

Pracoviště: Regionální inovační centrum elektrotechniky

Výzkumná zpráva č.: 22190 – 013 – 2015

Možnosti zkoušení motoru M5 dle ČSN

Druh úkolu: vědecko-výzkumný

Řešitelé: Ing. Karel Hruška, Ph. D.

Vedoucí úkolu: Ing. Karel Hruška, Ph. D.

Počet stran: 18

Datum vydání: 14. 9. 2015

Revize: 1.0

Poznámka: Financováno za pomoci grantu CZ.1.05/2.1.00/03.0094

„Regionální inovační centrum elektrotechniky (RICE).“

Anotace

Tato výzkumná zpráva se zabývá možným rozsahem zkoušek motoru M5 pro zkušebnu RICE dle českých technických norem (ČSN). Stěžejní částí zprávy je řešení zkoušek pro synchronní stroje a synchronní stroje s permanentními magnety.

Seznam symbolů a zkratk

f	napájecí frekvence stroje	[Hz]
H	konstanta akumulované energie	[J]
i_{fk}	budící proud pro jmenovitý proud kotvy nakrátko	[A]
I_b	budící proud	[A]
I_k	proud nakrátko	[A]
J	moment setrvačnosti rotoru	[kg.m ²]
k_U	napěťová konstanta stroje	[V/rpm]
L_d	podélná indukčnost stroje	[H]
M_{rel}	reluktanční moment	[Nm]
n_n	jmenovité otáčky stroje	[ot/min]
ρ_{i60}	polarizační index izolace po 60 sekundách	[-]
R_0	odpor nulové složky	[Ω]
R_2	zpětný odpor	[Ω]
R_2'	odpor sekundární strany vinutí transformátoru přepočtený na primární stranu	[Ω]
R_a	odpor vinutí kotvy	[Ω]
t_{ku}	teplotní koeficient napěťové konstanty	[V.rpm ⁻¹ K ⁻¹]
U_i	indukované napětí	[V]
U_{n1}	jmenovité napětí primární strany transformátoru	[V]
U_{n2}	jmenovité napětí sekundární strany transformátoru	[V]
X_0	netočivá reaktance	[Ω]
X_2	zpětná reaktance	[Ω]
X_2'	rozptylová reaktance sekundární strany vinutí transformátoru přepočtená na primární stranu	[Ω]
X_d	podélná reaktance kotvy, synchronní reaktance	[Ω]
X_d'	podélná přechodová reaktance	[Ω]
X_d''	podélná rázová reaktance	[Ω]
X_{dn}	podélná reaktance kotvy, nesycená	[Ω]
X_{ds}	podélná reaktance kotvy, sycená	[Ω]
X_q	příčná reaktance kotvy, příčná synchronní reaktance	[Ω]
X_q'	příčná přechodová reaktance	[Ω]
X_q''	příčná rázová reaktance	[Ω]
X_σ	rozptylová reaktance vinutí kotvy	[Ω]

Z_{st}	počáteční rozběhová impedance synchronního motoru	[Ω]
β	zátěžný úhel stroje	[$^\circ$]
τ_a	časová konstanta kotvy	[s]
τ_d'	přechodová časová konstanta	[s]
τ_{d0}'	přechodová časová konstanta naprázdno	[s]
τ_d''	rázová časová konstanta	[s]
τ_{d0}''	rázová časová konstanta naprázdno	[s]
τ_j	doba urychlování stroje	[s]
ϑ_{high}	oteplení vinutí	[K]
$\cos \varphi$	účinník	[-]
$\operatorname{tg} \delta$	ztrátový úhel izolace vinutí	[-]

Obsah

Anotace.....	2
Seznam symbolů a zkratk.....	3
1 Úvod.....	6
2 Zkoušky synchronních strojů dle ČSN.....	7
2.1 ČSN 35 0000-1-1: Točivé elektrické stroje - Část 1-1: Doplnující požadavky.....	7
2.2 ČSN EN 60034-1 ed. 2: Točivé elektrické stroje - Část 1: Jmenovité údaje a vlastnosti.....	8
2.3 ČSN EN 60034-4 ed. 2: Točivé elektrické stroje - Část 4: Metody určování veličin synchronního stroje ze zkoušek.....	9
2.4 ČSN EN 60349-2 ed. 2: Elektrická trakce - Točivé elektrické stroje pro kolejová a silniční vozidla - Část 2: Střídavé motory napájené z elektronických měničů.....	10
2.5 ČSN EN 60349-4: Drážní zařízení - Točivé elektrické stroje pro kolejová a silniční vozidla - Část 4: Synchronní elektrické stroje s permanentními magnety napájené z elektronických měničů.....	11
2.6 Možný rozsah zkoušek motoru M5 dle ČSN.....	11
2.7 Poznámky.....	12
3 Možnosti přímého připojení stroje M5 k síti.....	14
Historie revizí.....	18

