

Fakulta elektrotechnická Research and Innovation Centre for Electrical Engineering

Identifikace parametrů stroje SVY 132M-4

Pracoviště: Research and Innovation Centre for Electrical Engineering
Číslo dokumentu: 22190 – 021 – 2023
Typ zprávy: Výzkumná zpráva
Řešitelé: Karel Hruška
Ondřej Suchý
Hlavní řešitel: Karel Hruška
Počet stran: 27
Datum vydání: 29.11.2023
Oborové zařazení: 2.2 Electrical engineering, Electronic engineering, Information engineering - Automation and control system

Zpracovatel / dodavatel:

Západočeská univerzita v Plzni
Research and Innovation Centre for
Electrical Engineering
Univerzitní 8
306 14 Plzeň

Kontaktní osoba:

Karel Hruška
tel. +420 377 63 4429
khruska@fel.zcu.cz

Zpráva vznikla s finanční podporou TA ČR v rámci projektu
č. TN02000028 „Centrum pokročilých strojů a výrobních technologií.“

Anotace

Tato výzkumná zpráva shrnuje postup měření a výsledné parametry elektricky buzeného synchronního stroje SVY 132M-4 určeného pro praktické ověření optimálního řízení elektricky buzených synchronních strojů.

Klíčová slova

elektricky buzený synchronní stroj, identifikace parametrů, parametry náhradního schématu

Název zprávy v anglickém jazyce / Report title

SVY 132M-4 Parameter Identification

Anotace v anglickém jazyce / Abstract

This research report summarizes measurement and resulting parameters of a wound rotor synchronous machine SVY132 M-4, which is dedicated for practical verification of wound rotor synchronous machine optimal control.

Klíčová slova v anglickém jazyce / Keywords

wound rotor synchronous machine, parameter identification, equivalent circuit parameters

Seznam symbolů a zkratk

C_{b1}	činitel tvaru budícího pole	[-]
C_{d1}	činitel tvaru statorového pole v podélné ose	[-]
g_i	převod proudu synchronního stroje	[-]
g_i'	modifikovaný převod proudu synchronního stroje pro MTPW	[-]
g_L'	převod indukčností synchronního stroje pro MTPW	[-]
i_d	podélná složka proudu (amplituda)	[A]
i_q	příčná složka proudu (amplituda)	[A]
I_b	budící proud	[A]
I_{b0}	budící proud naprázdno	[A]
I_{bmax}	maximální budící proud	[A]
I_d	podélná složka proudu (efektivní hodnota)	[A]
I_k	proud nakrátko	[A]
I_{kn}	proud nakrátko odpovídající nesyčené reaktanci	[A]
I_{ks}	proud nakrátko odpovídající sycené reaktanci	[A]
I_{max}	maximální proud statoru	[A]
I_{nY}	jmenovitý proud stroje v zapojení do hvězdy	[A]
$I_{n\Delta}$	jmenovitý proud stroje v zapojení do trojúhelníka	[A]
I_q	příčná složka proudu (efektivní hodnota)	[A]
k_{dq}	koeficient proudů i_d a i_q	[-]
k_L	konstanta indukčností	[-]
k_M	konstanta elektromagnetického momentu	[-]
k_o	konstanta optimálního buzení	[-]
k_R	konstanta odporů	[-]
k_{v1}	činitel vinutí statorového vinutí	[-]
$L_{a\sigma}$	rozptylová indukčnost kotvy	[H]
L_b	indukčnost budícího vinutí	[H]
L_b'	indukčnost budícího vinutí přepočtená na stranu statoru	[H]
L_d	podélná indukčnost stroje	[H]
L_d'	podélná přechodná indukčnost stroje	[H]
L_{dn}	nesycená hodnota podélné indukčnosti stroje	[H]
L_{ds}	sycená hodnota podélné indukčnosti stroje	[H]

L_q	příčná indukčnost stroje	[H]
m	počet fází stroje	[-]
M_n	jmenovitý moment stroje	[Nm]
MTPA	maximum torque per ampére	[-]
MTPW	maximum torque per watt	[-]
N_b	celkový počet závitů budícího vinutí	[-]
N_s	počet závitů statoru v sérii	[-]
n	jmenovitá rychlost stroje	[ot.min ⁻¹]
P_n	jmenovitý výkon stroje na hřídeli	[W]
R_{a20}	odpor kotvy při 20°C	[Ω]
$R_{a\theta}$	odpor kotvy při jmenovité teplotě	[Ω]
R_{b20}	odpor buzení při 20°C	[Ω]
$R_{b\theta}$	odpor buzení při jmenovité teplotě	[Ω]
S_{nY}	zdánlivý jmenovitý výkon stroje v zapojení do hvězdy	[VA]
$S_{n\Delta}$	zdánlivý jmenovitý výkon stroje v zapojení do trojúhelníka	[VA]
U_0	napětí naprázdno	[V]
U_i	indukované napětí	[V]
U_k	indukované napětí stroje před začátkem zkratu	[V]
U_{ib}	buzené napětí	[V]
U_{nY}	jmenovité napětí stroje v zapojení do hvězdy (sdružená hodnota)	[V]
$U_{n\Delta}$	jmenovité napětí stroje v zapojení do trojúhelníka (sdružená hodnota)	[V]
x_d	podélná reaktance stroje	[p.u.]
x_d'	podélná přechodná reaktance stroje	[p.u.]
x_{dn}	nesycená hodnota podélné reaktance stroje	[p.u.]
x_{ds}	sycená hodnota podélné reaktance stroje	[p.u.]
x_q	příčná reaktance stroje	[p.u.]
X_d	podélná reaktance stroje	[Ω]
X_d'	podélná přechodná reaktance stroje	[Ω]
X_{dn}	nesycená hodnota podélné reaktance stroje	[Ω]
X_{ds}	sycená hodnota podélné reaktance stroje	[Ω]
X_q	příčná reaktance stroje	[Ω]
Z_d'	podélná přechodná impedance stroje	[Ω]
Z_{nY}	jmenovitá impedance stroje v zapojení do hvězdy	[Ω]

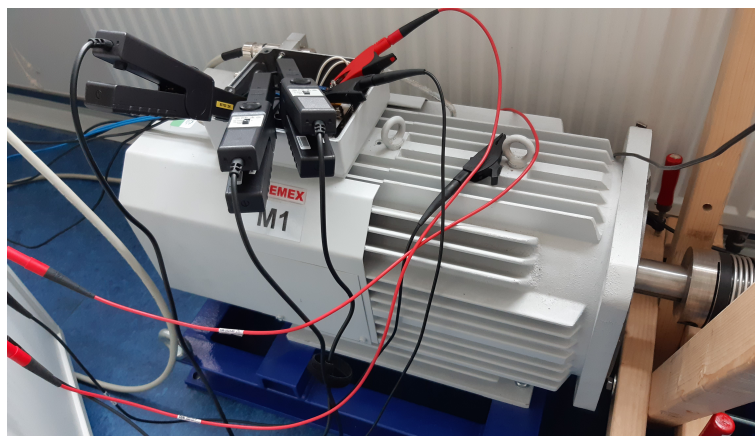
$Z_{n\Delta}$	jmenovitá impedance stroje v zapojení do trojúhelníka	[Ω]
α	poloha rotoru stroje	[rad]
α_m	mechanický činitel pólového krytí	[-]
β	zátěžný úhel stroje	[$^\circ$; rad]
Δi_k	přechodná složka proudu nakrátko	[A]
ΔP_{sin}	celkové ztráty stroje při sinusovém napájení	[W]
$\cos \varphi$	účinník stroje	[-]
η	účinnost stroje	[-; %]
ψ	vnitřní účinník stroje	[$^\circ$; rad]
ω_1	jmenovitá úhlová frekvence	[$rad.s^{-1}$]
ω_s	synchronní úhlová rychlost	[$rad.s^{-1}$]

Obsah

1 ÚVOD.....	7
2 MĚŘENÍ STROJE.....	9
2.1 ZKOUŠKA NAPRÁZDNO.....	9
2.2 ZKOUŠKA NAKRÁTKO.....	9
2.3 MĚŘENÍ INDUKČNOSTÍ SKLUZOVOU METODOU.....	11
2.4 ZKOUŠKA NÁHLÝM TŘÍFÁZOVÝM ZKRATEM.....	13
3 DOPOČTENÉ PARAMETRY STROJE PRO POTŘEBY OPTIMÁLNÍHO ŘÍZENÍ.....	16
3.1 PŘEVOD PROUDU A INDUKČNOSTI.....	16
3.2 KOEFICIENTY OPTIMÁLNÍHO ŘÍZENÍ.....	17
4 ANALÝZA CHARAKTERISTIK STROJE.....	18
4.1 ZATĚŽOVACÍ CHARAKTERISTIKY.....	18
4.2 OBLASTI ŘIDITELNOSTI STROJE SVY 132M-4.....	19
4.3 TRAKČNÍ CHARAKTERISTIKY.....	20
5 ZÁVĚR.....	23

1 Úvod

Pro potřeby verifikace možností optimálního řízení elektricky buzeného synchronního stroje (MTPW, [1]) byl vybrán stroj EM Brno SVY 132M-4, který byl dodán do laboratoří RICE v roce 2015. K tomuto stroji byla dodána částečně nekompletní dokumentace [2], která neumožňuje dopočet všech parametrů, které jsou nutné pro potřeby určení koeficientů optimálního řízení MTPW. Z tohoto důvodu byla provedena sada měření stroje, jejichž výsledkem má být odvození kompletní sady parametrů náhradního schématu stroje tak, aby bylo možné za pomoci těchto parametrů dopočítat proudové mapy stroje a zároveň provést implementaci řízení MTPW a jeho praktické ověření.



