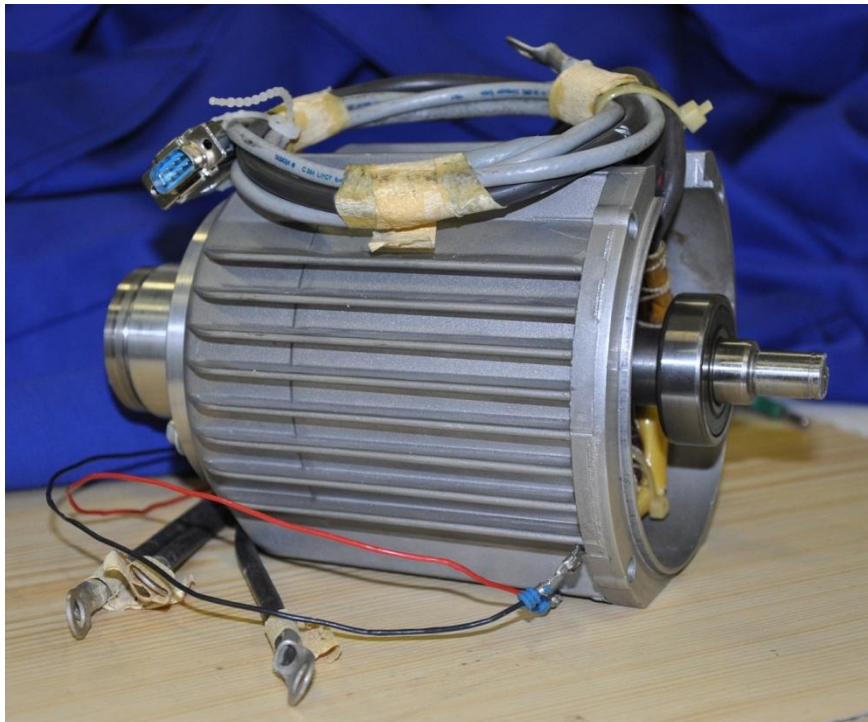
$$M_i = \frac{3}{2} p (\psi_d i_q - \psi_q i_d) = \frac{3}{2} p [\psi_f + (L_d - L_q) i_d] i_q \quad (2.7)$$

Mechanický moment $M_{mech.}$:

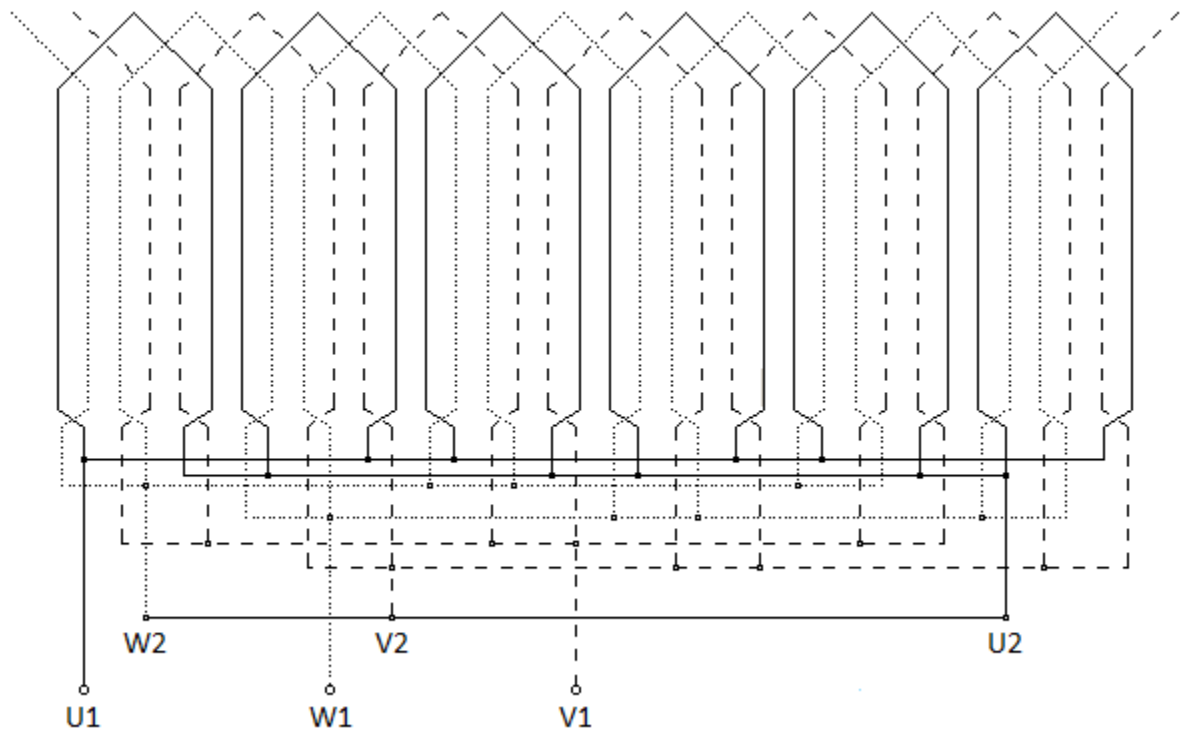
$$M_{mech.} = M_i + M_d = \frac{3}{2} p [\psi_f + (L_d - L_q) i_d] i_q + J \frac{d\omega}{dt} \quad (2.8)$$

2.1 Výpočet parametrů pro matematický model

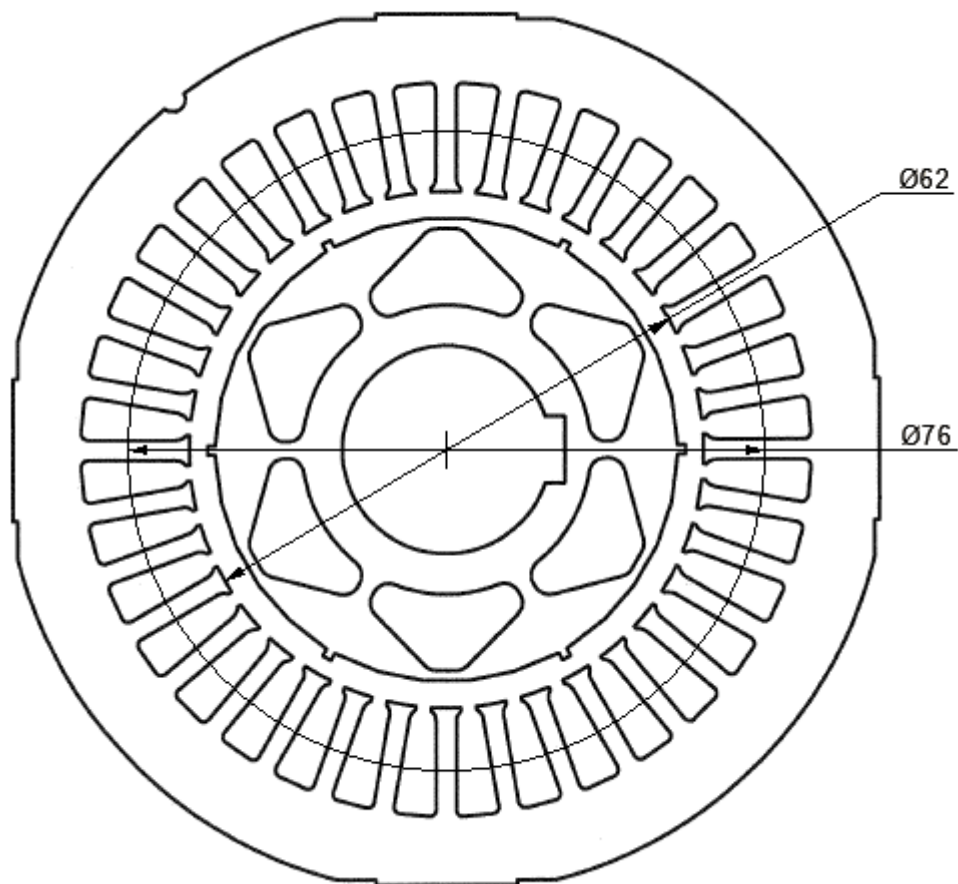
Výpočet parametrů vychází z rozměrů a konstrukce skutečného generátoru (*obrázek 2.1*), z vlastností použitých materiálů apod., které lze vyčíst z uvedených tabulek a příslušných náčrtů. Jedná se o šestipólový synchronní generátor s jednovrstvým vinutím spojeným do hvězdy (*obrázek 2.2*). Náčrt jeho řezu je na *obrázku 2.3*. Generátor vychází původně ze synchronního motoru, jehož štítkové hodnoty jsou uvedeny v *tabulce 2.1*. Údaje generátoru jsou uvedeny v *tabulce 2.2*, základní údaje použitého materiálu permanentních magnetů pak v *tabulce 2.3*.



Obrázek 2.1: Synchronní generátor s permanentními magnety



Obrázek 2.2: Satorové vinutí synchronního generátoru s permanentními magnety



Obrázek 2.3: Náčrt řezu synchronního generátoru s permanentními magnety

Tabulka 2.1: Štítkové hodnoty

Napětí	3x14 V
Proud	47 A
Otáčky	2600 min ⁻¹
Výkon	1 kW
Frekvence	130 Hz

Tabulka 2.2: Údaje synchronního generátoru s permanentními magnety

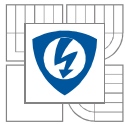
Počet pólových dvojic – p	3
Zapojení fází	Y
Jakost plechů	M400 – 50A
Aktivní délka stroje (mm) – L_i	60
Vnější průměr statoru (mm)	106,5
Vrtání statoru (mm) – D	62
Vzduchová mezera (mm) – g	0,8
Počet drážek na statoru – Q_1	36
Materiál permanentních magnetů	NdFeB 230/175W
Vinutí	jednovrstvé
Průměr drátu Cu (mm) – d	0,6
Počet závitů vinutí v sérii – N	13
Počet paralelních drátů – N_a	5
Počet paralelních větví – a	6
Krok vinutí elektrický/mechanický – y_e/y_m	6/5

Tabulka 2.3: Materiál permanentních magnetů NdFeB 230/175W

Magnetická indukce – B_r	1190 mT
Koercivita – H_c	890 kA/m
Teplotní koeficient mag. indukce	-0,1 %/K
Energetický produkt $(B \cdot H)_{\max}$	260 kJ/m ³
Maximální dovolená teplota	160 °C
Hustota	7,6 g/cm ³

Počet drážek na pól a fázi q_1 [1]:

$$q_1 = \frac{Q_1}{2 p m_1} = \frac{36}{2 \cdot 3 \cdot 3} = 2 \quad (2.9)$$



Činitel rozlohy k_{d1} [1]:

$$k_{d1} = \frac{\sin\left(\frac{\pi}{2m_1}\right)}{q_1 \sin\left(\frac{\pi}{2m_1q_1}\right)} = \frac{\sin\left(\frac{\pi}{2 \cdot 3}\right)}{2 \cdot \sin\left(\frac{\pi}{2 \cdot 3 \cdot 2}\right)} = 0,966 \quad (2.10)$$

Činitel kroku k_{p1} [1]:

$$k_{p1} = \sin\left(\frac{\pi}{2} \frac{y_e}{m q_1}\right) = \sin\left(\frac{\pi}{2} \frac{6}{3 \cdot 2}\right) = 1 \quad (2.11)$$

Činitel vinutí k_{w1} [1]:

$$k_{w1} = k_{d1}k_{p1} = 0,966 \cdot 1 = 0,966 \quad (2.12)$$

Pólová rozteč τ [1]:

$$\tau = \frac{\pi D}{2p} = \frac{\pi \cdot 62}{2 \cdot 3} = 32,46 \text{ mm} \quad (2.13)$$

Mezi parametry v této podkapitole se řadí odpor vinutí R , podélná indukčnost L_d , příčná indukčnost L_q a budící spřažený magnetický tok ψ_f .

2.1.1 Odpor vinutí R

V celkovém odporu R budeme uvažovat nejen odpor samotného vinutí R_s , ale taky dodatečný odpor vyvedených vývodů R_d . Jelikož se odpor drátů mění s teplotou, bude třeba celkový odpor ještě dále přepočítat. Provozní teplota v tomhle případě se bude uvažovat 70°C .

Poznámka: Veličiny označeny * jsou uvedeny v *tabulce 2.2*.

Odpor statorového vinutí při teplotě 20°C určíme podle vzorce:

$$R_{s20^\circ\text{C}} = \frac{N}{a \cdot N_a} \rho_{Cu20^\circ\text{C}} \frac{l_z}{S} \quad (2.14)$$

kde

N – počet závitů v sérii*

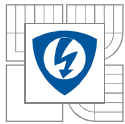
a – počet paralelních větví*

N_a – počet paralelních drátů*

$\rho_{Cu20^\circ\text{C}}$ – rezistivita mědi při 20°C

l_z – délka závitu

S – průřez drátu



Délku závitu l_z určíme ze vztahu:

$$l_z = 2(l_{\xi} + L_i) \quad (2.15)$$

kde

l_{ξ} – délka čela vinutí

L_i – aktivní délka stroje*

Délka čela l_{ξ} :

$$l_{\xi} = k_{\xi} \pi D_{\xi} \frac{y_m}{Q_1} = 1,7 \cdot \pi \cdot 76 \cdot \frac{5}{36} = 56,374 \text{ mm} \quad (2.16)$$

kde

k_{ξ} – je činitel délky čel (1,7)

D_{ξ} – střední drážkový průměr (určeno z obrázku 2.3)

y_m – mechanický krok vinutí*

Q_1 – počet drážek*

Délka závitu dle vztahu (2.15) potom je:

$$l_z = 2(56,374 + 60) = 232,75 \text{ mm}$$

Průřez drátu S :

$$S = \pi \frac{d^2}{4} = \pi \frac{0,6^2}{4} = 0,283 \text{ mm}^2 \quad (2.17)$$

kde

d – průměr měděného drátu bez izolace*

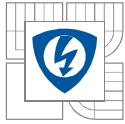
Odpor vinutí při teplotě 20°C je tedy dle vztahu (2.14):

$$R_{s20^{\circ}\text{C}} = \frac{13}{6 \cdot 5} \cdot 1,77 \cdot 10^{-8} \frac{0,23275}{0,283 \cdot 10^{-6}} = 6,31 \cdot 10^{-3} \Omega = 6,31 \text{ m}\Omega$$

Dodatečný odpor R_d vývodů při 20°C (délka $l_v = 0,6 \text{ m}$):

$$R_{d20^{\circ}\text{C}} = \frac{1}{a \cdot N_a} \rho_{Cu20^{\circ}\text{C}} \frac{l_v}{S} \quad (2.18)$$

$$R_{d20^{\circ}\text{C}} = \frac{1}{6 \cdot 5} \cdot 1,77 \cdot 10^{-8} \frac{0,6}{0,283 \cdot 10^{-6}} = 1,25 \cdot 10^{-3} \Omega = 1,25 \text{ m}\Omega$$



Celkový odpor R při teplotě 20°C :

$$R_{20^{\circ}\text{C}} = R_{s20^{\circ}\text{C}} + R_{d20^{\circ}\text{C}} = 6,31 + 1,25 = 7,56 \text{ m}\Omega \quad (2.19)$$

Přepoččet odporu na teplotu 70°C

$$R_{70^{\circ}\text{C}} = R_{20^{\circ}\text{C}}(1 + \alpha\Delta T) = 7,56[1 + 0,00392 \cdot (70 - 20)] = 9,04 \text{ m}\Omega \quad (2.20)$$

kde

α – teplotní součinitel elektrického odporu mědi (tabulková hodnota)