1 Úvod

Jedním z motorů dodávaných pro zkušebnu RICE je motor M5 firmy Exmont. Tento stroj je z hlediska topologie synchronním strojem s permanentními magnety. Tyto stroje, ačkoliv jsou již běžně provozovány a vyráběny, dosud nemají jednoznačně stanovenou proceduru ani minimální rozsah zkoušek v českých technických normách, které jsou zaměřeny na tradiční synchronní stroje s permanentními magnety.

Pro stanovení možných zkoušek provedených na stroji M5 lze tak vycházet z několika nezávislých sad norem. Vzhledem tomu, že uvedený stroj je vyroben jako zakázkový průmyslový motor, měly by se na jeho zkoušky vztahovat zejména normy řady ČSN 35 00xx, které jsou ale z velké části zrušeny bez náhrady. Tuto řadu norem postupně nahrazuje řada ČSN EN 60 034, která je orientována na klasické průmyslové elektrické stroje. Přímo na synchronní stroje je pak orientována norma ČSN EN 60034-4, která je ale zaměřena na elektricky buzené synchronní stroje, na synchronní stroje s permanentními magnety odkazuje pouze útržkovitě.

Pro zkoušky synchronních strojů s permanentními magnety je tak nejlépe uzpůsobena norma ČSN EN 60349-4, která se orientuje na drážní zařízení a tím pádem na trakční synchronní stroje s permanentními magnety. Aplikovatelnost této normy na motor M5 je tedy omezena samotnou konstrukcí stroje, kdy jsou jiné požadavky kladeny na trakční motory a odlišné na průmyslové motory.

V následujícím textu je provedena rešerše českých technických norem se zaměřením na zkoušení synchronních strojů a zejména strojů s permanentními magnety. Na základě aplikovatelnosti jednotlivých zkoušek na synchronní stroje s permanentními magnety je pak vytvořen průnik jednotlivých norem, který může být použit jako podklad pro stanovení zkušebního harmonogramu stroje M5.

Řadu z uvedených zkoušek je možné provést přímo na stroji připojeném k měniči, některé je však z principu vhodnější provádět při přímém připojení stroje na síť. S ohledem na tento fakt je vhodné provést předběžný výpočet vyrovnávacího proudu, který poteče mezi napájecím transformátorem stroje a strojem M5. Tento výpočet je obsažen v kapitole 3.

2 Zkoušky synchronních strojů dle ČSN

2.1 ČSN 35 0000-1-1: Točivé elektrické stroje - Část 1-1: Doplnující požadavky

Norma ČSN 35 0000-1-1 [2] s platností od srpna 1997 stanovuje rozsah typových zkoušek pro testy točivých elektrických strojů. Níže uvedená tabulka pak obsahuje výběr zkoušek určených pro synchronní stroje. Vzhledem ke stáří uvedené normy tato neobsahuje žádné zmínky o strojích s permanentními magnety.

Na normu ČSN 35 0000-1-1 navazuje norma ČSN 35 0010 [3], která stanovuje konkrétně průběh daných zkoušek. Kapitoly označené jako „10-X“ pak označují kapitoly v normě ČSN 35 0010. Obě výše zmíněné normy pak v některých případech odkazují na normy, které již byly bez náhrady zrušeny, v tomto případě je kapitola pro danou zkoušku označena „XXX“. Odkazy (poznámky) týkající se aplikovatelnosti zkoušek na daný typ stroje jsou pak vysvětleny v Kapitole 2.7