Obr. 1.1: Stroj SVY 132M-4 v laboratoři RICE

Z tohoto důvodu byla provedena sada měření stroje, jejichž výsledkem má být odvození kompletní sady parametrů náhradního schématu stroje tak, aby bylo možné za pomoci těchto parametrů dopočítat proudové mapy stroje a zároveň provést implementaci řízení MTPW a jeho praktické ověření.

Dle dodaných podkladů jsou pak šítkové parametry stroje následující:

typ stroje:	SVY 132M-4
stupeň krytí, chlazení:	IP54/IC416
provedení:	IM2001
sériové číslo:	6223868
jmenovitý výkon:	11 kW
režim:	S1
jmenovitá frekvence:	50 Hz
jmenovité napětí statoru:	400 / 230 V (Y / Δ)
jmenovitý proud statoru:	24,5 / 42,5 A
jmenovité napětí rotoru:	51,5 V
jmenovitý proud rotoru:	5,3 A
jmenovitá rychlost:	1500 ot/min
účinník:	0,76

Dokumentace ke stroji dále uvádí následující parametry:

odpor statoru:	0,4 / 0,56 Ω (20 / 120 °C)
rozptylová indukčnost statoru:	2,2 mH
rozptylová reaktance statoru:	0,7 Ω (50 Hz)
sycená magnetizační reaktance:	11 Ω (50 Hz)
odpor budícího vinutí:	6,7 / 11,8 Ω (20 / 210 °C)
podélná indukčnost budícího vinutí:	2,9 H
příčná indukčnost budícího vinutí:	1,2 H
nejvyšší trvale přípustný proud statoru:	20 A
nejvyšší trvale přípustný proud rotoru:	5 A
počet závitů budícího vinutí:	260 závitů na pólu

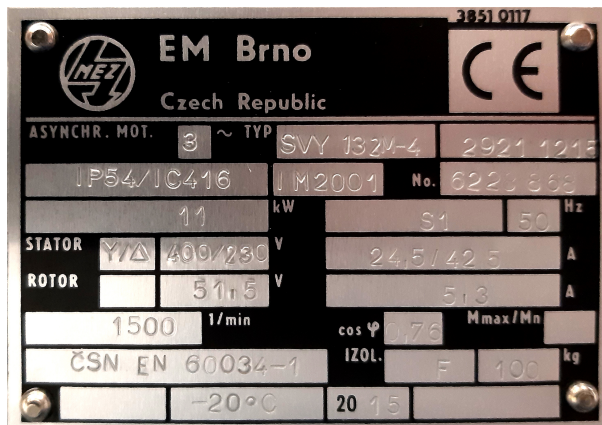
Z uvedených parametrů ze určit jmenovitou impedanci stroje pro obě zapojení jako

$$Z_{nY} = \frac{U_{nY}}{\sqrt{3} I_{nY}} = \frac{400}{\sqrt{3} \cdot 24,5} = 9,43 \Omega \quad (1.1)$$

respektive

$$Z_{n\Delta} = \frac{U_{n\Delta}}{\sqrt{3} I_{n\Delta}} = \frac{230}{\sqrt{3} \cdot 42,5} = 3,12 \Omega \quad (1.2)$$

Jmenovitý vzdálený výkon stroje pak vychází shodný s drobnou zaokrouhlovací odchylkou



Obr. 1.2: Štítek stroje SVY 132M-4

$$S_{nY} = \sqrt{3} U_{nY} I_{nY} = \sqrt{3} \cdot 400 \cdot 24,5 = 16974,10 \text{ VA} \quad (1.3)$$

a pro zapojení do trojúhelníka

$$S_{n\Delta} = \sqrt{3} U_{n\Delta} I_{n\Delta} = \sqrt{3} \cdot 230 \cdot 42,5 = 16930,80 \text{ VA} \quad (1.4)$$

Předpokládáme-li, že jmenovitý výkon stroje souhlasí s výkonem na hřídeli (motor), je součin účinníku a účinnosti stroje

$$\eta \cos \varphi = \frac{P_n}{S_n} = \frac{11000}{16974,10} = 0,648 \quad (1.5)$$

a účinnost stroje tak vychází

$$\eta = \frac{\eta \cos \varphi}{\cos \varphi} \cdot 100 = \frac{0,648}{0,76} \cdot 100 = 85,27 \% \quad (1.6)$$

Jmenovitý moment stroje je pak dle dodaných údajů

$$M_n = \frac{P_n}{\omega_s} = \frac{30 P_n}{\pi n} = \frac{30 \cdot 11000}{\pi \cdot 1500} = 70,03 \text{ Nm} \quad (1.7)$$

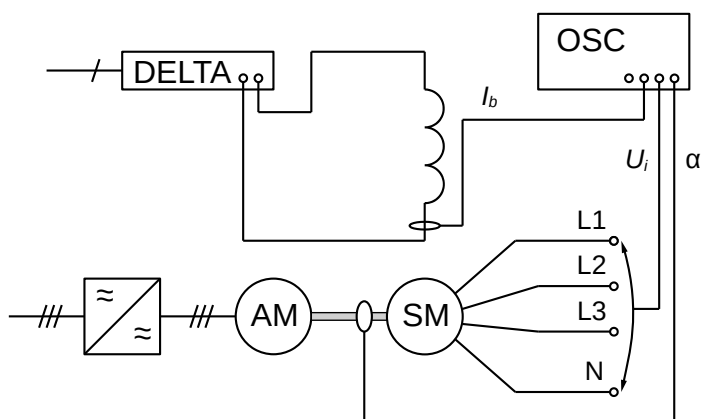
2 Měření stroje

Všechna měření stroje probíhala v laboratoři RICE za pomoci osciloskopu Tektronix MSO4104B [3], přičemž měřený stroj byl v případě všech měření spojen v soustrojí s asynchronním strojem poháněným z měniče SIEMENS Simotics S120 [4]. Buzení stroje bylo řešeno napájením ze stabilizovaného zdroje DELTA Elektronika SM66-AR-110 [5]. Analýza získaných hodnot byla provedena v software GNU/Octave [6], přičemž vzorkovaná data obsahovala 10 (20) milionů vzorků. Z tohoto důvodu nejsou součástí zprávy tabulky naměřených hodnot, nýbrž pouze hodnoty z průběhů dopočtené buď za pomoci skriptu přímo v GNU/Octave nebo odečtením z naměřených grafických závislostí.

Veškeré zkoušky a zpracování výsledků probíhaly v souladu s ČSN EN 60034-4-1 [7], přičemž vzhledem k některým technickým omezením pracoviště (zejména omezené buzení) nebyly měřeny některé mezní stavy.

2.1 Zkouška naprázdno

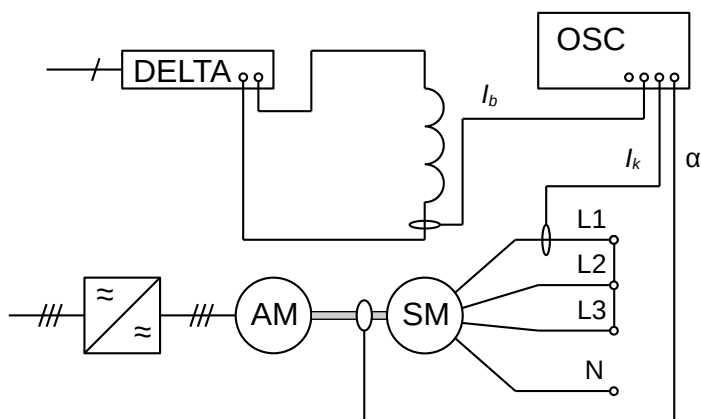
Zkoušky naprázdno a nakrátko na měřeném stroji probíhaly v generátorickém režimu za účelem určení charakteristik naprázdno a nakrátko pro potřeby získání hodnoty syčené a nesycené reaktance stroje. Obě zkoušky probíhaly při synchronní rychlosti $n = 1500 \text{ ot/min}$. Schéma zapojení zkoušky naprázdno je uvedeno na Obr. 2.1. V průběhu zkoušky byl zvyšován budící proud strojem až do hodnoty $I_b = 7,4 \text{ A}$, indukované napětí tak dosáhlo hodnoty $U_{ib} = 274 \text{ V}$, tzn. přibližně 120 % U_n . Graficky je naměřená charakteristika vynesena spolu s charakteristikou nakrátko na Obr. 2.3.