ΔT – teplotní rozdíl

2.1.2 Podélná a příčná indukčnost L_d, L_q

Pro synchronní stroj s vyniklými póly se indukčnosti pro d-osu a q-osu určí podle těchto vztahů (všechny vzorce v podkapitole jsou čerpány z literatury [1]):

$$L_d = L_1 + L_{ad} \quad (2.21)$$

$$L_q = L_1 + L_{aq} \quad (2.22)$$

kde

L_1 – rozptylová indukčnost

L_{ad} – magnetizační indukčnost d-osy

L_{aq} – magnetizační indukčnost q-osy

2.1.2.1 Výpočet rozptylové indukčnosti L_1

Rozptylovou indukčnost L_1 vypočítáme z rozptylové reaktance X_l dle vztahu:

$$L_1 = \frac{X_l}{\omega} \quad (2.23)$$

Pro reaktanci X_l platí:

$$X_l = 4\pi\mu_0 f \frac{N^2 L_i}{pq_1} \left(\lambda_{1s} + \frac{l_{\check{c}}}{L_i} \lambda_{1e} + \lambda_{1d} + \lambda_{1f} \right) \quad (2.24)$$

kde

μ_0 – permeabilita vakua

f – frekvence

p – počet pólových dvojic

q_1 – počet drážek na pól a fázi

λ_{1s} – jednotková magnetická vodivost drážky statoru

λ_{1e} – jednotková magnetická vodivost čel vinutí

λ_{1d} – jednotková magnetická vodivost diferenčního rozptylu

λ_{1f} – jednotková magnetická vodivost mezi hlavami zubů

Po dosazení do vztahu (2.23) platí:

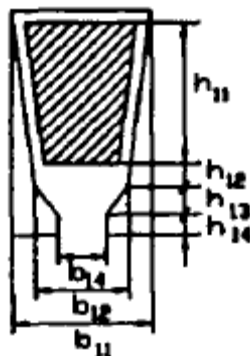
$$L_1 = 2\mu_0 \frac{N^2 L_i}{pq_1} \left(\lambda_{1s} + \frac{l_{\check{c}}}{L_i} \lambda_{1e} + \lambda_{1d} + \lambda_{1f} \right) \quad (2.25)$$

Výpočet jednotkové magnetické vodivosti drážky statoru λ_{1s} závisí na typu drážky. Daný stroj má částečně otevřenou lichoběžníkovou drážku (obrázek 2.4), která se počítá podle vztahu:

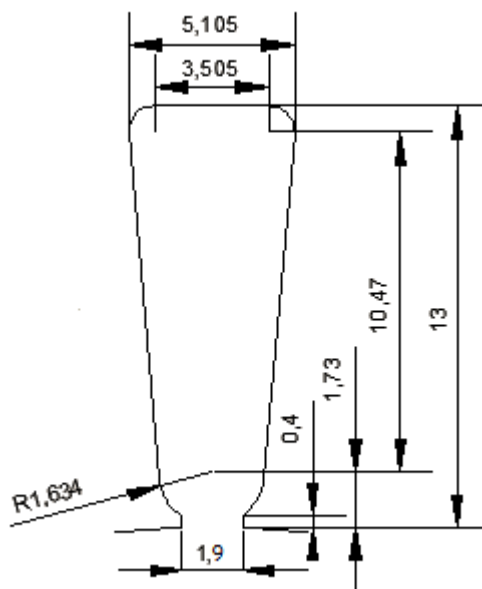
$$\lambda_{1s} = \frac{h_{11}}{3b_{12}} k_t + \frac{h_{12}}{b_{12}} + \frac{2h_{13}}{b_{12} + b_{14}} + \frac{h_{14}}{b_{14}} \quad (2.26)$$

kde

$$k_t = 3 \frac{4t^2 - t^4(3 - 4 \ln t) - 1}{4(t^2 - 1)(t - 1)} ; \quad t = \frac{b_{11}}{b_{12}} \quad (2.27 - 2.28)$$



Obrázek 2.4: Částečně otevřená lichoběžníková drážka [1]



Obrázek 2.5: Náčrt drážky statoru

Podle obrázku 2.4 se určí příslušná hodnota z obrázku 2.5 a dosadí se do vztahů (2.26) až (2.28).

$$h_{11} = 10,4 \text{ mm} ; h_{12} = 0,471 \text{ mm} ; h_{13} = 1,73 \text{ mm} ; h_{14} = 0,4 \text{ mm} ;$$

$$b_{11} = 5,105 \text{ mm} ; b_{12} = 3,266 \text{ mm} ; b_{14} = 1,9 \text{ mm}$$

$$t = \frac{5,105}{3,266} = 1,563$$

$$k_t = 3 \frac{4 \cdot 1,563^2 - 1,563^4(3 - 4 \ln 1,563) - 1}{4(1,563^2 - 1)^2(1,563 - 1)} = 0,978$$

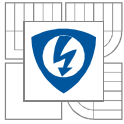
$$\lambda_{1s} = \frac{10,4}{3 \cdot 3,266} 0,978 + \frac{0,471}{3,266} + \frac{2 \cdot 1,73}{3,266 + 1,9} + \frac{0,4}{1,9} = 2,063$$

Pro jednotkovou magnetickou vodivost čel vinutí λ_{1e} se použije jednoduchý vztah pro jednovrstvá vinutí:

$$\lambda_{1e} = 0,2 \cdot q_1 = 0,2 \cdot 2 = 0,4 \quad (2.29)$$

Jednotkovou magnetickou vodivost diferenčního rozptylu λ_{1d} se vypočte dle vztahu:

$$\lambda_{1d} = \frac{m_1 q_1 \tau k_{w1}^2}{\pi^2 g k_C k_{sat.}} \tau_{d1} \quad (2.30)$$



kde

g – vzduchová mezery

k_C – Carterův činitel (pro uvažovaný generátor má hodnotu 1,033)

$k_{sat.}$ – činitel nasycení

k_{w1} – činitel vinutí

τ – pólová rozteč

τ_{d1} – diferenční činitel

Činitel nasycení se uvažuje $k_{sat.} = 1$. Vztah se potom zjednoduší na vztah:

$$\lambda_{1d} = \frac{m_1 q_1 \tau k_{w1}^2}{\pi^2 g k_C} \tau_{d1} \quad (2.31)$$

Diferenční činitel τ_{d1} :

$$\tau_{d1} = \frac{\pi^2(10q_1^2 + 2)}{27} \left[\sin \frac{30^\circ}{q_1} \right]^2 - 1 = \frac{\pi^2(10 \cdot 2^2 + 2)}{27} \left[\sin \frac{30^\circ}{2} \right]^2 - 1 = 0,0284 \quad (2.32)$$

Jednotková magnetická vodivost diferenčního rozptylu – číselně:

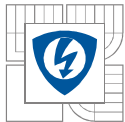
$$\lambda_{1d} = \frac{3 \cdot 2 \cdot 32,46 \cdot 0,966^2}{\pi^2 \cdot 0,8 \cdot 1,033} \cdot 0,0284 = 0,633$$

Jednotková magnetická vodivost mezi hlavami zubů λ_{1f} :

$$\lambda_{1f} = \frac{5 \frac{g}{b_{14}}}{5 + 4 \frac{g}{b_{14}}} = \frac{5 \cdot \frac{0,8}{1,9}}{5 + 4 \cdot \frac{0,8}{1,9}} = 0,315 \quad (2.33)$$

Dosažením vypočtených hodnot jednotkových magnetických vodivostí do vztahu (2.25) se získá hodnota rozptylové indukčnosti L_1 :

$$L_1 = 2 \cdot 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot \frac{13^2 \cdot 0,06}{3 \cdot 2} \left(2,063 + \frac{56,374}{60} \cdot 0,4 + 0,633 + 0,315 \right)$$
$$L_1 = 14,38 \mu H$$



2.1.2.2 Magnetizační indukčnosti L_{ad} a L_{aq}

Magnetizační indukčnosti pro d-osu i q-osu:

$$L_{ad} = \frac{X_{ad}}{\omega} = \frac{4m_1\mu_0 f \frac{(N k_{w1})^2 \tau L_i}{\pi p} \frac{1}{g'_d}}{2\pi f} = 2m_1\mu_0 \frac{(N k_{w1})^2 \tau L_i}{\pi^2 p} \frac{1}{g'_d} \quad (2.34)$$

$$L_{aq} = \frac{X_{aq}}{\omega} = 2m_1\mu_0 \frac{(N k_{w1})^2 \tau L_i}{\pi^2 p} \frac{1}{g'_q} \quad (2.35)$$

Kde

X_{ad} – magnetizační reaktance d-osy

X_{aq} – magnetizační reaktance q-osy

g' – ekvivalentní vzduchová mezera v příslušné ose

Ekvivalentní vzduchová mezera g' :

$$g' = g k_C k_{sat.} + \frac{h_M}{\mu_r} \quad (2.36)$$

Po zjednodušení ($k_{sat.}=1$)

$$g' = g k_C + \frac{h_M}{\mu_r} \quad (2.37)$$

kde

h_M – výška magnetů

μ_r – relativní permeabilita materiálu, nebo prostředí

Ekvivalentní vzduchová mezera pro d-osu:

$$g'_d = g k_C + \frac{h_M}{\mu_{r1}} \quad (2.38)$$

Aby se vypočítala ekvivalentní vzduchová mezera d-osou, je nutné nejdřív určit relativní permeabilitu μ_{r1} použitých magnetů NdFeB 230/175 W. Ta se určí ze známého vztahu:

$$B_r = \mu_0 \mu_{r1} H_c \quad (2.39)$$

kde

μ_{r1} – relativní permeabilita použitého magnetického materiálu

B_r – magnetická indukce

H_c – koercivita magnetů

Hodnoty magnetické B_r a koercivity H_c jsou uvedeny v tabulce 3.3.

Po úpravách a dosazení:

$$\mu_{r1} = \frac{B_r}{\mu_0 H_c} = \frac{1,19}{4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 890 \cdot 10^3} = 1,064 \quad (2.40)$$

Ekvivalentní vzduchová mezera pro d-osu – číselně:

$$g'_d = 0,8 \cdot 1,033 + \frac{2,5}{1,064} = 3,176 \text{ mm}$$

Ekvivalentní vzduchová mezera pro q-osu procházející prostorem mezi magnety (vzduchem):

$$g'_q = g k_c + \frac{h_M}{\mu_{r2}} = 0,8 \cdot 1,033 + \frac{2,5}{1} = 3,326 \text{ mm} \quad (2.41)$$

Magnetizační indukčnosti L_{ad} a L_{aq} – číselně:

$$L_{ad} = 2 \cdot 3 \cdot 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot \frac{(13 \cdot 0,966)^2}{\pi^2 \cdot 3} \frac{32,43 \cdot 10^{-3} \cdot 0,06}{3,176 \cdot 10^{-3}} = 24,60 \mu H$$
$$L_{aq} = 2 \cdot 3 \cdot 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot \frac{(13 \cdot 0,966)^2}{\pi^2 \cdot 3} \frac{32,43 \cdot 10^{-3} \cdot 0,06}{3,326 \cdot 10^{-3}} = 23,49 \mu H$$

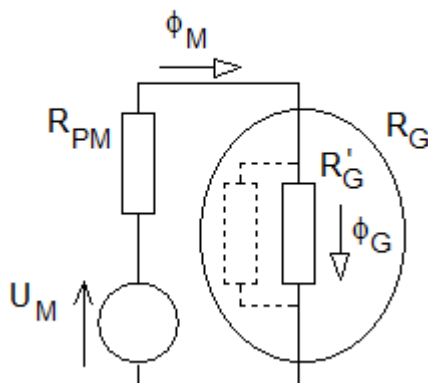
Výsledná podélná indukčnost L_d (d-osa) a příčná indukčnost L_q (q-osa):

$$L_d = 14,38 + 24,60 = 38,98 \mu H$$

$$L_q = 14,38 + 23,49 = 37,87 \mu H$$

2.1.3 Budící magnetický spřažený tok ψ_f

K určení budícího magnetického spřaženého toku permanentních magnetů je nutné nejdříve určit magnetický tok ϕ_M . Při jeho určování se vychází z úvahy lineárního magnetického obvodu (tj. bez nelineárních feromagnetických částí), který se dá popsat pomocí Theveninova ekvivalentního magnetického obvodu, jak je naznačeno na *obrázku 2.6* [3].



Obrázek 2.6: Theveninův ekvivalentní magnetický obvod

Podle schématu platí Hopkinsonův zákon:

$$\phi_M = \frac{U_M}{R_{PM} + R_G} \quad (2.42)$$

kde

U_M – magnetomotorické napětí

R_{PM} – magnetický odpor permanentních magnetů

R_G – magnetický odpor vzduchové mezery

Magnetomotorické napětí U_M se vypočítá podle vztahu:

$$U_M = H_c l \quad (2.43)$$

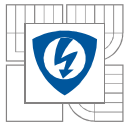
Koercivita H_c se určí ze vztahu (2.39) pro magnetickou indukci. Délka l v tomto případě se bude uvažovat jako výška magnetů h_M . Vztah se tedy upraví na:

$$U_M = \frac{B_r}{\mu_0 \mu_{r1}} h_M \quad (2.44)$$

Protože s teplotou se mění magnetické vlastnosti magnetického obvodu, je nutné brát v úvahu taky vliv teploty a přepočítat hodnotu magnetické indukce B_r . Provozní teplota magnetického obvodu se bude uvažovat 100°C a přepočet se provede podle následujícího vztahu [3]:

$$B_{r100^\circ C} = B_{r20^\circ C} (1 + \alpha_{Br} \Delta T) \quad (2.45)$$

$$B_{r100^\circ C} = 1,19 \left[1 + \left(-\frac{0,1}{100} \right) (100 - 20) \right] = 1,0948 T$$



kde

α_{Br} – teplotní součinitel magnetické indukce (uvedeno v *tabulce 2.3*)

Magnetický odpor se určí obecně podle vzorce:

$$R_m = \frac{l}{\mu_0 \mu_r A} \quad (2.46)$$

kde

l – délka (tloušťka) daného materiálu, nebo prostředí

A – průřez (povrch) daného materiálu, nebo prostředí

Analogicky pro magnetický odpor permanentních magnetů R_{PM} , kde pro délku l se uvažuje výška magnetů h_M , a vzduchové mezery R_G , kde za l se dosadí velikost vzduchové mezery g , platí následující vztahy:

$$R_{PM} = \frac{h_M}{\mu_0 \mu_{r1} A_M}; R_G = \frac{g}{\mu_0 \mu_{r2} A_G} \quad (2.47-2.48)$$

Magnetickým odporem vzduchové mezery R_G se rozumí oblast vzduchu nad povrchem magnetu. Průřez vzduchové mezery A_G tedy bude roven povrchu magnetu a ten se určí dle vztahu:

$$A_M = A_G = k_k \tau L_i = 0,839 \cdot 32,46 \cdot 10^{-3} \cdot 0,06 = 1,634 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2 \quad (2.49)$$

kde

k_k – pólový krytí (pro uvažovaný generátor – 0,839)

Dosazením vztahů (2.42), (2.45) a (2.46) do vztahu (2.40) pro magnetický tok ϕ_M se dostane následující tvar:

$$\phi_M = \frac{\frac{B_{r100^\circ\text{C}}}{\mu_0 \mu_{r1}} h_M}{\frac{h_M}{\mu_0 \mu_{r1} A_M} + \frac{g}{\mu_0 \mu_{r2} A_G}} = \frac{\frac{B_{r100^\circ\text{C}}}{\mu_{r1}} h_M A_M}{\frac{h_M}{\mu_{r1}} + \frac{g}{\mu_{r2}}} \quad (2.50)$$

Číselně:

$$\phi_M = \frac{\frac{1,0948}{1,064} \cdot 2,5 \cdot 10^{-3} \cdot 1,634 \cdot 10^{-3}}{\frac{2,5 \cdot 10^{-3}}{1,064} + \frac{0,8 \cdot 10^{-3}}{1}} = 1,335 \text{ mWb}$$

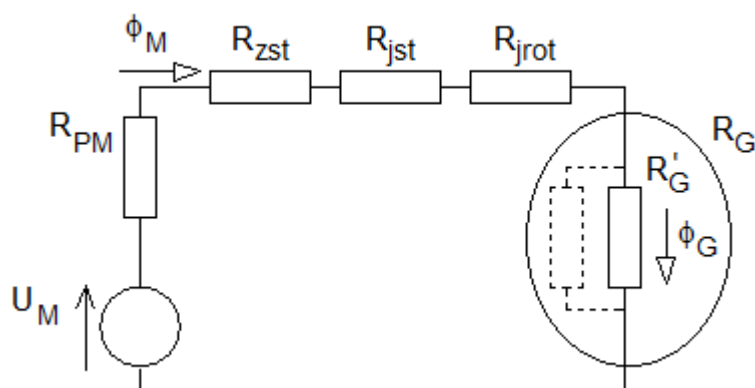
Magnetický tok lineárního magnetického obvodu procházející vzduchovou mezerou ϕ_G :

$$\phi_G = k_r \cdot \phi_M = 0,95 \cdot 1,335 = 1,268 \text{ mWb} \quad (2.51)$$

kde

k_r – rozptylový činitel

Skutečný magnetický obvod je ale nelineární a určování magnetického toku v něm je značně složitější. Zatím se při výpočtu uvažoval pouze magnetický odpor permanentních magnetů R_{PM} a vzduchové mezery R_G . Pro přesnější určení magnetického toku nelineárního magnetického obvodu je třeba započítat ještě magnetické odpory feromagnetických částí, jako je například magnetický odpor zubu statoru R_{zst} , jha statoru R_{jst} a jha rotoru R_{jrot} . Upravené schéma Theveninova ekvivalentního magnetického obvodu pro nelineární obvod je na obrázku 2.7.