Tabulka I. Typové zkoušky synchronních strojů dle ČSN 35 0000

zkouška	kapitola	výstup	aplikovatelné
Základní mechanické zkoušky	10-4	ověření mechanického návrhu	ano
Měření izolačního odporu	10-8	ověření izolačního systému	ano
Měření činného odporu za studena	10-6.1	R _a	ano
Zkouška závitové izolace		ověření izolačního systému	ano
Zkouška vinutí přiloženým napětím	10-7	ověření izolačního systému	ano
Oteplovací zkouška	---	ověření tepelně-ventilačního výpočtu dle ČSN EN 60034-1	ano
Zkouška mechanické odolnosti	---	ověření mechanického návrhu dle ČSN EN 60034-1 ed. 2	ano ^d
Měření kmitání	XXX	ověření mechanické konstrukce, lze dle ČSN EN 60034-14	ano
Měření hluku	XXX	ověření mechanické konstrukce, lze dle ČSN EN 60034-9 ed. 2	ano
Měření množství chladiva	XXX	ověření ventilačního návrhu	ano
Zkouška krytí	---	ověření IP dle ČSN EN 60034-5	ano
Zkouška odrušení	---	elektromagnetická kompatibilita dle ČSN EN 55011 a 55014	ano ^m
Měření charakteristiky naprázdno	10-6.4	charakteristika naprázdno	ne [*]
Měření charakteristiky nakrátko	10-6.5	charakteristika nakrátko	ano
Kontrola izolace proti hřídelovým proudům	---	ochrana proti ložiskovým proudům, ČSN EN 60034-4	ano ^d
Kontrola sledu fází	6.2	sled fází a směr otáčení	ano

Určení buzení při zatížení a kontrola jmenovitého přírůstku napětí	6.1	I_b	ne ^x
Měření rozptylové Potierovy reaktance	---	X_σ	ne ^x
Kontrola tvaru křivky napětí	10- ---	kvalita indukovaného napětí	ano ^m
Měření ztrát a účinnosti	XXX	ověření elektromagnetického návrhu dle ČSN EN 60034-2-1	ano
Zkouška přetížitelnosti	10-6.7	ověření přetížitelnosti stroje dle ČSN EN 60034-1 ed. 2	ano
Zkratová odolnost a zkratový proud	---	$X_d', X_d'', \tau_a, \tau_d', \tau_d''$, viz ČSN EN 60034-4, kap. 6.12	ano [?]
Měření reaktancí, časových konstant a dalších veličin ze zkoušek	---	Kompletní parametry stroje, viz ČSN EN 60034-4	ano
Měření spouštěcích charakteristik stroje s asynchronním spouštěním	10-10.9	rozběhové charakteristiky	ne ^x
Stanovení momentu setrvačnosti rotoru	---	J, viz ČSN EN 60034-4, kap. 6.29	ano
Měření polarizačního indexu	10-7.11	p_{i60}	ano
Měření ztrátového činitele	6.3.1	$\lg \delta$	ano

2.2 ČSN EN 60034-1 ed. 2: Točivé elektrické stroje - Část 1: Jmenovité údaje a vlastnosti

Česká technická norma ČSN EN 60034-1 ed. 2 [4] s platností od 1. 10. 2011 je českou lokalizací normy IEC 60034. Norma jako taková předepisuje zejména požadované vlastnosti elektrických strojů a jejich izolací pro provoz, zkouškami jako takovými se zabývá pouze minimálně. Z níže uvedených zkoušek uvádí zkoušky v prvním až třetím řádku jako minimální výrobní kusové zkoušky, ostatní zkoušky sice norma definuje, neříká však, zda jde o zkoušky typové, kusové, či jiné.

Tabulka níže obsahuje vybrané zkoušky pro synchronní stroje, přičemž dle normy ČSN EN 60034-1 ed. 2 „termín „synchronní stroje“ zahrnuje i stroje s permanentními magnety“, přesto na tyto stroje nelze všechny zkoušky aplikovat.