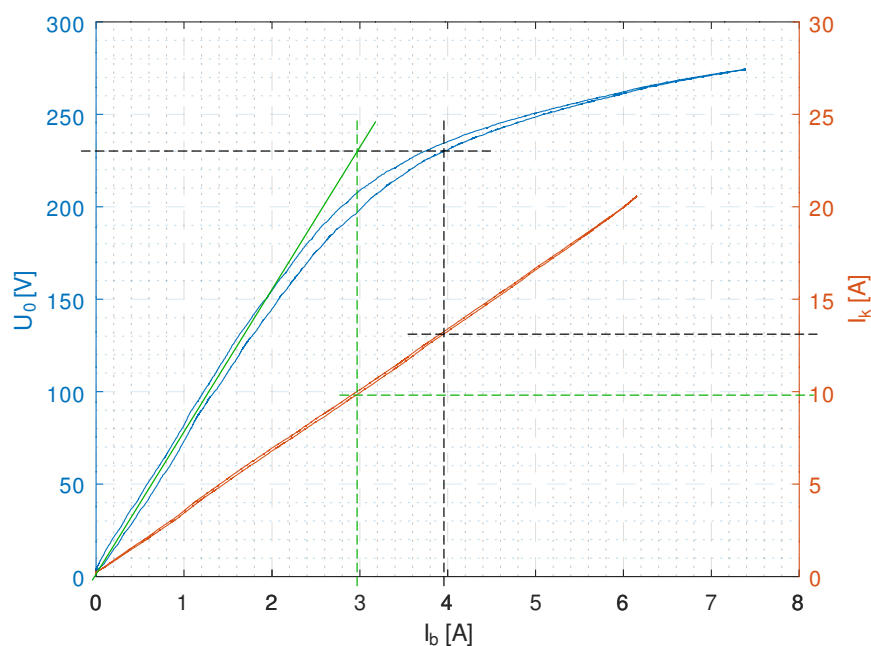
Obr. 2.1: Schéma zapojení pro měření naprázdno

2.2 Zkouška nakrátko

Měření nakrátko proběhlo v režimu symetrického třífázového zkratu, jak je naznačeno na Obr. 2.2. Při měření bylo dosaženo datasheetové hodnoty jmenovitého proudu ($I_k = 20 \text{ A}$), které odpovídá budící proud $I_b = 6,2 \text{ A}$. Charakteristika naměřená při měření nakrátko je uvedena na Obr. 2.3 spolu s naměřenou charakteristikou naprázdno a naznačeným odečtem veličin pro potřeby určení syčené a nesycené reaktance stroje.



Obr. 2.2: Schéma zapojení pro měření nakrátko



Obr. 2.3: Charakteristiky naprázdno a nakrátko stroje SVY 132M-4

Obě naměřené charakteristiky jsou doplněny charakteristikou vzduchové mezery (zeleně) a průsečíky odpovídajícími buzení pro jmenovité napětí a odpovídajícím proudům z měření nakrátko. Z odečtených hodnot vychází syčená reaktance stroje

$$X_{ds} = \frac{U_{ib}}{I_{ks}} = \frac{230}{13,05} = 17,62 \Omega \quad (2.1)$$

a její nesycená hodnota

$$X_{dn} = \frac{U_{ib}}{I_{kn}} = \frac{230}{9,90} = 23,23 \Omega \quad (2.2)$$

V poměrných hodnotách jsou pak tyto reaktance rovny

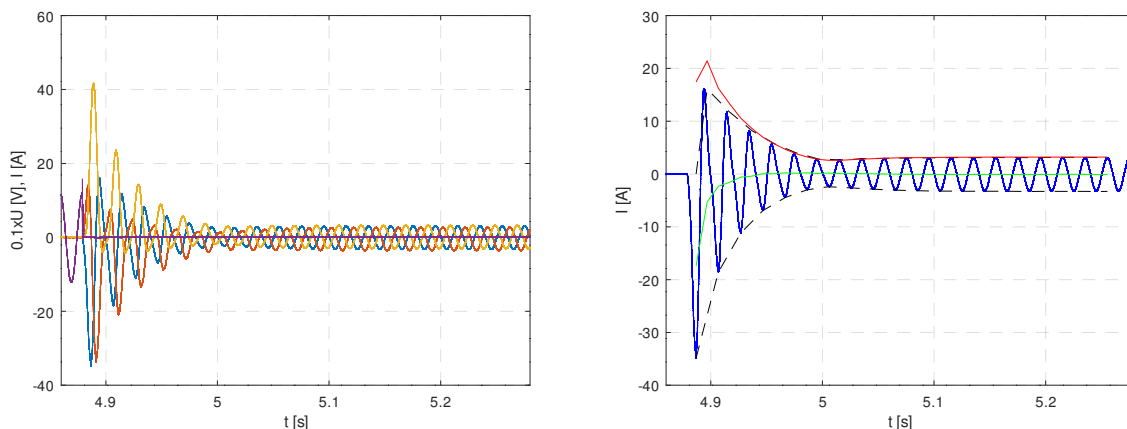
$$x_{dn} = \frac{X_{dn}}{Z_n} = \frac{17,62}{9,43} = 1,87 \text{ p.u.} \quad (2.3)$$

a

$$x_{dn} = \frac{X_{dn}}{Z_n} = \frac{23,23}{9,43} = 2,46 \text{ p.u.} \quad (2.4)$$

Naměřené hodnoty pak odpovídají indukčností

$$L_{ds} = \frac{X_{ds}}{\omega_1} = \frac{17,62}{2 \cdot \pi \cdot 50} = 56,10 \text{ mH} \quad (2.5)$$



Obr. 2.4: Naměřené průběhy napětí a proudů (vlevo) a analyzovaný proud fází L1 (vpravo)

a

$$L_{dn} = \frac{X_{dn}}{\omega_1} = \frac{23,23}{2 \cdot \pi \cdot 50} = 73,95 \text{ mH} \quad (2.6)$$

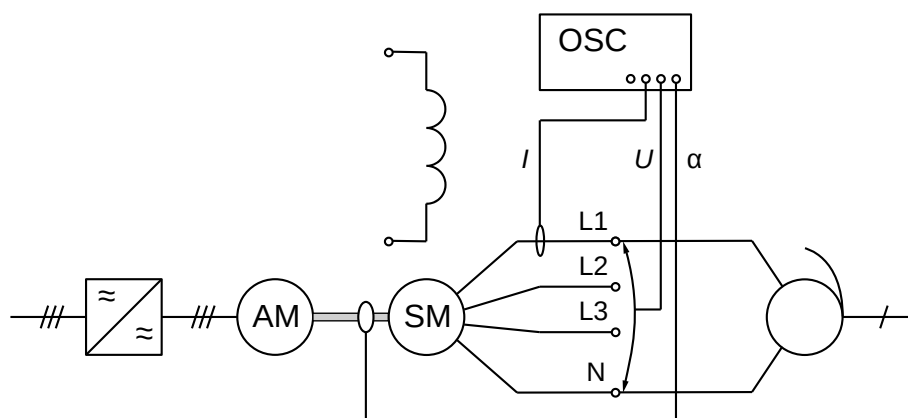
Zároveň lze určit převod proudu synchronního stroje jako

$$g_i = \frac{I_{b0}}{I_{ks}} = \frac{3,95}{13,05} = \frac{1}{3,304} \quad (2.7)$$

Z výše uvedených hodnot je patrná značná blízkost jmenovitého budícího proudu a trvale přípustného budícího proudu (3,95 A vs. 5,3 A), což ukazuje na fakt, že buzení stroje je značně poddimenzované a stroj bude při jmenovitém buzení pracovat v podbuzeném režimu s induktivním účínkem.