Obrázek 2.7: Upravené schéma pro nelineární magnetický obvod

Vztah (2.42) se pak podle obrázku 2.7 upraví na:

$$\phi_M = \frac{U_M}{R_{PM} + R_{zst} + R_{jst} + R_{jrot} + R_G} \quad (2.52)$$

U magnetických odporů feromagnetických částí (tj. zub statoru, jho statoru a jho rotoru) je relativní permeabilita μ_r závislá na velikosti magnetické indukce B a tím pádem i na magnetickém toku. Jedním z postupů řešení je použití iterací, kdy pro zvolenou hodnotu magnetického toku se vypočte celkový magnetický odpor obvodu, pomocí kterého se určí nová hodnota magnetického toku, z které se určí zpřesněná hodnota magnetického odporu atd. Celý postup se opakuje, dokud není změna magnetického toku dostatečně malá.

Postup výpočtu je tedy zdoluhavý a komplikovaný a zasloužil by zpracování na samostatné téma. Výsledná hodnota magnetického toku nelineárního magnetického obvodu ϕ'_G dosažená touto metodou nakonec je:

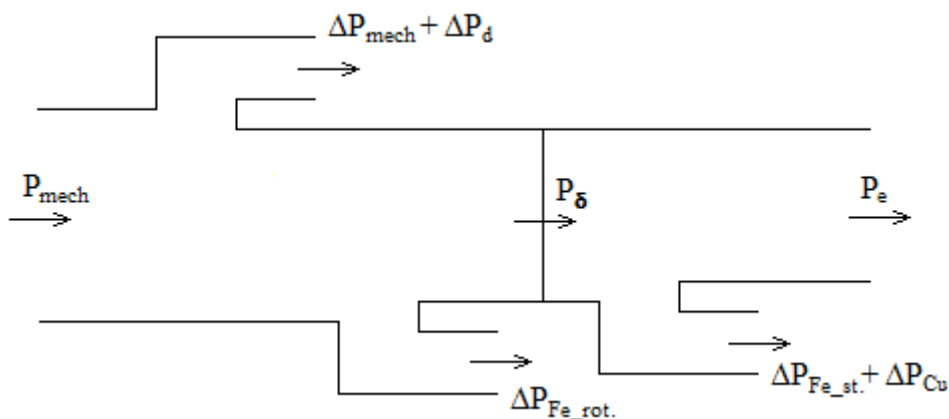
$$\phi'_G = 1,02 \text{ mWb}$$

Výsledný budící spřažený tok ψ_f :

$$\psi_f = N \cdot k_{w1} \cdot \phi'_G = 13 \cdot 0,966 \cdot 1,02 \cdot 10^{-3} = 12,81 \text{ mWb} \quad (2.53)$$

2.2 Ztráty

Matematický model v dq osách uvažuje pouze ztráty v mědi ΔP_{Cu} . Bylo by vhodné pro úplnost model doplnit i o ostatní ztráty a nechat je všechny vyčíslit. Na *obrázku 2.8* je znázorněn diagram toku výkonu synchronního generátoru s permanentními magnety s uvažováním všech ztrát.



Obrázek 2.8: Diagram toku výkonu PMSG

Podle něj platí:

$$P_{mech} = P_e + \Delta P_{Cu} + \Delta P_{Fe_{rot}} + \Delta P_{Fe_{st}} + \Delta P_{mech} + \Delta P_d \quad (2.54)$$

kde:

P_{mech} – mechanický příkon

P_e – elektrický výkon

ΔP_{Cu} – Joulovy ztráty vinutí na statoru

$\Delta P_{Fe_{rot}}$ – ztráty v železe magnetického obvodu rotoru

$\Delta P_{Fe_{st}}$ – ztráty v železe magnetického obvodu statoru

ΔP_{mech} – mechanické ztráty

ΔP_d – dodatečné ztráty

Joulovy ztráty ve vinutí ΔP_{Cu} vypočteme klasicky podle vztahu:

$$\Delta P_{Cu} = 3RI_{ef}^2 \quad (2.55)$$

kde

R – odpor vinutí statoru

I_{ef} – efektivní hodnota proudu

Ztráty v železe charakterizují v magnetickém obvodu ztráty hysterezní a ztráty vířivými proudy.

$$\Delta P_{Fe} = \Delta P_h + \Delta P_v \quad (2.56)$$

kde

ΔP_h – hysterezní ztráty

ΔP_v – ztráty vířivými proudy

Hysterezní ztráty a ztráty vířivými proudy se vypočítají dle následujících vztahů:

$$\Delta P_h = k_h f B_m^n m \quad (2.57)$$

$$\Delta P_v = k_v f^2 B_m^2 m \quad (2.58)$$

kde

k_h – činitel hysterezních ztrát závisící na materiálu a tloušťce plechů

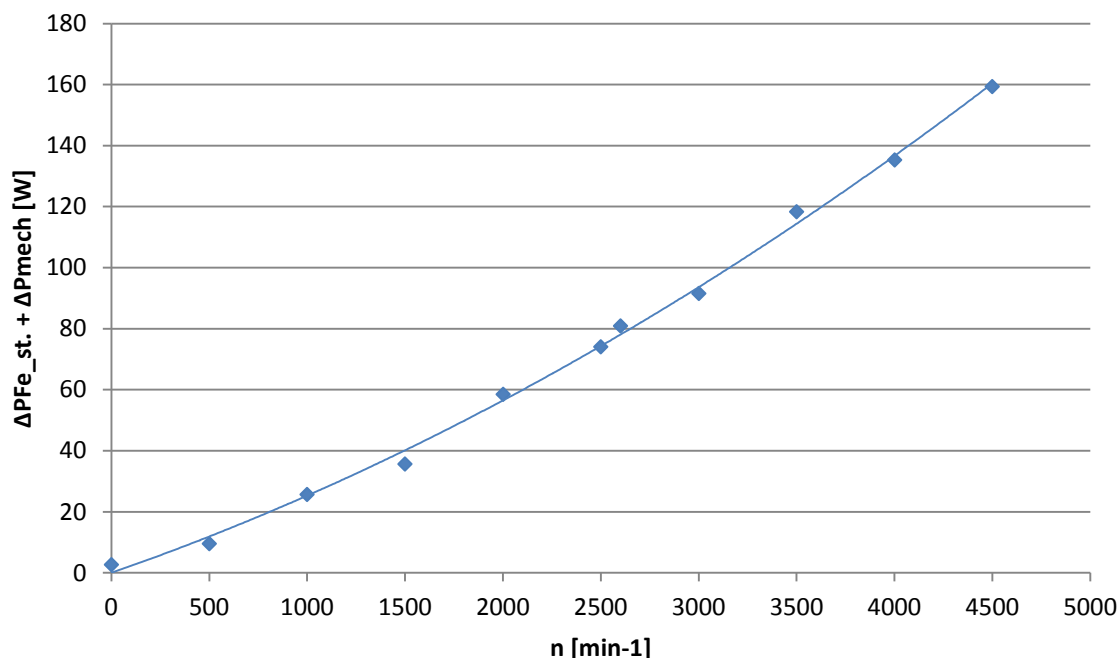
k_v – činitel ztrát vířivých proudů závisící na materiálu a tloušťce plechů

f – frekvence

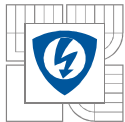
B_m – amplituda magnetické indukce

m – hmotnost železa

Ztráty v železe magnetického obvodu rotoru $\Delta P_{Fe_{rot}}$ jsou zanedbatelné, není nutné se jimi dále zabývat. Ztráty v železe statoru $\Delta P_{Fe_{st}}$ by se daly vyčíslit dle uvedených vztahů, ale určení některých veličin je komplikované a je to nad rámec této práce. Ztráty v železe $\Delta P_{Fe_{st}}$ se tedy spolu s mechanickými ztrátami ΔP_{mech} určí pomocí grafu charakteristiky naprázdno získaného z měření (obrázek 2.9), z kterého se potom určí příslušná hodnota $\Delta P_{Fe_{st}} + \Delta P_{mech}$ podle hodnoty otáček n .



Obrázek 2.9: Ztráty při stavu naprázdno



Dodatečné ztráty ΔP_d charakterizující například ztráty vyššími harmonickými apod. vyčíslíme následovně (hodnota 1,5% stanovena pracovníkem JULI Motorenwerk s.r.o.):

$$\Delta P_d = 1,5\% P_e = 0,015 \cdot P_e \quad (2.59)$$

3 Model PMSG v programu Matlab/Simulink

Kapitola se zabývá realizací matematického modelu PMSG v programu Matlab/Simulink a to ve dvou variantách: dq modelu a zjednodušeného modelu. Simulacemi se zde provede analýza výstupních charakteristik PMSG pro zapojení bez usměrňovače, s neřízeným usměrňovačem a aktivním usměrňovačem s různými zátěžemi. Simulace se bude týkat pouze ustáleného chodu generátoru bez dynamických dějů, jako je rozběh apod.

3.1 Matematický model v dq – osách

Schéma matematického modelu PMSG v dq – osách je uvedený na *obrázku 3.1*. Je sestaven na základě rovnic 2.3 až 2.8 (*viz. kapitola 2*) a upraven tak, že vstupní veličinou jsou otáčky generátoru n a výstupní veličinou mechanický moment M_{mech} . Celkový model (bez usměrňovače), v němž budou probíhat simulace, je pak na *obrázku 3.2*. Ten se skládá z matematické části a z fyzikální části. Matematická část je tvořena hlavně matematickým modelem PMSG a doplňujícími výpočty (přepočítání napětí a proudů na efektivní hodnoty, elektrický výkon – uvedeno níže, ztráty podle podkapitoly 2.2). Fyzikální část pak zahrnuje zátěž.

Hodnoty napětí a proudů z dq os na efektivní hodnoty se přepočítají dle vztahů:

$$U_{ef} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{u_d^2 + u_q^2} \quad (3.1)$$

$$I_{ef} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{i_d^2 + i_q^2} \quad (3.2)$$

Elektrický výkon se spočítá pak následujícím způsobem:

$$P_e = 3U_{ef}I_{ef} \quad (3.3)$$

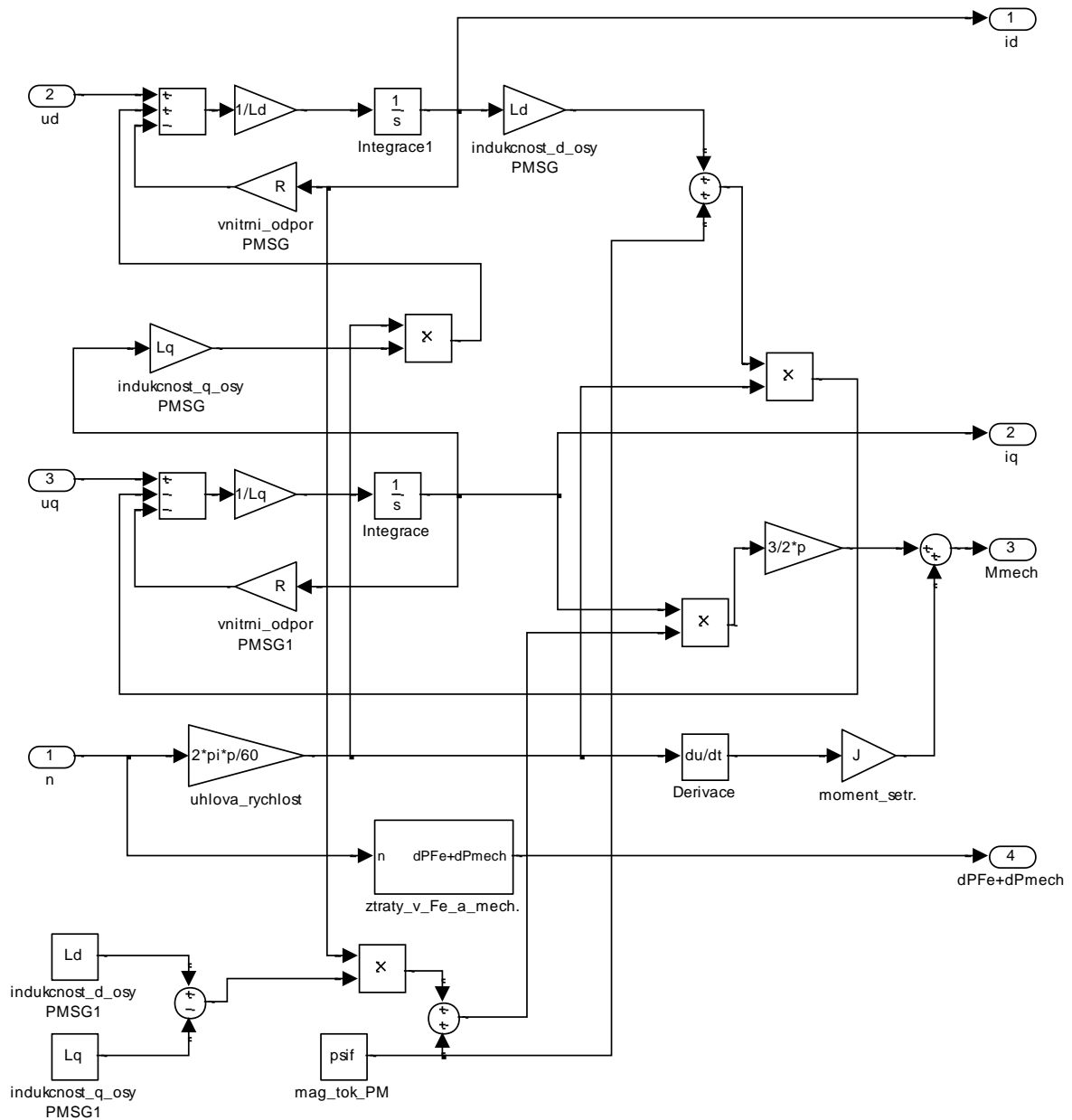
Vztah pro elektrický výkon (3.3) se dá aplikovat pouze v případě čistě odporové zátěže R , kdy je účinník $\cos \varphi$ roven jedné, v jiných situacích se jeho použitím spočítá výkon zdánlivý, který je ale pro účely práce nepotřebný. V ostatních případech se činný výkon určí z jeho okamžitého výkonu p_e .