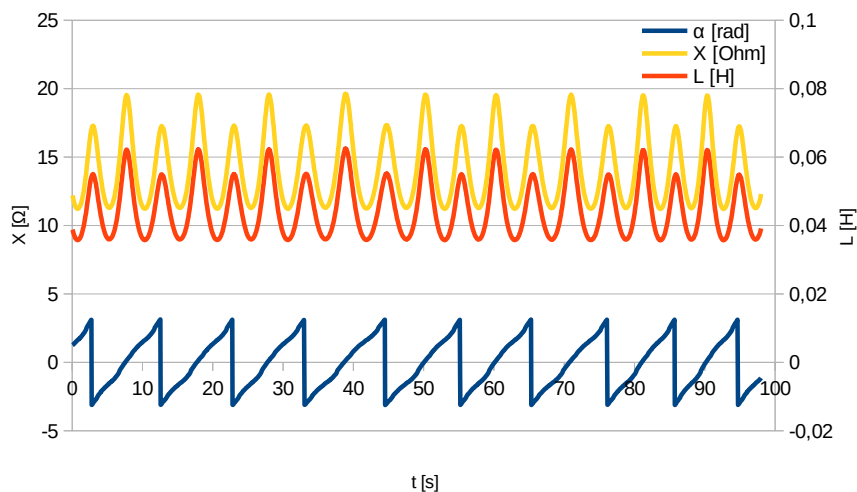
2.3 Měření indukčností skluzovou metodou

Měření indukčností stroje bylo provedeno skluzovou metodou při napájení jedné fáze statoru autotransfornátorem napětím o efektivní hodnotě přibližně 10 V. Za pomoci nastavení rychlosti asynchronního stroje měničem bylo dosa-



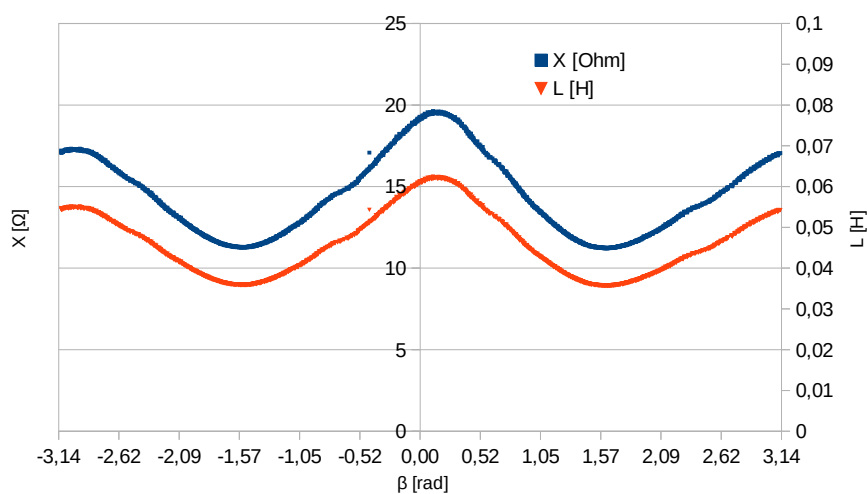
Obr. 2.5: Schéma zapojení pro měření reaktancí skluzovou metodou

ženo mírného prokluzu mezi otáčením synchronního stroje a napájením napětím z autotransfornátoru. V rámci měřeného okna o délce cca 100 s bylo dosaženo přibližně devíti prokluzů stroje o 360° elektrických. Naměřené a dopočtené hodnoty polohy, indukčnosti a reaktance v průběhu měření jsou uvedeny v Obr. 2.6.



Obr. 2.6: Časový průběh polohy rotoru, reaktance a indukčnosti stroje

Z naměřených hodnot lze přímo vynést závislost indukčnosti stroje na poloze rotoru, viz Obr. 2.7. Z výsledků měření je patrné, že indukčnost stroje kolísá mezi hodnotami $L_q = 35,71 \text{ mH}$ a $L_d = 62,49 \text{ mH}$. Naměřená hodnota indukčnosti pak leží mezi dříve určenými hodnotami syčené a nesyčené indukčnosti, což potvrzuje správnost těchto hodnot.



Obr. 2.7: Závislost indukčnosti stroje SVY 132M-4 na poloze rotoru

V poměrných hodnotách pak jsou hodnoty určených reaktancí

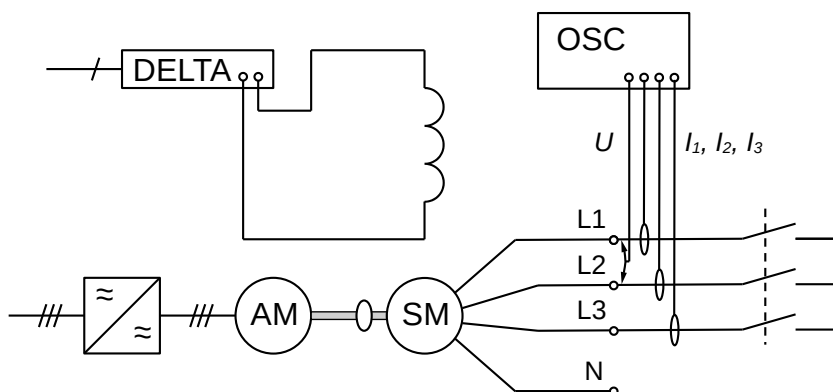
$$x_d = \frac{X_d}{Z_n} = \frac{19,63}{9,43} = 2,08 \text{ p.u.} \quad (2.8)$$

respektive

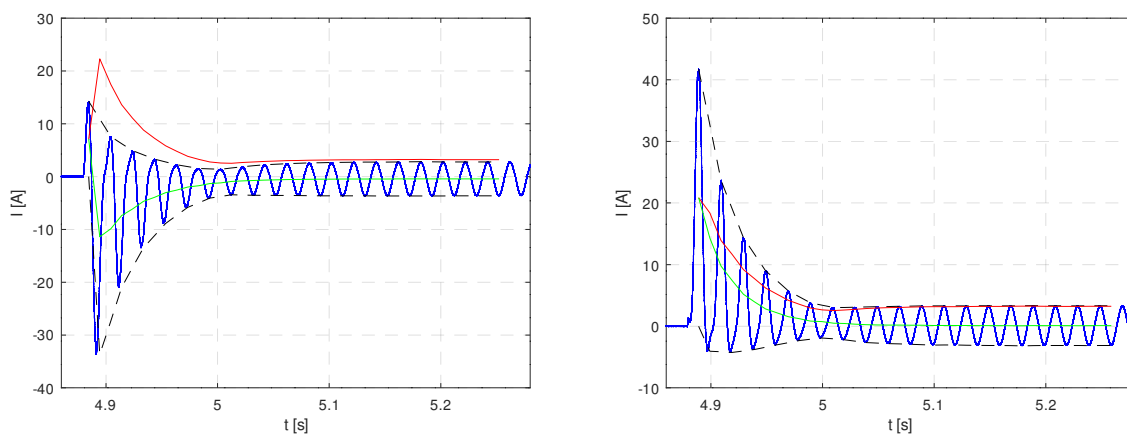
$$x_q = \frac{X_q}{Z_n} = \frac{11,22}{9,43} = 1,19 \text{ p.u.} \quad (2.9)$$

2.4 Zkouška náhlým třífázovým zkratem

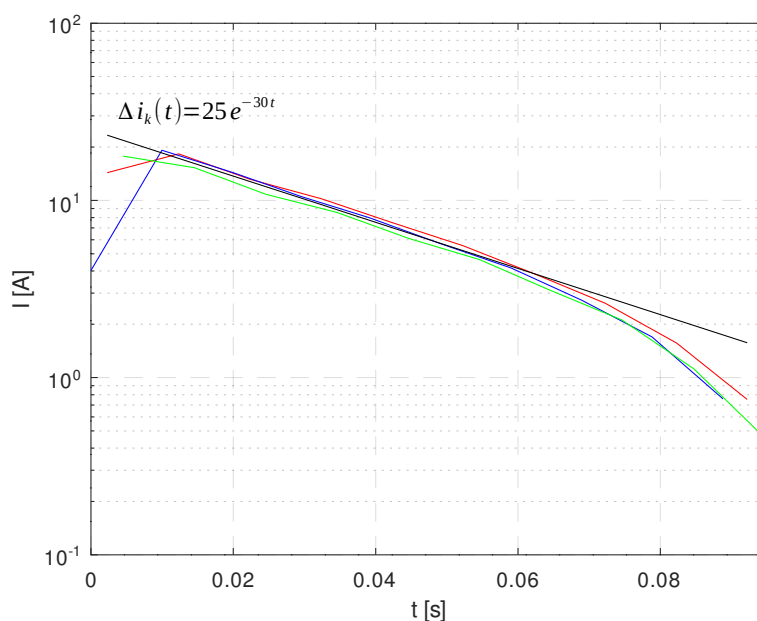
Pro potřeby zkoušky stroje náhlým třífázovým zkratem byly měřeny všechny tři hodnoty proudů a jedna hodnota sdruženého napětí. Před vznikem zkratu bylo nastaveno sdružené napětí statoru na hodnotu 85,86 V a následně byly za pomoci osciloskopu snímány průběhy všech tří proudů. Naměřené a analyzované průběhy jsou uvedeny v Obr. 2.4 až Obr. 2.10.



Obr. 2.8: Schéma zapojení pro zkoušku náhlým třífázovým symetrickým zkratem



Obr. 2.9: Analyzovaný proud fázemi L2 (vlevo) a L3 (vpravo)



Obr. 2.10: Přechodové složky proudu jednotlivých fází

Analýzou naměřených průběhů byla určena efektivní ustálená hodnota zkratového proudu strojem jako $I_k = 2,19 \text{ A}$, což dává podélnou reaktanci stroje

$$X_{dn} = \frac{U_k}{\sqrt{3} I_k} = \frac{85,86}{\sqrt{3} \cdot 2,19} = 22,67 \Omega \quad , \quad (2.10)$$

což je hodnota přibližně odpovídající hodnotě určené na základě měření naprázdno a nakrátko v kap. 2.1 a 2.2. Odtud nesycená hodnota podélné indukčnosti

$$L_{dn} = \frac{X_{dn}}{\omega_1} = \frac{22,67}{2 \cdot \pi \cdot 50} = 72,15 \text{ mH} \quad . \quad (2.11)$$

Z analýzy přechodových složek jednotlivých fází vychází aproximující rovnice přechodné složky proudu

$$\Delta i_k = 25 e^{-30t} \quad , \quad (2.12)$$

přechodná impedance stroje je tedy

$$Z_d' = \frac{U_k}{\sqrt{3} \left(I_k + \frac{\Delta i_k}{\sqrt{2}} \right)} = \frac{85,86}{\sqrt{3} \cdot \left(2,19 + \frac{25}{\sqrt{2}} \right)} = 2,50 \Omega \quad . \quad (2.13)$$

Při zanedbání ohřevu statorového odporu je pak přechodná reaktance stroje

$$X_d' = \sqrt{Z_d'^2 - R_a^2} = \sqrt{2,50^2 - 0,4^2} = 2,46 \Omega \quad . \quad (2.14)$$

Odpovídající přechodná hodnota indukčnosti stroje je pak

$$L_d' = \frac{X_d'}{\omega_1} = \frac{2,46}{2 \cdot \pi \cdot 50} = 7,84 \text{ mH} \quad . \quad (2.15)$$

V poměrných hodnotách jsou pak hodnoty určených reaktancí za pomoci měření náhlého tří-fázového zkratu

$$x_{dn} = \frac{X_{dn}}{Z_n} = \frac{22,67}{9,43} = 2,38 \text{ p.u.} \quad (2.16)$$

respektive

$$x_d' = \frac{X_d'}{Z_n} = \frac{2,46}{9,43} = 0,26 \text{ p.u.} \quad . \quad (2.17)$$

Obě určené hodnoty odpovídají běžným poměrným hodnotám pro čtyřpólové synchronní stroje, lze je tedy považovat za správně určené. Nicméně, při pohledu na Obr. 2.10 je zřejmé, že naměřeným průběhům zcela chybí rázová složka proudu. To ukazuje na možnost, že stroj je buď vyroben bez tlumiče, nebo jeho časová konstanta je natolik krátká, že se jeho efekt nepromítá do naměřených hodnot.

3 Dopočtené parametry stroje pro potřeby optimálního řízení

3.1 Převod proudu a indukčnosti

Převod proudu synchronního stroje je dle [8] definován jako

$$g_i = \frac{C_{d1}}{C_{b1}} \cdot \frac{2\sqrt{2} m N_s k_{v1}}{\pi N_b} . \quad (3.1)$$

Porovnáme-li tento vztah se vztahem (3.10) z [1], je zřejmé, že v kontextu MTPW je převod proudu modifikován na jeho převrácenou hodnotu zvětšenou o $\sqrt{2}$:

$$g_i' = \frac{C_{b1}}{C_{d1}} \cdot \frac{\pi}{2m} \cdot \frac{N_b}{N_s k_{v1}} , \quad (3.2)$$

tzn. z měřených hodnot vychází

$$g_i' = \frac{1}{g_i} \sqrt{2} = 3,304 \cdot \sqrt{2} = 4,672 . \quad (3.3)$$

Pro potřeby přepočtu indukčností stroje je třeba určit převod indukčností, který je definovaný jako

$$g_L' = \frac{C_{d1}}{C_{b1}} \cdot \frac{2m}{\pi} \cdot \left(\frac{N_s k_{v1}}{N_b} \right)^2 . \quad (3.4)$$

Vzhledem k tomu, že nejsou dostupné údaje o topologii vinutí stroje, je třeba orientačně určit poměr počtu závitů statorového vinutí, jeho činitele a počtu závitů budícího vinutí z (3.2) jako

$$\frac{N_b}{N_s k_{v1}} = \frac{2 C_{d1} g_i' m}{\pi C_{b1}} , \quad (3.5)$$

přičemž za poměr C_{b1}/C_{d1} lze dosadit za předpokladu činitele pólového krytí $\alpha_m = 0,75$ dle [9]

$$\frac{C_{b1}}{C_{d1}} = \frac{4 \sin\left(\alpha_m \frac{\pi}{2}\right)}{\alpha_m \pi + \sin(\alpha_m \pi)} = \frac{4 \sin\left(0,75 \cdot \frac{\pi}{2}\right)}{0,75 \cdot \pi + \sin(0,75 \cdot \pi)} = 1,21 , \quad (3.6)$$

odtud

$$\frac{N_b}{N_s k_{v1}} = \frac{2 C_{d1} g_i' m}{\pi C_{b1}} = \frac{2 \cdot 4,672 \cdot 3}{1,21 \cdot \pi} = 7,40 \quad . \quad (3.7)$$

Převod indukčností je tak

$$g_L' = \frac{C_{d1}}{C_{b1}} \cdot \frac{2m}{\pi} \cdot \left(\frac{N_s k_{v1}}{N_b} \right)^2 = \frac{1}{1,21} \cdot \frac{2 \cdot 3}{\pi} \cdot \left(\frac{1}{7,40} \right)^2 = 0,02894 \quad . \quad (3.8)$$

3.2 Koeficienty optimálního řízení

Pro potřeby určení koeficientů optimálního řízení pro stroj SVY 132M-4 je třeba určit přepočtenou hodnotu rotorové indukčnosti na stator, která je

$$L_b' = g_L' L_b = 0,02894 \cdot 2,9 = 83,91 \text{ mH} \quad . \quad (3.9)$$

Jednotlivé koeficienty optimálního řízení pak vycházejí:

$$\text{konstanta odporů} \quad k_R = \frac{2 R_b}{m R_a} = \frac{2 \cdot 6,70}{3 \cdot 0,4} = 11,167 \quad (3.10)$$

$$\text{konstanta indukčností} \quad k_L = \frac{L_d - L_q}{g_i' L_b'} = \frac{62,49 - 35,71}{4,672 \cdot 83,91} = 0,066 \quad (3.11)$$

$$\text{koeficient optimálního buzení} \quad k_o = k_R k_L = 11,167 \cdot 0,066 = 0,74 \quad (3.12)$$