$$P_e = \frac{1}{T} \int_0^T p_e dt \quad (3.4)$$

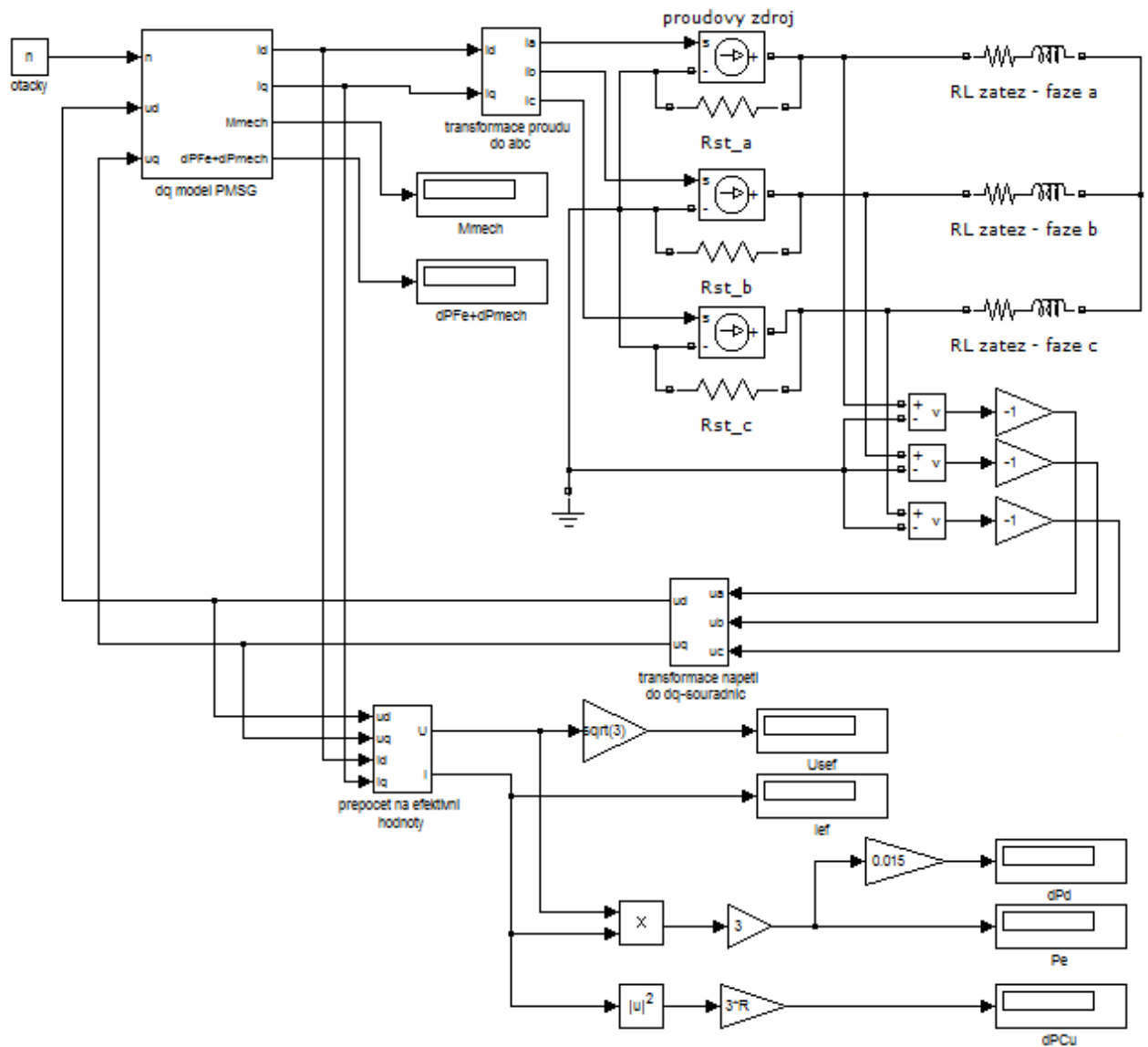
Kde se okamžitý výkon vypočítá vynásobením okamžitého napětí u a okamžitého proudu i .

$$p_e = u i \quad (3.5)$$

Ty se získají z průběhů fyzikální části.

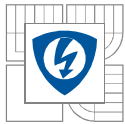


Obrázek 3.1: Schéma matematického modelu PMSG v Simulinku



Obrázek 3.2: Celkový model

Poznámka: Stabilizační odpory R_{st_a} , R_{st_b} a R_{st_c} jsou připojeny paralelně k proudovým zdrojům za účelem bezproblémového chodu simulace. Jejich vliv na výsledky simulace je zanedbatelný.



3.1.1 Simulace a vyhodnocení

Simulace se provedou pro tyto případy:

- bez usměrňovače – třífázová R a RL zátěž
- s neřízeným usměrňovačem – R a RC zátěž
- s aktivním usměrňovačem – RC zátěž

Ze simulací se pro různé hodnoty odporové zátěže R_z sestaví zatěžovací charakteristiky $U_s = f(P_e)$, které se případně srovnají s měřením.

Poznámka: Protože se jedná o generátor, měl by vzhledem ke znaménkové konvenci proudu být činný výkon P_e záporný. Pro přehlednost zde bude výkon zobrazován v zatěžovacích charakteristikách v kladných osách.

Parametry modelu určené v kapitole 2:

$$\Psi_f = 12,81 \text{ mWb}$$

$$L_d = 38,98 \text{ } \mu\text{H}$$

$$L_q = 37,87 \text{ } \mu\text{H}$$

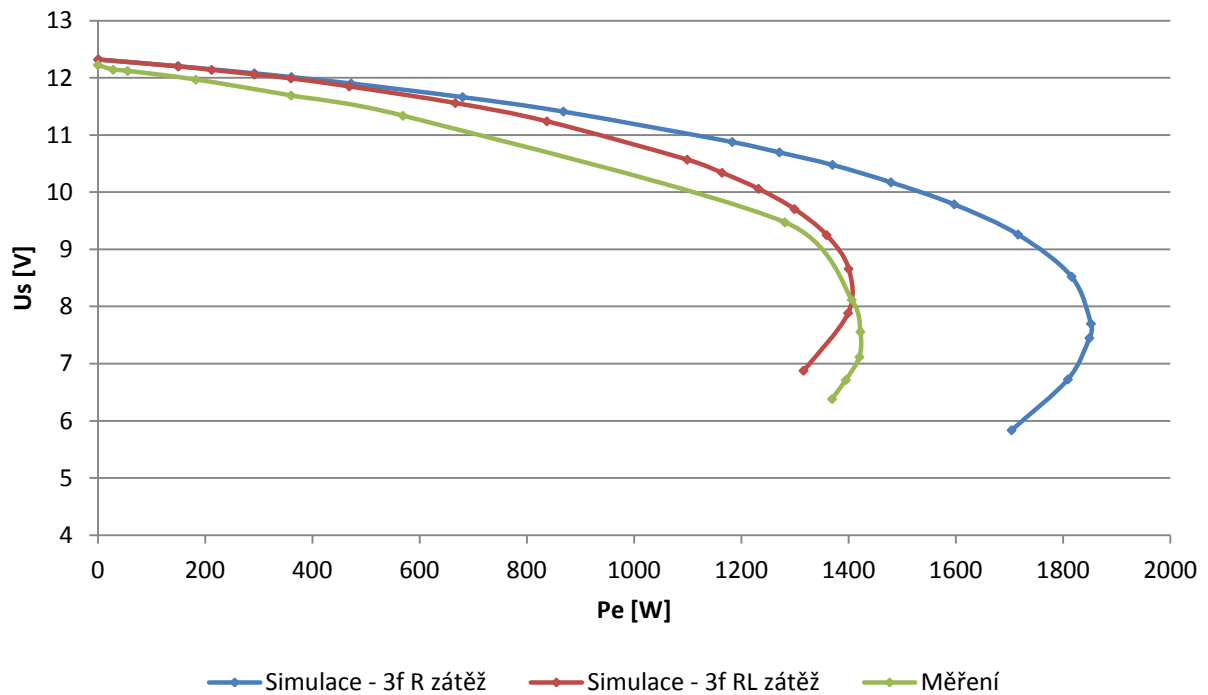
$$R = 9,04 \text{ m}\Omega$$

$$n = 2500 \text{ min}^{-1}$$

$$p = 3$$

$$J = 0,005 \text{ kg m}^2$$

Zatěžovací charakteristiky $U_s=f(P_e)$ pro třífázovou R a RL zátěž a jejich srovnání s měřením jsou zobrazeny v grafu na *obrázku 3.3*. U RL zátěže byla zvolena konstantní hodnota indukčnosti $L = 17 \text{ } \mu\text{H}$. Průběhy dq-složek napětí a proudu jsou konstantní se zanedbatelnými odchylkami.

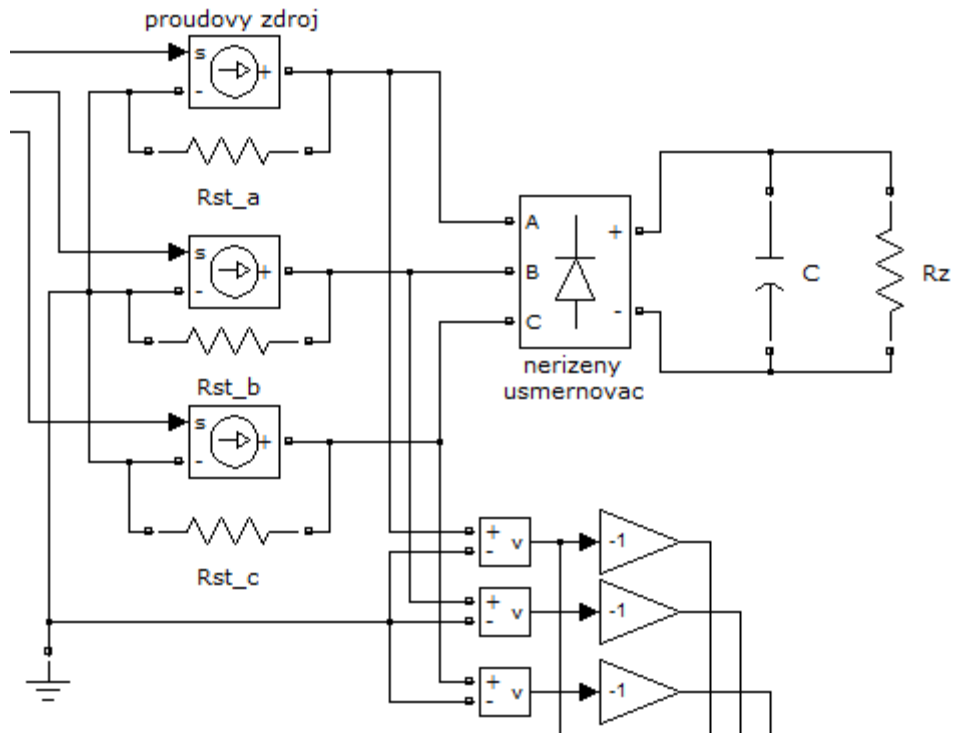


Obrázek 3.3: Zatěžovací charakteristiky dq modelu pro R a RL zátěž

Uvedená křivka pro měření byla v laboratořích měřena pro R zátěž. Zkušebna a přívodní kabely ale vykazovaly nezanedbatelnou parazitní indukčnost L_p vůči generátoru s hodnotou asi $17 \mu H$. Dané měření by se tedy dalo klasifikovat i jako RL zátěž.

3.1.1.1 Neřízený usměrňovač

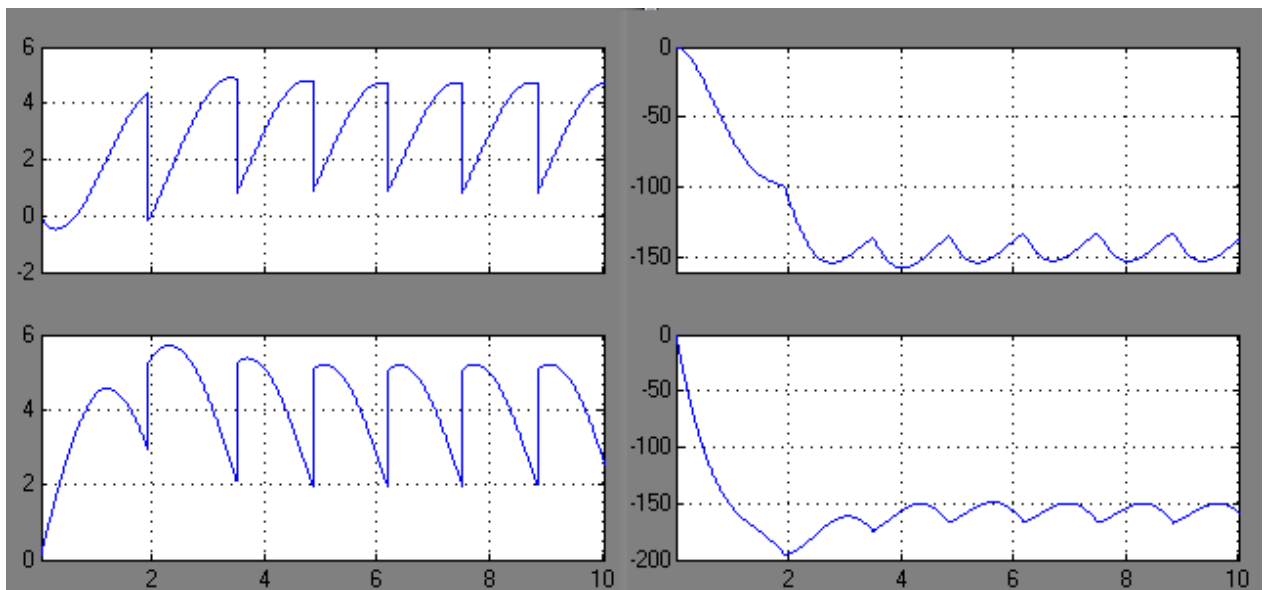
Realizace fyzikální části modelu se zapojením s neřízeným usměrňovačem a RC zátěží v Simulinku je na *obrázku 3.4*.



Obrázek 3.4: Část modelu se zapojením s neřízeným usměrňovačem v Simulinku

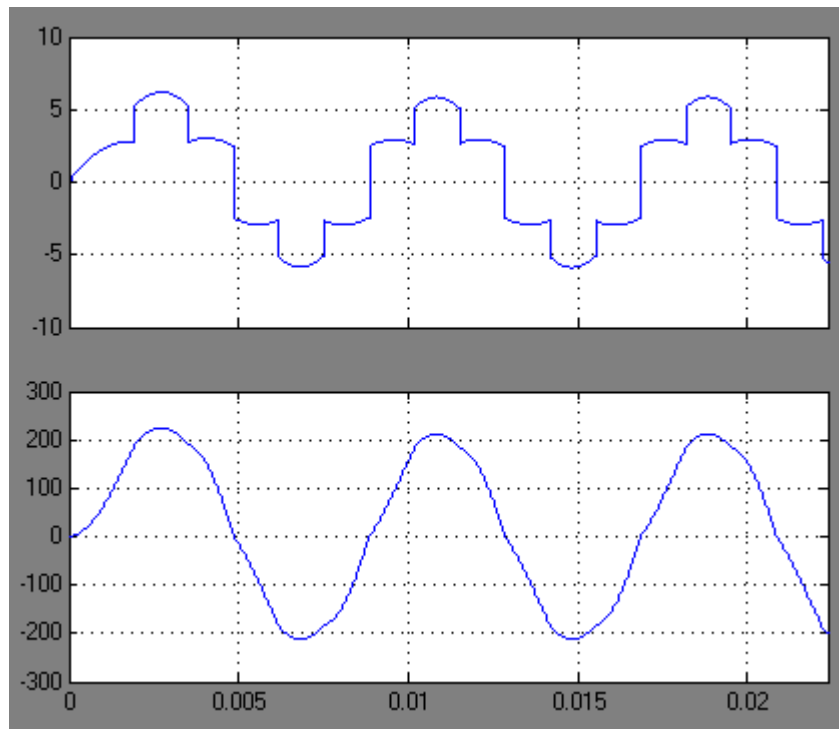
Kapacita kondenzátoru C je stanovena na 0,0476 F (určena pracovníky firmy JULI Motorenwerk s.r.o.).