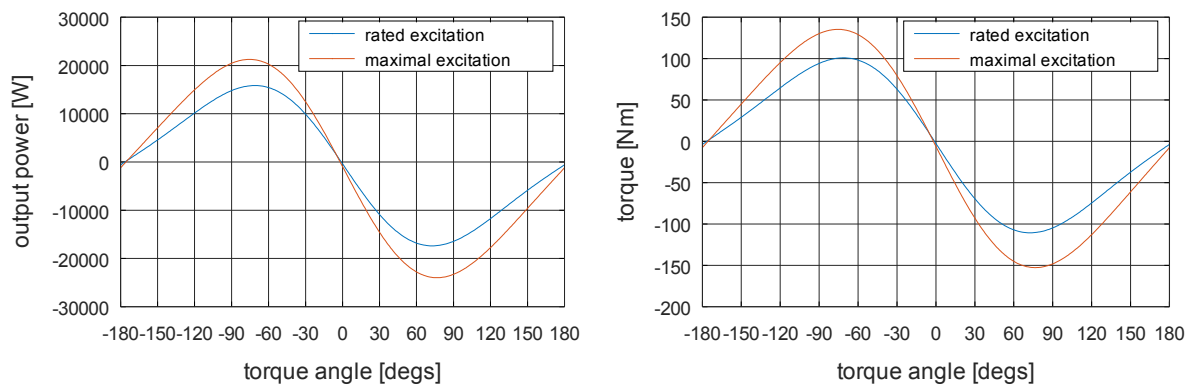
$$\text{koeficient proudů } d \text{ a } q \quad k_{dq} = \sqrt{\frac{k_R k_L^2}{1 - k_R k_L^2}} = \sqrt{\frac{11,167 \cdot 0,066^2}{1 - 11,167 \cdot 0,066^2}} = 0,227 \quad (3.13)$$

$$\text{koeficient elmg. momentu} \quad k_M = \frac{1}{\sqrt{k_R - k_R^2 k_L^2}} = \frac{1}{\sqrt{11,167 - 1,167^2 \cdot 0,066^2}} = 0,307 \quad (3.14)$$

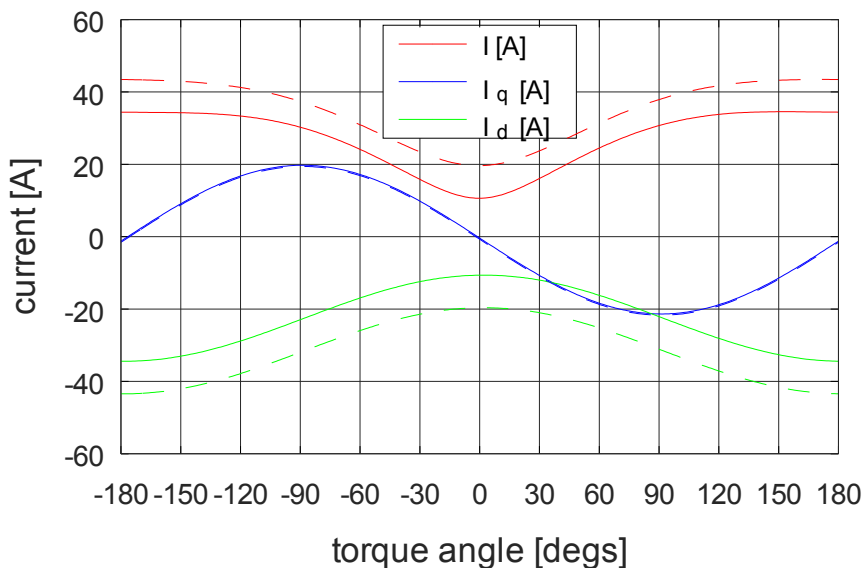
4 Analýza charakteristik stroje

4.1 Zatěžovací charakteristiky

Zatěžovací charakteristiky stroje byly vyneseny za pomoci analytických vztahů umožňujících uvažování odpor statorového vinutí odvozených v [10]. Charakteristiky jsou odvozeny pro jmenovité napětí a rychlost.



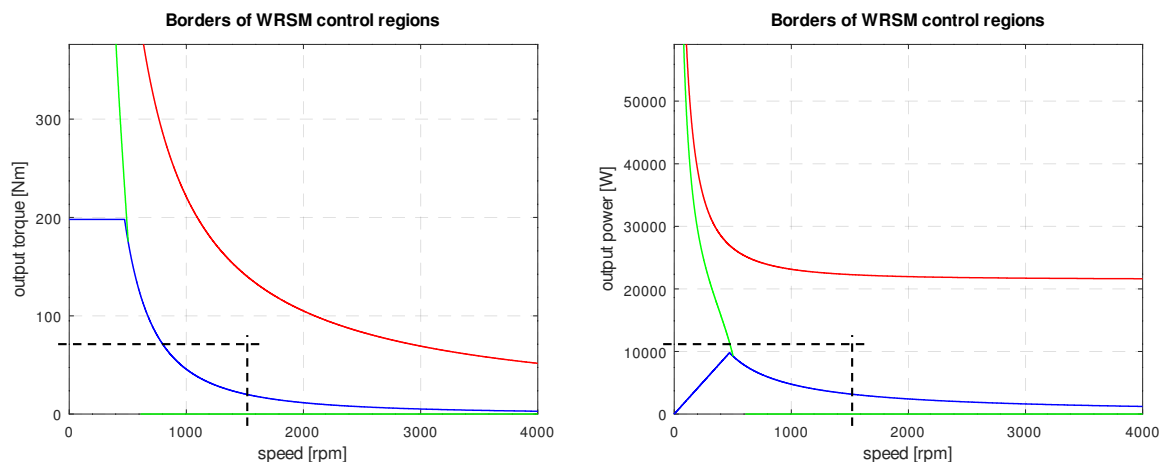
Obr. 4.1: Výkonová a momentová charakteristika pro jmenovité a maximální buzení stroje



Obr. 4.2: Proudové charakteristiky stroje

4.2 Oblasti říditelnosti stroje SVY 132M-4

Za pomoci skriptu pro analýzu oblastí říditelnosti synchronních strojů s vinutým rotorem byly analyzovány s využitím měřených parametrů oblasti říditelnosti stroje SVY 132M-4. Vynesené závislosti jsou zobrazeny na Obr. 4.3, přičemž jmenovitý bod stroje je doplněn nitkovým křížem.



Obr. 4.3: Oblasti říditelnosti synchronního stroje SVY 132M-4

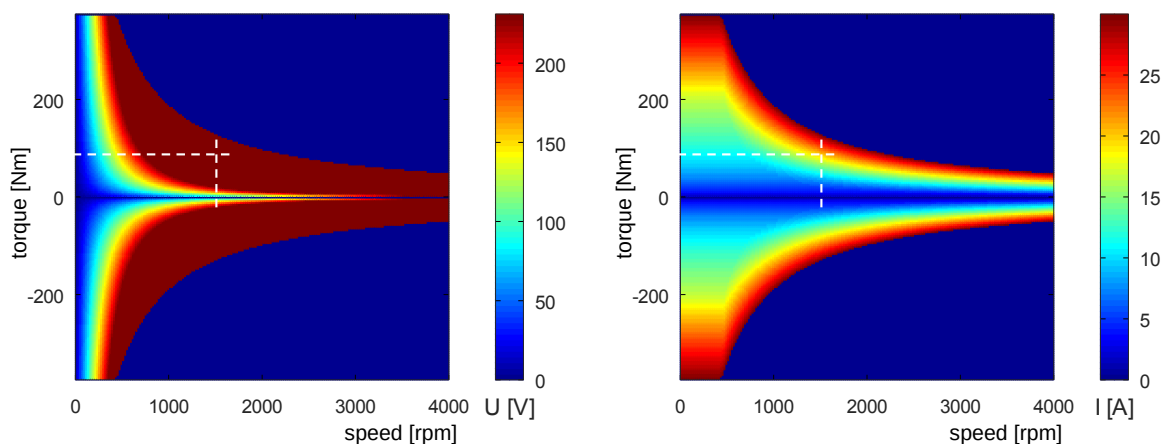
Analýza oblastí říditelnosti byla provedena (stejně jako analýza provozních map stroje v kap. 4.3) za předpokladu maximálního budicího proudu stroje $I_{bmax} = 7 \text{ A}$ a maximálního statorového proudu $I_{max} = 30 \text{ A}$. Pro názornost je dále rozšířen otáčkový rozsah stroje až do 4000 ot/min . V Obr. 4.3 jsou pak vyznačeny hranice oblastí říditelnosti stroje dle jednotlivých strategií – hranice optimálního řízení MTPW je vyznačena modrou čarou (dolní oblast), hranice řízení za pomoci MTPA (maximální možný budicí proud) je vyznačena zeleně (levá horní oblast) a vnější hranice odbuzování, za kterou již není možné za daných omezení stroj provozovat, je vyznačena červenou čarou (hyperbolická oblast vpravo nahoře).

Z vynesných závislostí je patrné, že stroj je schopen v nízkých otáčkách dodávat moment až cca 200 Nm při zachování optimálního provozu dle MTPW. Nad tímto momentem již není možné zvyšovat budicí proud, tzn. je třeba přejít na řízení dle MTPA pro stroje s konstantním buzením (PMSM), s nímž lze dosáhnout v nízkých rychlostech až téměř 400 Nm . Spolu se zvyšující se rychlostí je následně třeba přejít do režimu adaptivního odbuzování, díky čemuž začíná postupně maximální dostupný moment stroje klesat.

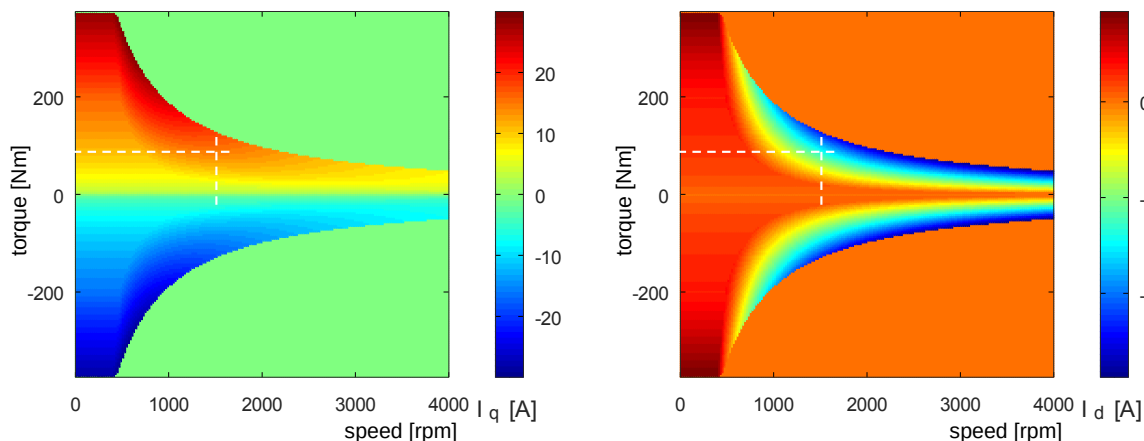
Vzhledem k tomu, že stroj je navržen jako tradiční synchronní stroj s poměrně vysokými indukčnostmi, nachází se jeho pracovní bod v oblasti adaptivního odbuzování, tudíž mimo optimální oblast provozu. Při uvažování jmenovitého momentu se pak hranice optimálního provozu nachází na přibližně polovině jmenovité rychlosti stroje.

4.3 Trakční charakteristiky

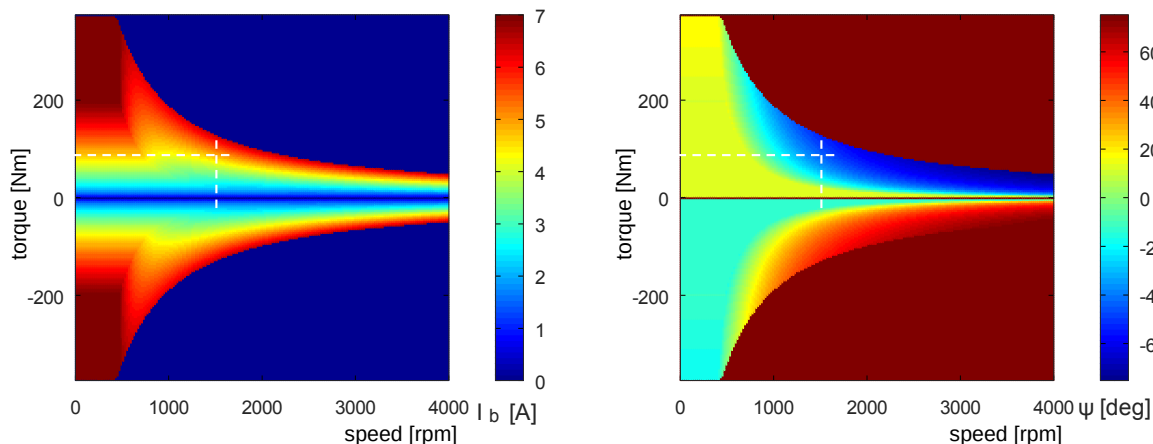
Trakční charakteristiky stroje byly vyneseny za pomoci dříve vytvořeného nástroje naprogramovaného v GNU/Octave. Ve všech charakteristikách je pro doplnění vynesena jmenovitý bod pomocí nitkového kříže.



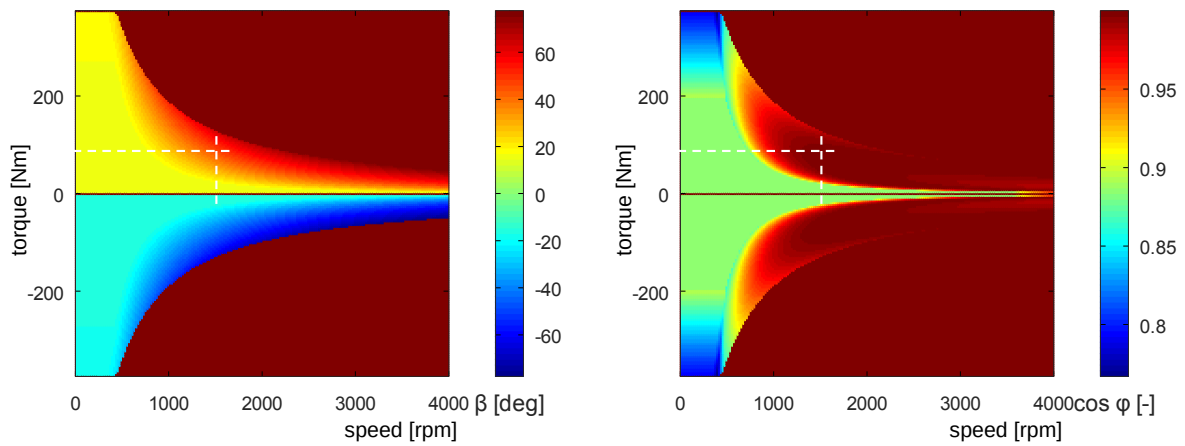
Obr. 4.4: Napěťová (vlevo) a proudová (vpravo) mapa stroje



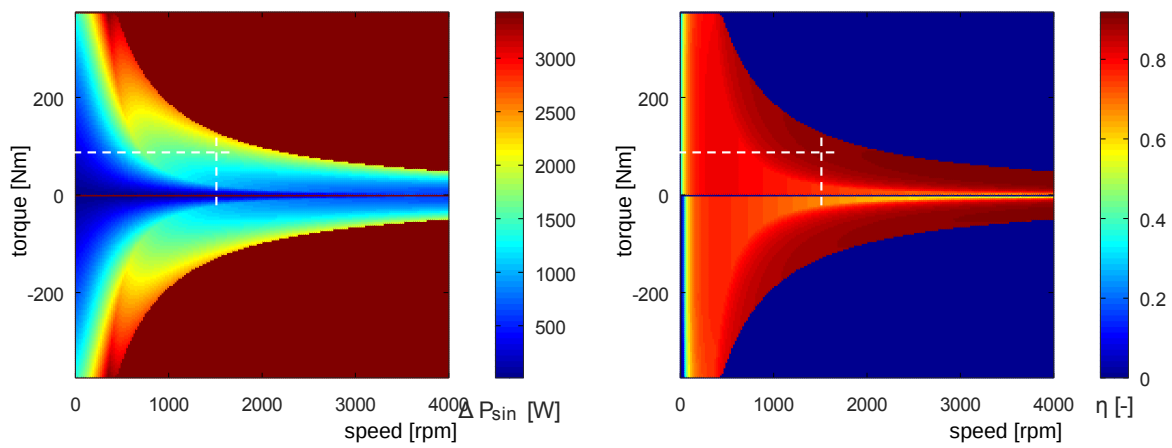
Obr. 4.5: Mapy proudů v příčné (vlevo) a podélné (vpravo) ose stroje



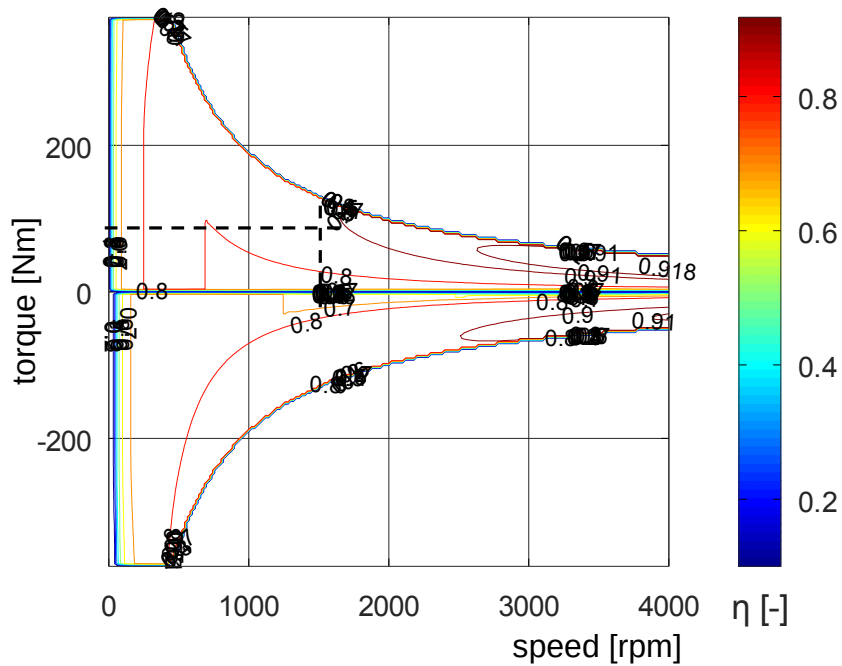
Obr. 4.6: Mapa budícího proudu (vlevo) a vnitřního účinku stroje (vpravo)