Průběhy dq-složek napětí a proudů se na rozdíl od předchozího případu mění, jak naznačuje *obrázek 3.5*. V důsledku nestálosti kolísají i efektivní hodnoty podle vztahů (3.1) a (3.2) a jejich odečtení je nepřesné, je proto vhodnější určovat efektivní hodnoty napětí a proudů přímo z okamžitých průběhů fyzikální části modelu.



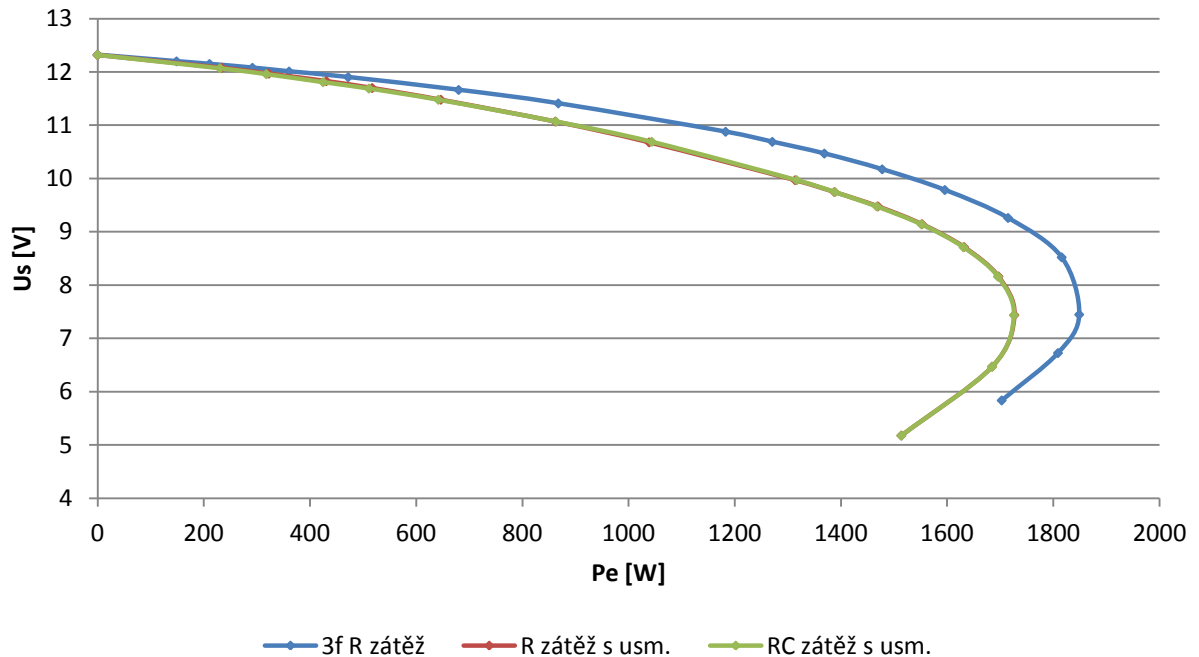
Obrázek 3.5: Průběhy dq složek napětí (vlevo) a proudu (vpravo)

Ukázky střídavých průběhů napětí a proudů při maximálním výkonu jsou vykresleny na *obrázku 3.6*, kde je viditelný vliv deformace nelineárními prvky usměrňovače (způsobený vyššími harmonickými).



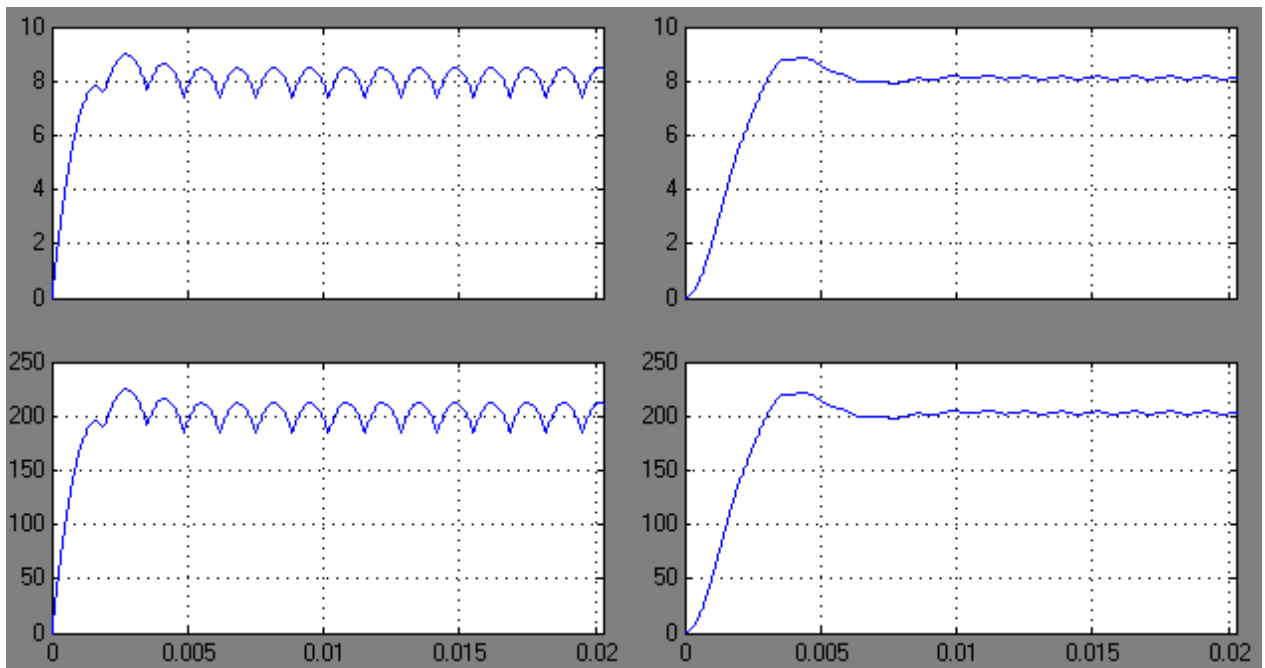
Obrázek 3.6: Střídavé průběhy napětí (nahore) a proudu (dole) při maximálním výkonu

Na *obrázku 3.7* jsou srovnány zatěžovací charakteristiky získané simulacemi pro neřízený usměrňovač s R a RC zátěží společně s třífázovou R zátěží.



Obrázek 3.7: Srovnání zatěžovacích charakteristik - simulace

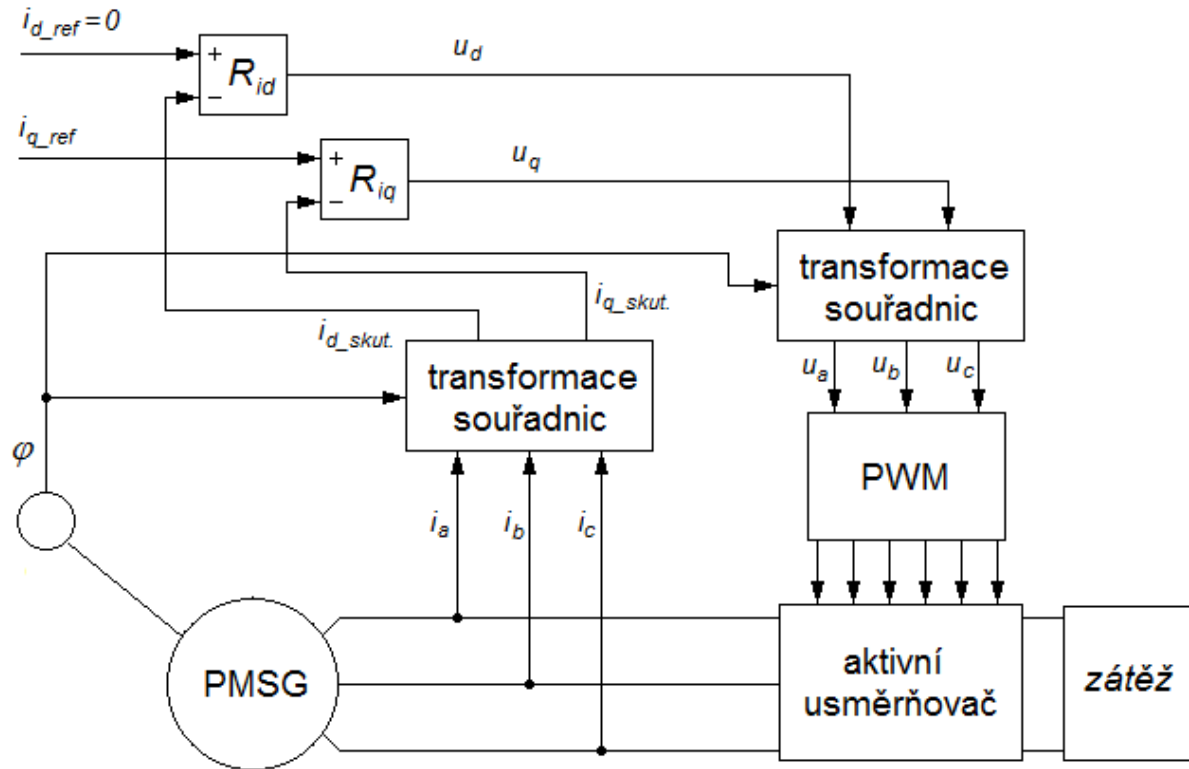
Se zapojením neřízeného usměrňovače je dosaženo menších činných výkonů a nižších napětí než v případě třífázové R zátěže. Mezi R a RC zátěží s usměrňovačem nejsou pozorovatelné žádné rozdíly. V ustáleném stavu tedy kondenzátor nemá vliv na střední hodnotu elektrického výkonu P_e ani na efektivní hodnotu srušeného napětí U_s na svorkách generátoru, pouze vyhlazuje průběhy na výstupu usměrňovače (obrázek 3.8).



Obrázek 3.8: Vliv kondenzátoru na napětí (nahore) a proud (dole)

3.1.1.2 Aktivní usměrňovač

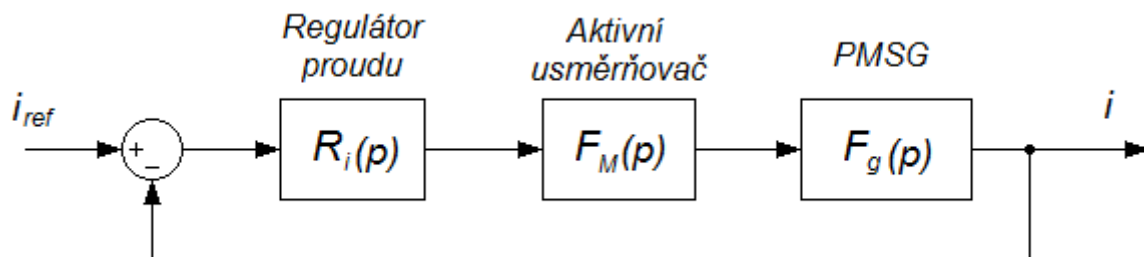
Aktivní usměrňovač se dá vektorově řídit třemi základními způsoby (viz. podkapitola 1.2.2.2), z nichž se práce bude zabírat třetím způsobem, kdy je proud ve fázi s indukovaným napětím. Principiální blokové schéma řízení je zobrazeno na obrázku 3.9.



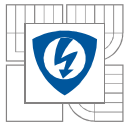
Obrázek 3.9: Principiální blokové schéma řízení

Jak schéma naznačuje, princip řízení je založen na regulacích proudů pomocí regulátorů, kde se budou měnit referenční hodnoty jednotlivých složek proudu i_d , i_q v závislosti na zatěžovacím odporu R_z tak, aby se dosáhlo požadované hodnoty napětí na svorkách PMSG. Proud i_d se bude uvažovat nulový. Řízení bude tedy závislé pouze na referenční hodnotě proudu i_q , která se bude nastavovat manuálně na základě výsledků měření.

Návrh regulátorů proudu R_i vychází z přenosových funkcí proudové smyčky, jejíž blokové schéma je na obrázku 3.10.



Obrázek 3.10: Blokové schéma proudové smyčky



Při návrhu je nutné znát celkovou přenosovou funkci soustavy $F_s(p)$, kterou tvoří přenosové funkce generátoru $F_g(p)$ a aktivního usměrňovače $F_M(p)$. Přenosová funkce generátoru se určí z rovnic (2.3) a (2.4) pro jednotlivé složky. Odstraní-li se rotační složka ($\omega = 0$), bude například pro d-složku platit následující rovnice:

$$u_d(t) = Ri_d(t) + L_d \frac{di_d(t)}{dt} \quad (3.6)$$

Vztah se upraví pomocí Laplaceovy transformace, platí:

$$u_d(p) = Ri_d(p) + pL_d i_d(p) \quad (3.7)$$

Přenosová funkce je obecně dána poměrem vstupního a výstupního signálu. U proudového regulátoru je vstupní veličinou proud a výstupní veličinou napětí. Rovnice (3.7) se upraví na tvar:

$$\frac{i_d(p)}{u_d(p)} = \frac{1}{R + pL_d} \quad (3.8)$$

Po dalších úpravách je výsledný tvar přenosové funkce d-složky generátoru $F_{g,d}(p)$:

$$F_{g,d}(p) = \frac{i_d(p)}{u_d(p)} = \frac{\frac{1}{R}}{1 + p\tau_d} ; \tau_d = \frac{L_d}{R} \quad (3.9)$$

Vztah (3.9) lze přepsat analogicky i pro přenosovou funkci q-složky generátoru $F_{g,q}(p)$:

$$F_{g,q}(p) = \frac{i_q(p)}{u_q(p)} = \frac{\frac{1}{R}}{1 + p\tau_q} ; \tau_q = \frac{L_q}{R} \quad (3.10)$$

Přenosová funkce aktivního usměrňovače $F_M(p)$ je:

$$F_M(p) = \frac{K_M}{1 + p\tau_M} ; \tau_M = \frac{2}{f_M} \quad (3.11 - 3.12)$$

kde

K_M – zesílení měniče (uvažuje se $K_M = 1$)

f_M – frekvence vzorkování (pro daný usměrňovač $f_M = 6000 \text{ Hz}$)

Při návrhu regulátoru se používají dvě metody. Tím je metoda optimálního modulu (OM) a metoda symetrického optima (SO). Regulátory se navrhnu metodou OM. Jsou sice pomalejší oproti regulátorům navrženým SO, ale mají menší překmit (asi 4,3 %, SO - 43,3 %). Přenosová funkce pro návrh metodou OM $F_o(p)$ je následující (postup a vztahy čerpány z literatury [8]):

$$F_o(p) = \frac{1}{2p\tau_\sigma(1 + p\tau_\sigma)} \quad (3.13)$$

Dle schématu platí pro celkovou přenosovou funkci d-složky $F_{s,d}(p)$ vztah:

$$F_{s,d}(p) = F_{g,d}(p) \cdot F_M(p) \quad (3.14)$$

Po dosazení a úpravách

$$F_{s,d}(p) = \frac{\frac{K_M}{R}}{(1 + p\tau_d)(1 + p\tau_M)} = \frac{\frac{K_M}{R}}{(1 + p\tau_d)(1 + p\tau_\sigma)}; \tau_\sigma = \tau_M \quad (3.15)$$

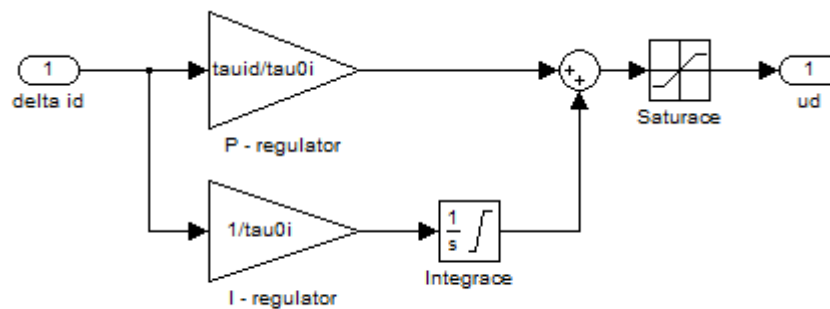
Proudový regulátor $R_{id}(p)$ je:

$$R_{id}(p) = \frac{F_o(p)}{F_{s,d}(p)} = \frac{1 + p\tau_d}{2p\tau_\sigma \frac{K_M}{R}} = \frac{1 + p\tau_d}{p\tau_0} = \frac{1}{p\tau_0} + \frac{\tau_d}{\tau_0}; \tau_0 = 2\tau_\sigma \frac{K_M}{R} \quad (3.16 - 3.17)$$

Pro proudový regulátor $R_{iq}(p)$ se vztah (3.16) analogicky přepíše do tvaru:

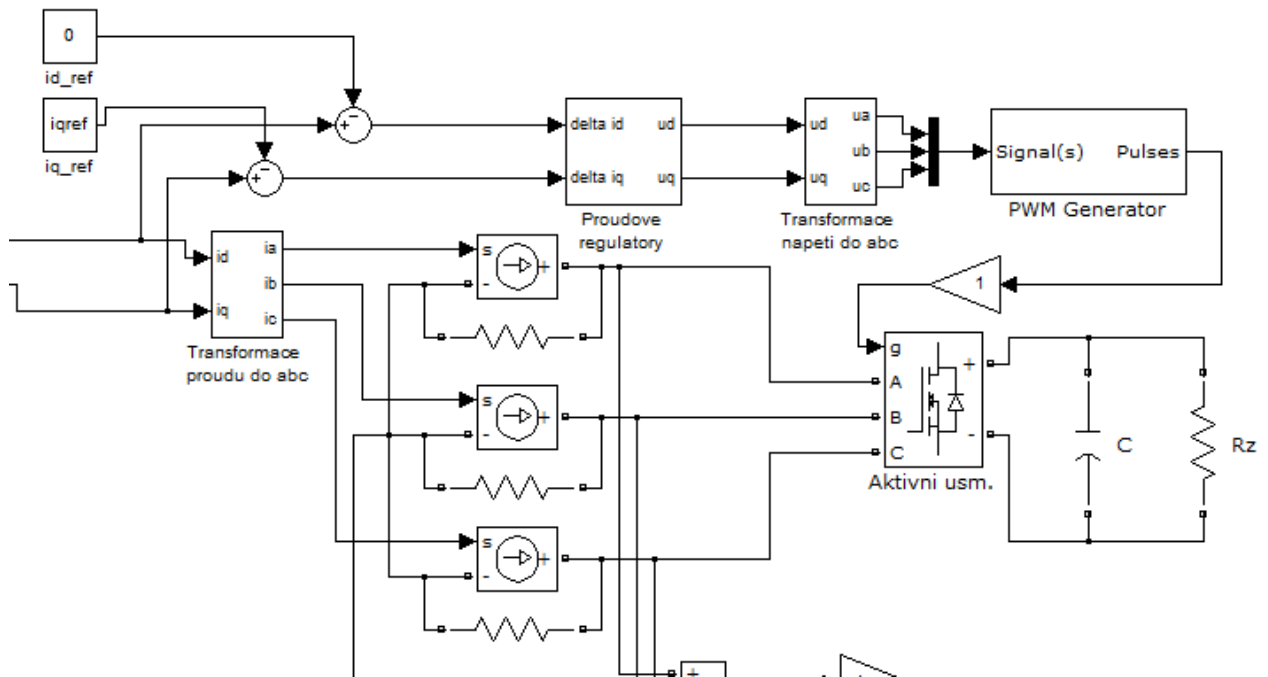
$$R_{iq}(p) = \frac{F_o(p)}{F_{s,q}(p)} = \frac{1 + p\tau_q}{p\tau_0} = \frac{1}{p\tau_0} + \frac{\tau_q}{\tau_0} \quad (3.18)$$

Výsledkem návrhu v obou případech je PI regulátor. Příklad jejich realizace v Simulinku je na obrázku 3.11.



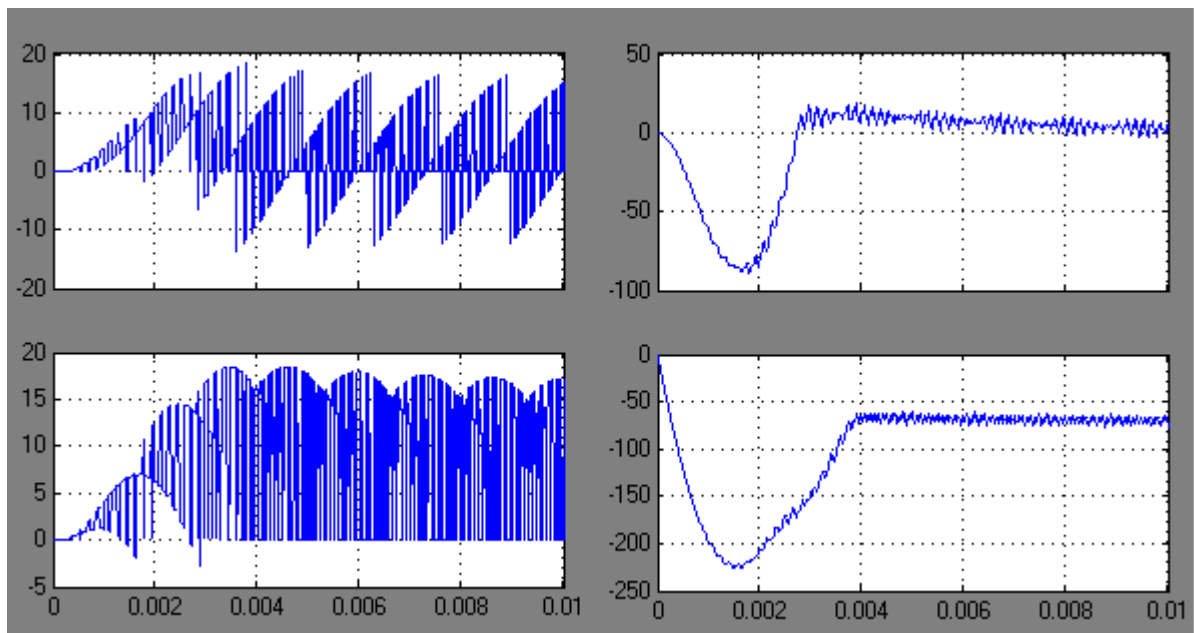
Obrázek 3.11: Regulátor proudu d-složky R_{id} v Simulinku

Celkové řízení i s aktivním usměrňovačem a RC zátěží v Simulinku je na obrázku 3.12. Kapacita kondenzátoru je $C = 0,0129 F$ (určeno pracovníky laboratoří z aktivního usměrňovače použitého při měření).

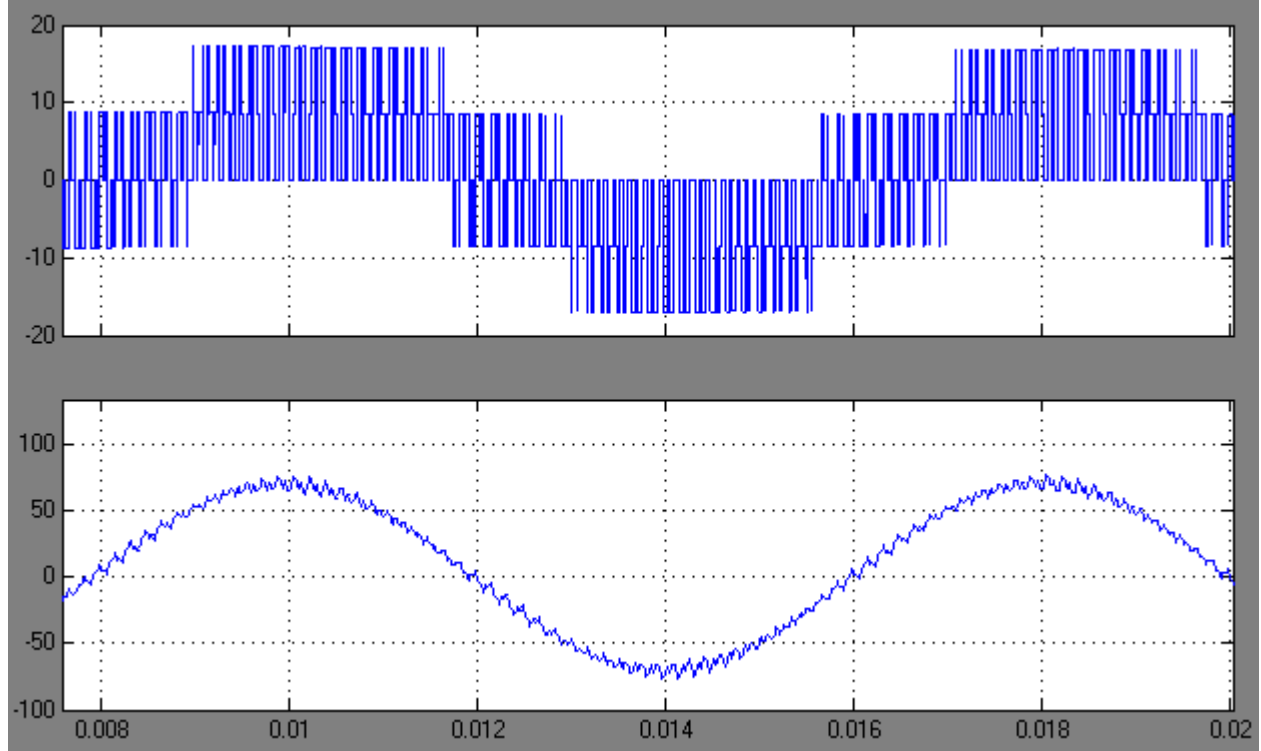


Obrázek 3.12: Část modelu se zapojením s aktivním usměrňovačem s RC zátěží

Při simulaci se průběhy dq-složek (obrázek 3.13) mění stejně jako v případě neřízeného usměrňovače. Příčinou je hlavně spínání tranzistorů (způsobující pulsy v případě napětí) v usměrňovači a činnost regulátorů proudu (kolísání proudu), tudíž je třeba opět určovat efektivní hodnoty napětí a proudů z jejich okamžitých hodnot. Deformace se projevují obdobně i u střídavých průběhů (obrázek 3.14).



Obrázek 3.13: Průběhy dq složek napětí (vlevo) a proudu (vpravo)

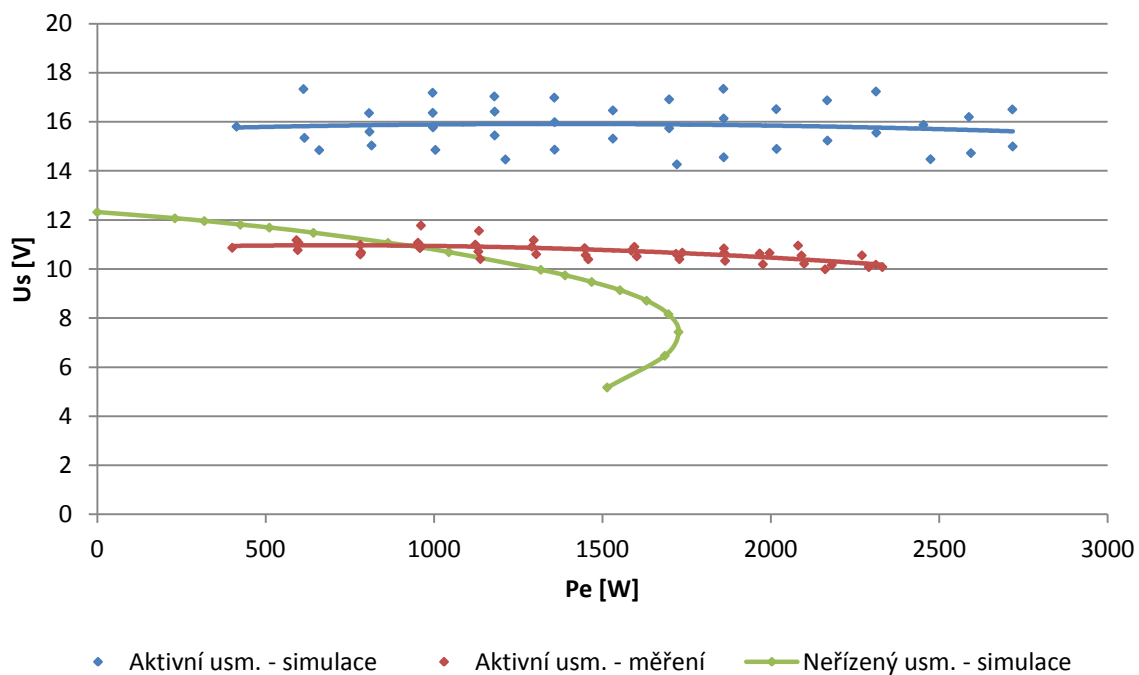


Obrázek 3.14: Příklad střídavého průběhu fázového napětí (nahore) a proudu (dole)

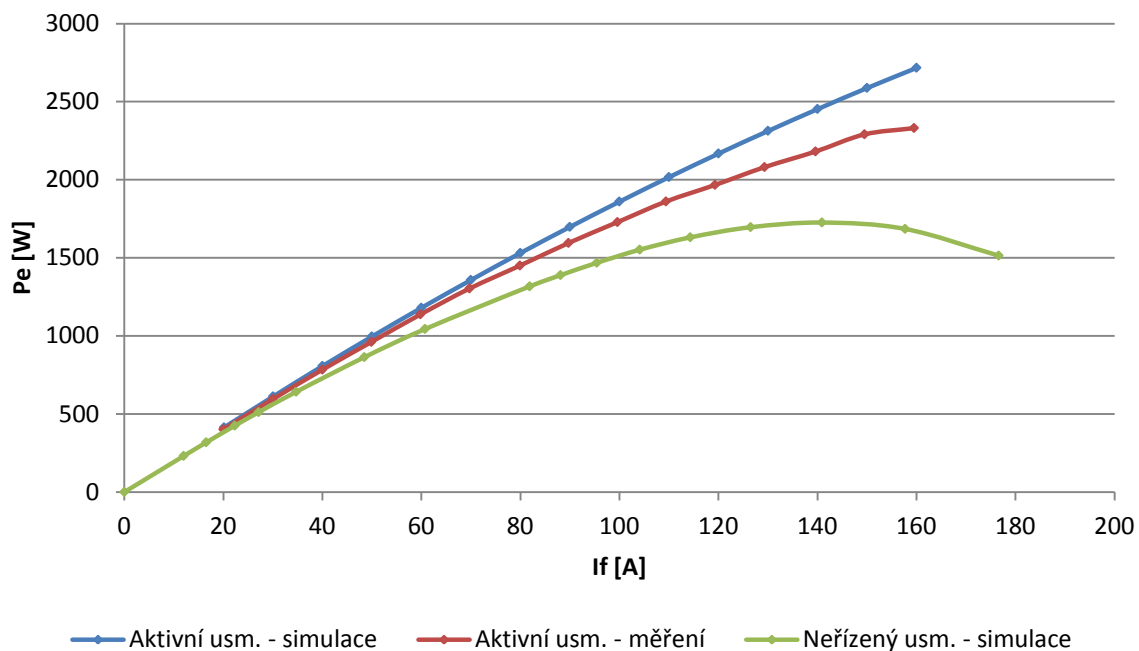
Dané zatěžovací charakteristiky (měření + simulace) zapojení PMSG s aktivním usměrňovačem jsou vykresleny a srovnány s neřízeným usměrňovačem na *obrázku 3.15*. Jak při měření, tak při simulacích bylo proměřeno několik bodů, které se proložily křivkou dávající výsledný průběh. Při měření, z kterého se vycházelo, se svorkové sdružené napětí U_s pohybovalo v určitých mezích na hodnotách menších, než je napětí indukované. Při měření s velkou pravděpodobností nebylo dosaženo maximálního výkonu, a to z důvodů proudového omezení měniče. To potvrzuje i charakteristika činného výkonu na proudy fází $P_e = f(I_f)$ na *obrázku 3.16*, kde křivka stoupá a končí v oblasti pod vrcholem (dle teoretických předpokladů pod bodem maximálního výkonu - viz. kapitola 1 - *obrázek 1.9*).