Obr. 4.7: Mapa zátěžného úhlu stroje (vlevo) a účinníku (vpravo)



Obr. 4.8: Mapa ztrát (vlevo) a účinnosti stroje (vpravo)



Obr. 4.9: Mapa účinnosti stroje

Z obdržených map je zřejmé, že jmenovitý bod provozu stroje se nachází mimo oblast, kde je použitelná strategie řízení MTPW a je již nutné použít adaptivní odbuzování stroje. Tento fakt je dán zejména tradiční koncepcí stroje, kdy 4-pólové stroje jsou navrhovány s poměrně vysokou podélnou indukčností, díky které je nutné stroj odbuzovat v poměrně nízkých rychlostech. Tento fakt je zřejmý i ze zatěžovacích charakteristik stroje, kdy podélná složka proudu vždy nabývá záporných hodnot. Pro jmenovitý bod pak v případě použití adaptivního odbuzování stroje vychází účinnost 88,65 % při 20 °C respektive 87,2 % při jmenovitých teplotách odporů, což přibližně koresponduje s dodanou dokumentací.

5 Závěr

Souhrn parametrů náhradního schématu měřeného stroje je uveden v tabulce 5.1. Z výsledků je patrná dobrá korespondence syčené hodnoty nesyčené indukčnosti stroje mezi zkouškami naprázdno a nakrátko a zkouškou trojfázovým zkratem. Hodnota podélné indukčnosti určená za pomoci skluzové metody pak vychází mírně nižší, což může být důsledkem konstrukčního provedení stroje (masivní pólové nástavce, případný tlumič apod.).

parametr	hodnota	jednotka	poznámka
R_{a20}	0,40	Ω	dokumentace
$R_{a\theta}$	0,56	Ω	120 °C, dokumentace
R_{b20}	6,70	Ω	dokumentace
$R_{b\theta}$	11,80	Ω	210 °C, dokumentace
$L_{a\sigma}$	2,23	mH	dokumentace
L_b	2,90	H	dokumentace
L_{ds}	56,10	mH	zkoušky naprázdno a nakrátko
L_{dn}	73,95	mH	zkoušky naprázdno a nakrátko
L_d	62,49	mH	skluzová metoda
L_q	35,71	mH	skluzová metoda
L_{dn}	72,15	mH	třířázový zkrat
L_d'	7,84	mH	třířázový zkrat

Tab. 5.1: Parametry náhradního schématu stroje SVY 132M-4

S využitím výše uvedených výsledků byly následně dopočítány parametry pro potřeby nastavení optimálního řízení stroje. Za pomoci těchto parametrů byly dále vyneseny provozní mapy stroje, z nichž je patrné, že stroj není optimálně provozovatelný až do jmenovité rychlosti, nýbrž přibližně do jedné poloviny této hodnoty, nad ní je stroj třeba odbuzovat. Přehled dopočtených parametrů je uveden v Tab. 5.2.

parametr	hodnota	jednotka	poznámka
g_i	0,303	-	
g_i'	4,672	-	
g_L	0,029	-	
k_R	11,167	-	pro 20 °C
k_L	0,066	-	pro L_d a L_q
k_o	0,740	-	20 °C, L_d , L_q
k_{dq}	0,227	-	
k_M	0,307	-	

Tab. 5.2: Parametry pro optimální řízení stroje SVY 132M-4

Literatura

- [1] Hruška, K.: *Ztrátově optimální řízení synchronních strojů s vinutým rotorem*. ZČU, Plzeň, 2020 (akt. 2022). Výzkumná zpráva č. 22190 – 013 – 2020.
- [2] EM Brno, s. r. o.: *Synchronní motor s vinutým rotorem SVY 132M-4*. EM Brno, s. r. o., Brno, 2015. Výzkumná zpráva č. N/A.
- [3] Tektronix, Inc.: *MSO/DPO4000 Mixed Signal Oscilloscope (Discontinued)* [online]. <<https://www.tek.com/en/products/oscilloscopes/mso4000-dpo4000>> [cit. 2023]
- [4] Siemens A. G.: *SINAMICS S120 – the flexible and high-performance drive system* [online]. <<https://www.siemens.com/global/en/products/drives/sinamics/low-voltage-converters/servo-converter/sinamics-s120.html>> [cit. 2023]
- [5] Delta Elektronika: *SM3300 SERIES* [online]. <<https://www.delta-elektronika.nl/products/sm3300-series>> [cit. 2023]
- [6] Eaton, J. W.; Bateman, D.; Hauberg, S.; Wehbring, R.: *GNU Octave version 7.3.0 manual: a high-level interactive language for numerical computations* [online]. <<https://www.gnu.org/software/octave/doc/v7.3.0/>> [cit. 2022]
- [7] Česká agentura pro standardizaci: ČSN EN IEC 60034-4-1 *Točivé elektrické stroje - Část 4-1: Metody určování veličin elektricky buzených synchronních strojů ze zkoušek*. ČAS, Praha, 2019.
- [8] Bartoš, V.: *Teorie elektrických strojů*. Plzeň, Vydavatelství ZČU, 2006. ISBN 80-7043-509-7
- [9] Bašta, J.: *Teorie elektrických strojů*. Praha, ČSAV, 1957. ISBN (DT) 621.313.01
- [10] Laksar, J.: *Momentové rovnice synchronních strojů*. FEL ZČU, Plzeň, 2020. Výzkumná zpráva č. 22190 – 010 – 2020.

Seznam obrázků

Obr. 1.1: Stroj SVY 132M-4 v laboratoři RICE.....	7
Obr. 1.2: Štítek stroje SVY 132M-4.....	8
Obr. 2.1: Schéma zapojení pro měření naprázdno.....	9
Obr. 2.2: Schéma zapojení pro měření nakrátko.....	9
Obr. 2.3: Charakteristiky naprázdno a nakrátko stroje SVY 132M-4.....	10
Obr. 2.4: Naměřené průběhy napětí a proudů (vlevo) a analyzovaný proud fází L1 (vpravo).....	11
Obr. 2.5: Schéma zapojení pro měření reaktancí skluzovou metodou.....	11
Obr. 2.6: Časový průběh polohy rotoru, reaktance a indukčnosti stroje.....	12
Obr. 2.7: Závislost indukčnosti stroje SVY 132M-4 na poloze rotoru.....	12
Obr. 2.8: Schéma zapojení pro zkoušku náhlým třífázovým symetrickým zkratem.....	13
Obr. 2.9: Analyzovaný proud fázemi L2 (vlevo) a L3 (vpravo).....	13
Obr. 2.10: Přechodové složky proudu jednotlivých fází.....	13
Obr. 4.1: Výkonová a momentová charakteristika pro jmenovité a maximální buzení stroje.....	18
Obr. 4.2: Proudové charakteristiky stroje.....	18
Obr. 4.3: Oblasti říditelnosti synchronního stroje SVY 132M-4.....	19
Obr. 4.4: Napěťová (vlevo) a proudová (vpravo) mapa stroje.....	20
Obr. 4.5: Mapy proudů v příčné (vlevo) a podélné (vpravo) ose stroje.....	20
Obr. 4.6: Mapa budícího proudu (vlevo) a vnitřního účinníku stroje (vpravo).....	20
Obr. 4.7: Mapa zátěžného úhlu stroje (vlevo) a účinníku (vpravo).....	21
Obr. 4.8: Mapa ztrát (vlevo) a účinnosti stroje (vpravo).....	21
Obr. 4.9: Mapa účinnosti stroje.....	21

Seznam tabulek

Tab. 5.1: Parametry náhradního schématu stroje SVY 132M-4.....	23
Tab. 5.2: Parametry pro optimální řízení stroje SVY 132M-4.....	23

Historie revizí

Rev.	Kapitola	Popis změny	Datum	Jméno
1.0	Všechny	Publikování dokumentu	29.11.2023	khruska