Bylo zjištěno, že při zapojení s aktivním usměrňovačem je velikost činného výkonu P_e na svorkách závislá na hodnotě nastavené referenční hodnoty proudu i_q a nikoliv na zatížení R_z . Zatížení pouze ovlivňuje pracovní oblast proudových regulátorů. Při simulacích bylo dosahováno výrazně vyšších hodnot sdruženého napětí U_s a činného výkonu P_e oproti měření. Velikost činného výkonu je závislá na velikosti napětí a sdružené napětí při simulacích bylo vyšší, protože model počítá s konstantními hodnotami indukčností L_d a L_q . Ve skutečnosti se hodnota L_q zmenšuje s proudovým zatížením, tím se snižuje napětí a zvyšuje účinnost.

Při zvoleném řízení může PMSG v zapojení s aktivním usměrňovačem dosahovat mnohem větších napětí (a udržovat je na určité úrovni) při vyšších činných výkonech oproti zapojení s neřízeným usměrňovačem (srovnání na *obrázku 3.16*), kdy napětí neustále klesá se zvyšujícím se výkonem. *Obrázek 3.17* ukazuje, že s neřízeným usměrňovačem bylo dosaženo maximálního výkonu při proudu 140 A na rozdíl od aktivního usměrňovače, kdy byl činný výkon nejen vyšší, ale měl tendenci dále růst s proudem.



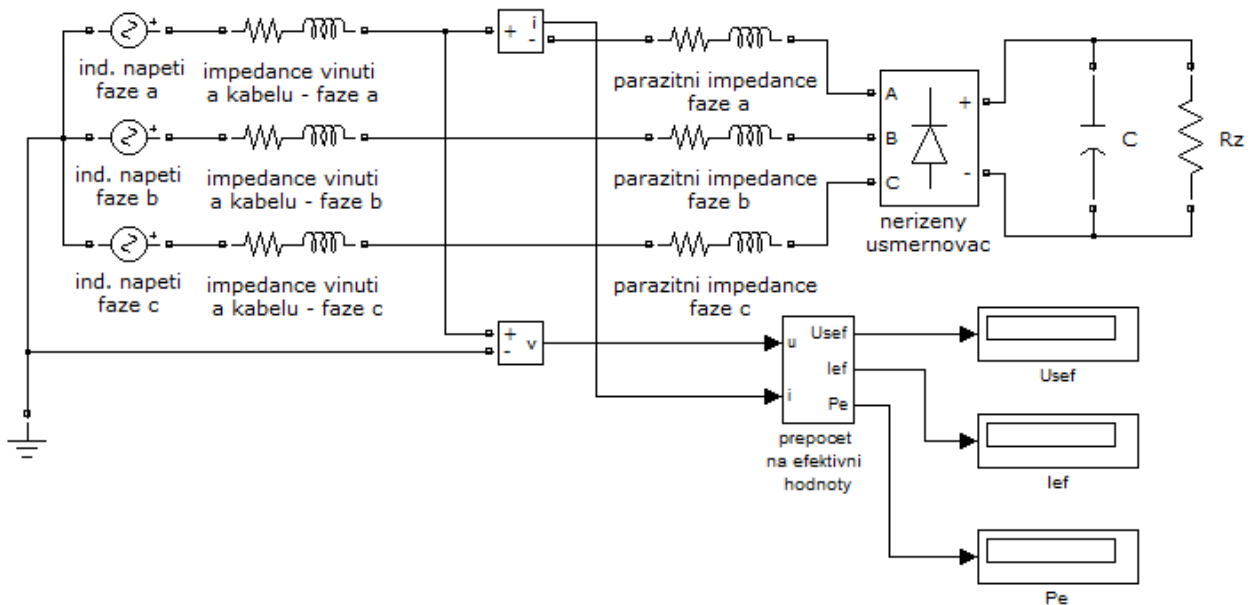
Obrázek 3.15: Zatěžovací charakteristiky $U_s = f(P_e)$ - aktivní usměrňovač



Obrázek 3.16: Charakteristiky činného výkonu na fázovém proudu $P_e = f(I_f)$

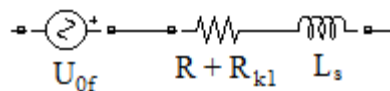
3.2 Zjednodušený model

Zjednodušený model představuje měřicí pracoviště laboratoří firmy JULI Motorenwerk s.r.o.. Na rozdíl od matematického modelu v dq-osách se zde uvažují i parazitní vlivy jako odpor či parazitní indukčnosti zkušebny a přívodních kabelů. Schéma zjednodušeného modelu s neřízeným usměrňovačem a RC zátěží je na *obrázku 3.17* a můžeme ho rozdělit (nepočítáme-li zátěž) na dvě hlavní části.



Obrázek 3.17: Zjednodušený model PMSG s neřízeným usměrňovačem

První část představuje generátor (*obrázek 3.18*), který je charakterizován napěťovým zdrojem s indukovaným napětím U_{of} , odporem vinutí R , odporem přívodních kabelů R_{k1} a indukčností L_s vinutí.



Obrázek 3.18: Generátor (jedna fáze) – náhradní schéma

Efektivní hodnota fázového indukovaného napětí U_{of} pro model se určí podle následujícího vztahu:

$$U_{of} = \sqrt{2}\pi N \phi_G f k_{w1} \quad (3.19)$$

Číselně:

$$U_{0f} = \sqrt{2}\pi \cdot 13 \cdot 1,02 \cdot 10^{-3} \cdot 125 \cdot 0,966 = 7,114 \text{ V}$$

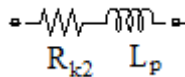
Ostatní parametry:

$$R = 9,02 \text{ m}\Omega$$

$$R_{k1} = 1,08 \text{ m}\Omega$$

$$L_s = 0,028 \text{ mH}$$

Druhá část představuje zkušebnu s přívodními kabely k usměrňovači (*obrázek 3.19*). Ty jsou ve schématu charakterizovány odporem R_{k2} a parazitní indukčností L_p .



Obrázek 3.19: Zkušebna + přívodní kabely - náhradní schéma

Parametry:

$$R_{k2} = 4,72 \text{ m}\Omega$$

$$L_p = 17 \text{ }\mu\text{H}$$

3.2.1 Simulace a porovnání s dq modelem

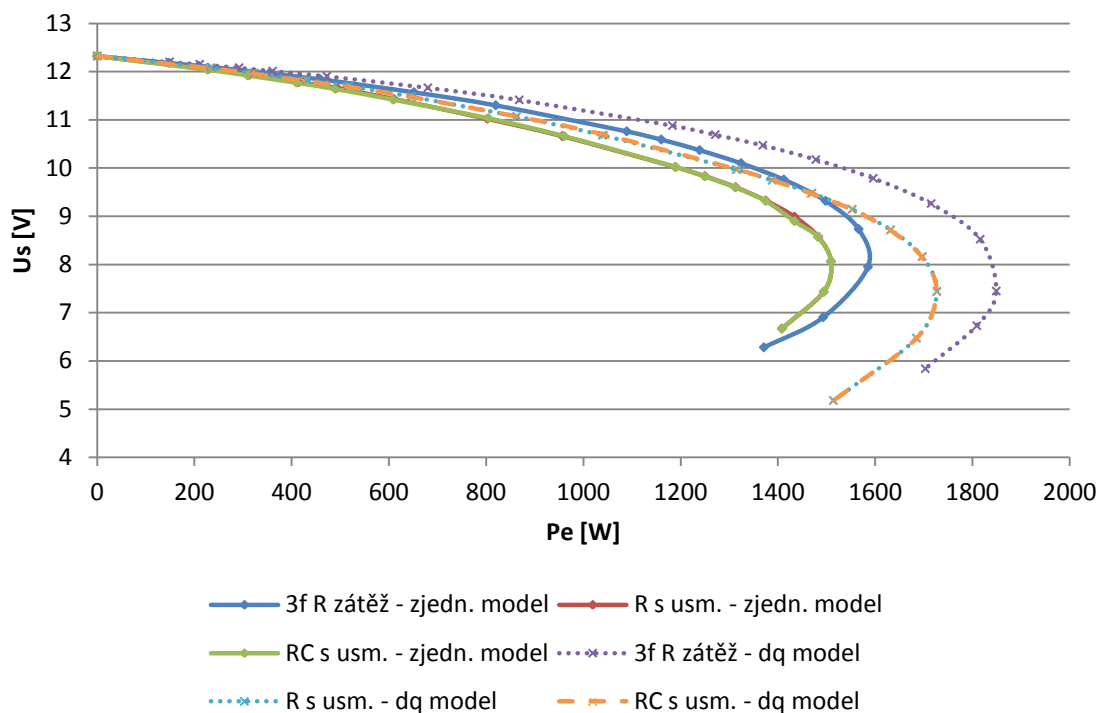
Simulace pro uvedené parametry se provedou podobně jako v předchozí části pro následující případy:

- bez usměrňovače – třífázová R zátěž
- s neřízeným usměrňovačem – R a RC zátěž ($C = 0,0476 \text{ F}$)
- s aktivním usměrňovačem – RC zátěž ($C = 0,0129 \text{ F}$)

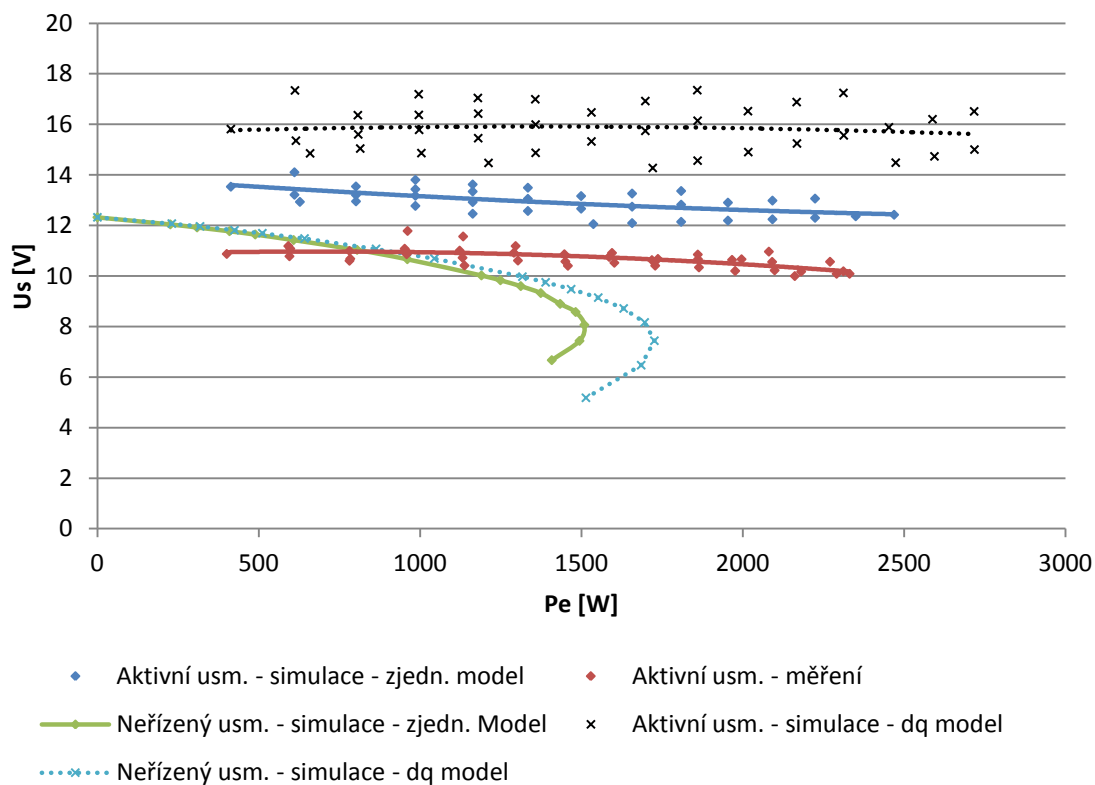
Stejně jako v případě dq modelu i zde se simulace budou provádět pro různé odporové zátěže a z výsledků simulací se sestaví zatěžovací charakteristiky $U_s=f(P_e)$.

Poznámka: Parametry R_{k1} , R_{k2} , L_s , L_p a kapacita C kondenzátoru byly vypočteny (změřeny) pracovníky firmy JULI Motorenwerk s.r.o..

Zatěžovací charakteristiky zjednodušeného modelu a jejich srovnání s charakteristikami dq modelu jsou zobrazeny na *obrázcích 3.20 a 3.21*.



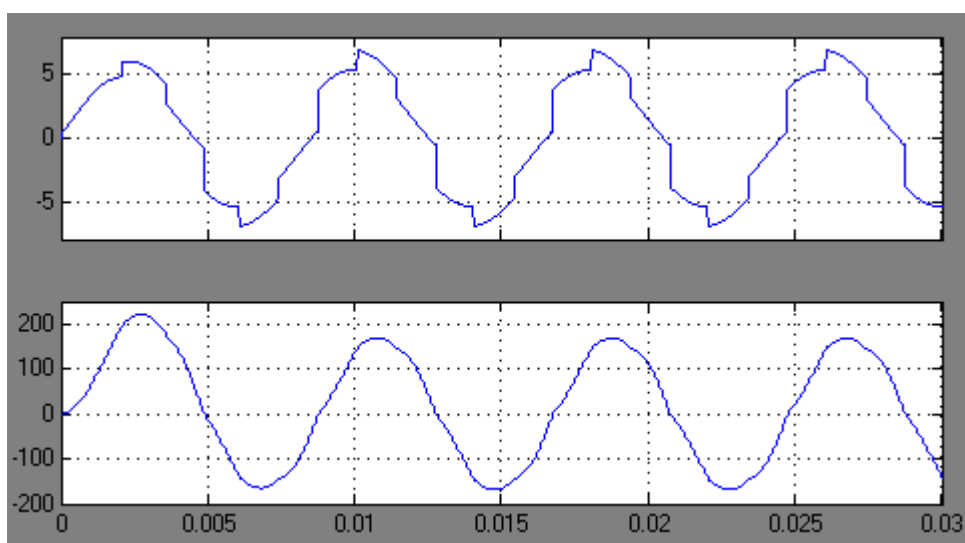
Obrázek 3.20: Zatěžovací charakteristiky – simulace – neřízený usměrňovač + srovnání



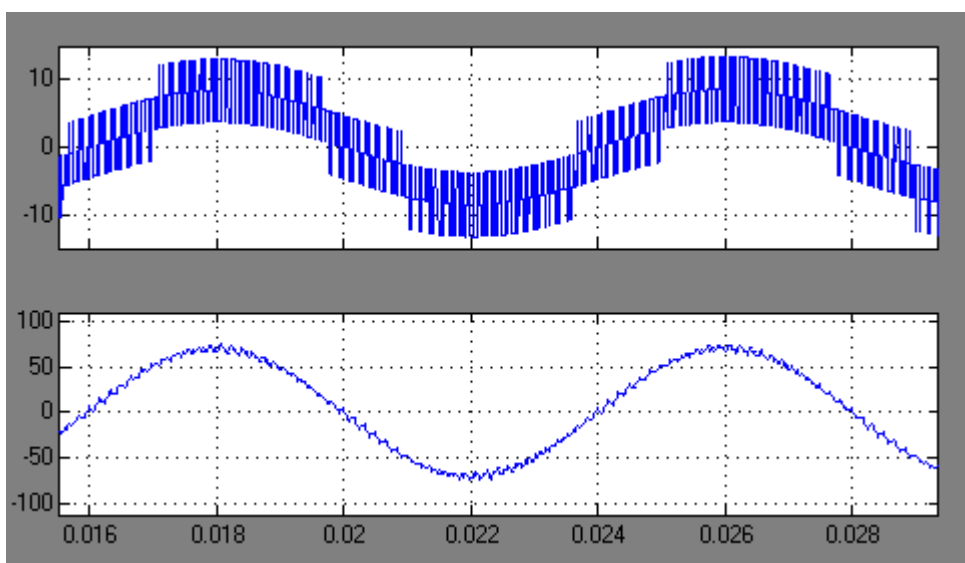
Obrázek 3.21: Zatěžovací charakteristiky – aktivní usměrňovač + srovnání

Charakteristiky jednotlivých modelů se nijak od sebe neliší z hlediska jejich průběhu. Například vliv neřízeného usměrňovače (*obrázek 3.20*) je stejný jako v případě dq modelu. Rozdíly se projeví akorát v hodnotách napětí a výkonu. Zjednodušený model obecně dosahoval menších hodnot oproti dq modelu, což mohl být taky důsledek uvažování parazitních vlivů. V případě aktivního usměrňovače (*obrázek 3.21*) simulace více odpovídají měření.

Na *obrázcích 3.22* a *3.23* zobrazeny příklady střídavých průběhů pro zapojení s neřízeným usměrňovačem a aktivním usměrňovačem zjednodušeného modelu. V případě neřízeného usměrňovače jsou průběhy zobrazeny při maximálním výkonu.



Obrázek 3.22: Střídavé průběhy napětí (nahore) a proudu (dole) - neřízený usměrňovač



Obrázek 3.23: Střídavé průběhy napětí (nahore) a proudu (dole) - aktivní usměrňovač

Rozdíly oproti dq-modelu jsou viditelné hlavně v průbězích napětí, které více připomínají sinusový průběh.

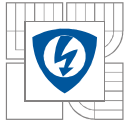
Závěr

V diplomové práci bylo dosaženo všech cílů a bodů zadání. Popis synchronního stroje s permanentními magnety, jeho konstrukce, princip funkce a jeho práce do neřízeného a aktivního usměrňovače byly rozebrány v první části práce. Zároveň byl zde vytvořen přehled možných zátěží. Druhá část se zabývala matematickým modelem PMSG, výpočty jeho parametrů a výpočtem ztrát. V poslední části byl sestaven matematický model v Matlab/Simulink, ve kterém probíhaly simulace pro různé varianty, v rámci kterých byly sestrojeny a porovnávány zatěžovací charakteristiky generátoru $U_s = f(P_e)$ a to hlavně v zapojení s neřízeným a aktivním usměrňovačem. Výsledky simulací byly analyzovány a srovnány s příslušným měřením.

Hlavním cílem práce bylo ověřit, zda synchronní stroj s permanentními magnety firmy JULI Motorenwerk s.r.o. v zapojení s aktivním usměrňovačem může dosáhnout větších činných výkonů než s usměrňovačem neřízeným.

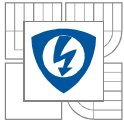
Hodnota činného výkonu generátoru v zapojení s aktivním usměrňovačem je závislá na nastavení fázového úhlu proudu. Zde bylo zvoleno takové řízení, pomocí kterého se měl udržovat proud ve fázi s indukovaným napětím. Řízení bylo založeno na manuální nastavování referenční hodnoty proudu i_q na proudovém regulátoru, která se nastavovala v modelu až na základě měření, z kterého se vycházelo. Během měření vzhledem k proudovému omezení aktivního usměrňovače nebylo dosaženo maximálního činného výkonu generátoru a sdružené napětí se pohybovalo na hodnotách menších než napětí indukované. Nasimulované charakteristiky měly podobný průběh jako měření, akorát sdružené napětí bylo vyšší v důsledku počítání s konstantními hodnotami indukčností L_d a L_q v modelu. Simulace proběhly ve dvou modelech: matematickém dq modelu a zjednodušeném modelu. Zjednodušený model se ve srovnání s dq modelem méně odchyloval od měření a to jak ve velikosti sdruženého napětí, tak i ve velikosti činného výkonu.

Dle výsledků byl dotyčný hlavní cíl splněn. Simulacemi byl navýšen elektrický výkon generátoru pracujícího do aktivního usměrňovače asi o 60% ve srovnání s maximálním výkonem u neřízeného usměrňovače. U měření to bylo asi 30% až 50% (vzhledem k simulacím jednotlivých modelů). Z hlediska navýšení výkonů jsou ale tyto údaje nevýrazné oproti strojům větších výkonů, kdy je možné maximální výkony zvýšit dvakrát až třikrát (dle literatury [7]). Nutno dodat, že maximálním výkonem se myslí výkon krátkodobý špičkový, k dlouhodobému provozu k tomu nejsou stroje původně navrženy. Navíc výkon sice vzroste s rostoucím proudem, ale zároveň se tím zvýší i ztráty ve vinutí, což se může negativně projevit na účinnosti stroje. U malých strojů se vzhledem k navýšení výkonu a pořizovacím a provozním nákladům aktivní usměrňovač nevyplatí.



Literatura

- [1] GIERAS, Jacek F.; WING, Mitchel. *Permanent Magnet Motor Technology: Design and Applications*. Second edition. New York: Marcel Dekker, Inc., 2002. 590 s. ISBN 0-8247-0739-7.
- [2] BOLDEA, Ion. *The electric generators handbook: Variable speed generators*. Polytechnical institute Timisoara (Romania): CRC/Taylor & Francis, 2006. 552 s. ISBN 0-8493-5715-2
- [3] Hendershot J. R. jr., Miller T. *Design of brushless permanent-magnet motors*. Oxford: Magna physics publishing and clarendon press, 1994. ISBN 1-881855-03-1
- [4] PYRHÖNEN, Juha; JOKINEN, Tapani; HRABOVCOVÁ, Valéria. *Design of Rotating Electrical Machines*. Chichester, UK: John Wiley & Sons, Ltd, 2008. 544 s. ISBN 9780470695166
- [5] ČERNÝ, Ondřej; DOLEČEK, Radovan; NOVÁK Jaroslav. *Synchronní motory s permanentními magnety pro trakční pohony kolejových vozidel* [online], 2010. [cit. 2012-04-25]
Dostupný z WWW: <<http://vts.cd.cz/VTS/CLANKY/vts29/2908.pdf>>
- [6] FANG LIN LUO; HONG YE. *Power Electronics*. CRC/Taylor & Francis, 2010. 722 s. ISBN 978-1-4200-9429-9
- [7] GRAUERS, Anders. *Design of direct/driven permanent-magnet generators for wind turbines*. Doctoral Thesis Chalmers University of Technology Göteborg, Sweden, 1996. 133 s.
- [8] SKALICKÝ, Jíří. *Teorie řízení*. Elektronický učební text FEKT VUT v Brně. 2007, 123 s.



Seznam příloh

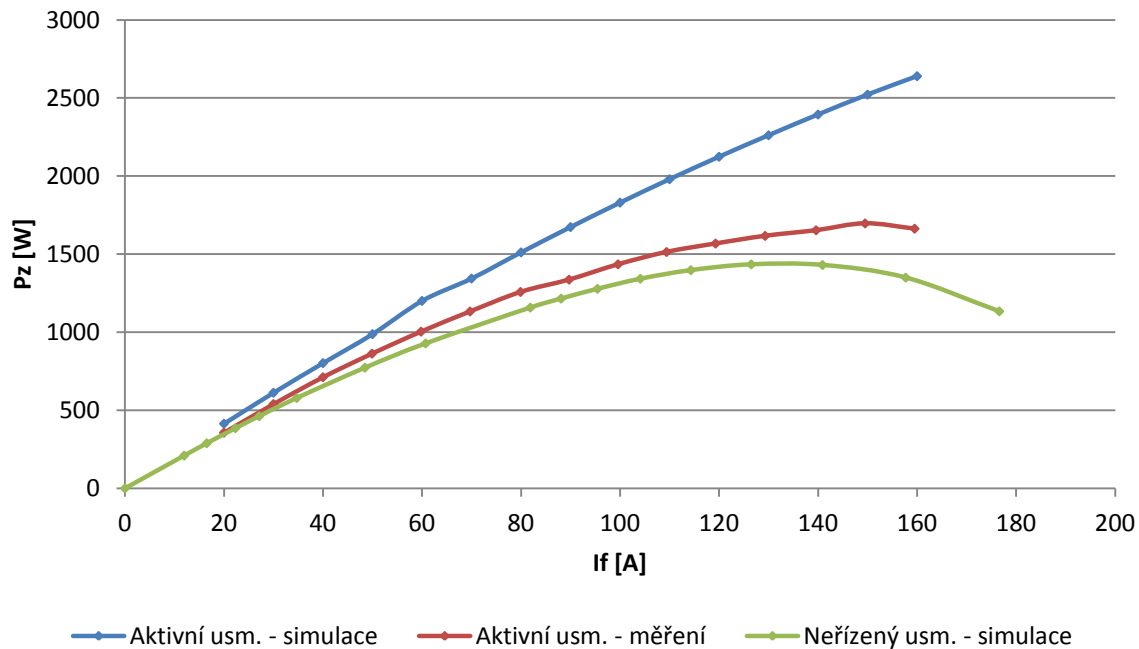
Příloha A:	Měření s aktivním usměrňovačem
Příloha B:	Grafy – výkony na zátěži $P_z = f(I_f)$
Příloha C:	Obsah CD

Příloha A: Měření s aktivním usměrňovačem

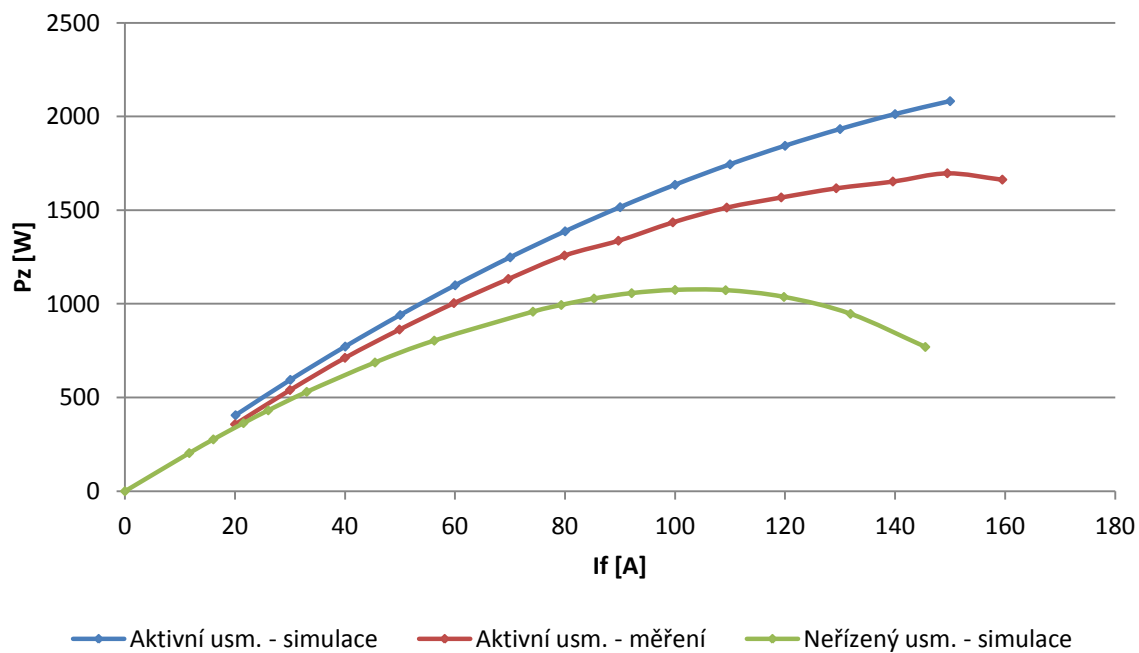
Tab. P.1: Naměřené hodnoty PMSG s aktivním usměrňovačem při $i_d=0$

Odpor	I_q	I_d	U_{sef}	I_{ef}	P_e	U_z	I_z	P_{zat}
[Ohm]	[A]	[A]	[V]	[A]	[W]	[V]	[A]	[W]
0,14	110	0	10,3	109,8	-1864	16,05	95,4	1531
	120	0	10,2	119,7	-1976	16,44	96,4	1585
	130	0	10,2	129,7	-2099	16,71	98,4	1644
	140	0	10,2	139,6	-2181	16,92	97,7	1653
	150	0	10,1	149,5	-2291	17,00	99,8	1697
	160	0	10,1	159,5	-2331	17,00	97,8	1663
0,21	80	0	10,6	79,9	-1450	17,90	70,0	1253
	90	0	10,9	89,7	-1595	18,67	72,4	1352
	100	0	10,4	99,6	-1729	19,32	74,3	1435
	110	0	10,8	109,4	-1861	19,79	76,5	1514
	120	0	10,6	119,3	-1967	20,21	77,6	1568
	130	0	11,0	129,3	-2081	20,39	79,3	1617
	140	0	10,0	139,3	-2161	20,58	79,1	1628
	150	0	10,6	149,3	-2270	20,70	80,8	1673
0,32	60	0	10,4	59,8	-1138	20,33	49,8	1012
	70	0	10,6	69,7	-1303	21,70	52,7	1144
	80	0	10,4	79,5	-1458	22,87	55,0	1258
	90	0	10,5	89,1	-1602	23,88	56,8	1356
	100	0	10,7	98,8	-1737	24,77	58,0	1437
	110	0	10,7	108,6	-1861	25,54	59,1	1509
	120	0	10,7	118,6	-1996	25,66	61,5	1578
	130	0	10,6	128,4	-2091	26,30	61,5	1617
0,43	50	0	11,8	49,9	-961	19,83	43,5	863
	60	0	11,6	59,8	-1133	21,46	46,8	1004
	70	0	11,2	69,5	-1296	22,84	49,6	1133
	80	0	10,9	79,2	-1447	23,94	51,8	1240
	90	0	10,8	88,9	-1586	24,89	53,7	1337
	100	0	10,6	98,6	-1718	25,67	55,2	1417
0,55	40	0	10,7	40,0	-784	20,70	34,4	712
	50	0	10,9	49,8	-962	22,81	38,0	867
	60	0	10,7	59,5	-1132	24,56	40,7	1000
	70	0	10,9	69,1	-1291	26,06	43,1	1123
0,64	30	0	11,1	30,1	-598	19,23	28,3	544
	40	0	10,6	39,9	-781	21,92	32,3	708
	50	0	10,9	49,7	-958	24,19	35,6	861
	60	0	11,0	59,2	-1123	26,07	38,2	996
0,78	30	0	10,8	30,0	-595	21,08	25,6	540
	40	0	11,0	39,8	-781	24,15	29,2	705
	50	0	11,1	49,3	-952	26,58	32,0	851
1,28	20	0	10,9	20,1	-401	21,62	16,5	357
	30	0	11,2	29,8	-592	26,41	20,1	531

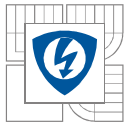
Příloha B: Grafy – výkony na zátěži $P_z = f(I_f)$



Obrázek P.1: Srovnání charakteristik $P_z = f(I_f)$ – dq model



Obrázek P.2: Srovnání charakteristik $P_z = f(I_f)$ – zjednodušený model



Příloha C: Obsah CD

CD:/

Diplomová práce.pdf	elektronická verze diplomové práce
<i>/DQ model PMSG</i>	matematický dq model PMSG
<i>/Parametry_dq.m</i>	-parametry dq modelu
<i>/PMSG_3f_zatez.mdl</i>	-model PMSG s třífázovou zátěží
<i>/PMSG_aktivni_usmernovac.mdl</i>	-model PMSG s aktivním usměrňovačem
<i>/PMSG_nerizeny_usmernovac.mdl</i>	-model PMSG s neřízeným usměrňovačem
<i>/Zjednodušený model PMSG</i>	zjednodušený model PMSG
<i>/Parametry_zjed.m</i>	-parametry zjednodušeného modelu
<i>/PMSG_3f_zatez.mdl</i>	-model PMSG s třífázovou zátěží
<i>/PMSG_aktivni_usmernovac.mdl</i>	-model PMSG s aktivním usměrňovačem
<i>/PMSG_nerizeny_usmernovac.mdl</i>	-model PMSG s neřízeným usměrňovačem