Tabulka II. Zkoušky synchronních strojů dle ČSN EN 60 034-1 ed. 2

zkouška	kapitola	výstup	aplikovatelné
Odpor vinutí za studena	---	R_a	ano
Smysl točení	---	ověření sledu fází	ano
Zkouška výdržným napětím	9.2	ověření izolačního systému	ano
Nahodilé proudové přetížení	9.3	ověření proudové odolnosti	ne ^v
Krátkodobé momentové přetížení	9.4	ověření momentové přetížitelnosti	ano
Nejmenší rozběhový moment	9.5	záběrný moment stroje	ne ^x
Bezpečné provozní otáčky asynchronních motorů naprázdno	9.6	mechanická odolnost rotoru	ne ^x
Zvýšené otáčky	9.7	mechanická odolnost rotoru	ano
Zkratový proud synchronních strojů	9.8	velikost zkratového proudu	ano

Zkouška zkratové odolnosti synchronních strojů	9.9	mechanická konstrukce vinutí	ano
Celkové harmonické zkreslení (THD) u synchronních strojů	9.11	kvalita indukovaného napětí	ano ^m

2.3 ČSN EN 60034-4 ed. 2: Točivé elektrické stroje - Část 4: Metody určování veličin synchronního stroje ze zkoušek

Norma ČSN EN 60034-4 ed. 2 [5] s platností od 1. 7. 2011 je plně zaměřena na zkoušky synchronních strojů a uvádí řadu metod, jak lze ověřit elektromagnetický návrh stroje a parametry jeho náhradního schématu. I přes komplexnost této normy se tato norma synchronních strojů s permanentními magnety dotýká jen okrajově, nicméně řadu metod určení parametrů náhradního schématu definovaných touto normou lze na synchronní stroje s permanentními magnety plně aplikovat, případně je lze aplikovat s mírnou modifikací v normě uvedeného postupu.

Stejně jako norma ČSN EN 60034-1 ed. 2 i norma ČSN EN 60034-4 ed. 2 nedefinuje, zda jsou prováděné zkoušky typovými zkouškami, nedefinuje pak ani kusové zkoušky.

Tabulka III. Zkoušky synchronních strojů dle ČSN EN 60 034-4

zkouška	kapitola	výstup	aplikovatelné
Stejnoseměrný odpor vinutí	6.3	R_a	ano
Zkouška naprázdno	6.4	charakteristika naprázdno, X_{dn} , X_{ds}	ne*
Trojfázová zkouška nakrátko	6.5	charakteristika nakrátko, X_{dn} , X_{ds}	ne*
Zkouška motoru naprázdno	6.6	X_d	ne**
Zkouška s natáčením fáze	6.7	X_d , X_q	ne***
Zkouška v přebuzeném stavu při nulovém účinníku	6.8	I_b	ne ^x
Zkouška se záporným buzením	6.9	X_q	ne*
Měření zátěžného úhlu při zatížení	6.10	X_d , X_q , β , $\cos \varphi$	ano
Zkouška s malým skluzem	6.11	X_q	ne***
Zkouška náhlým trojfázovým zkratem	6.12	X_d' , X_d'' , τ_a , τ_d' , τ_d''	ano [?]
Zkouška zotaveného napětí	6.13	X_d' , X_d'' , τ_{d0}' , τ_d''	ne*
Zkouška náhlým trojfázovým zkratem po odpojení od sítě	6.14	X_d' , X_d'' , τ_a , τ_d' , τ_d''	ano [?]
Zkouška dozrívání stejnosměrného proudu ve vinutí kotvy za klidu stroje	6.15	X_d' , X_q' , X_2 , τ_d' , τ_{d0}' , τ_{d0}'' , τ_q' , τ_q'' , τ_{q0}' , τ_{q0}''	ano
Zkouška nárazového buzení s vinutím kotvy naprázdno	6.16	τ_{d0}'	ne*
Zkouška připojením na napětí s rotorem v podélné a příčné poloze	6.17	X_d'' , X_q''	ano
Zkouška připojením na napětí s rotorem v libovolné poloze	6.18	X_d'' , X_q''	ano
Zkouška jednofázovým napájením tří fází	6.19	R_0 , X_0	ano
Dvoufázová zkouška nakrátko	6.20	R_2 , X_2	ano

Náhlý dvoufázový zkrat	6.21	X_2	ano
Zkouška při dvoufázovém spojení nakrátko s uzlem vinutí	6.22	R_0	ano
Zkouška s obráceným sledem fází	6.23	R_2, X_2	ne**
Zkouška dozrívání budícího proudu vinutím kotvy naprázdno	6.24	τ_{d0}'	ne ^x
Zkouška dozrívání budícího proudu při jmenovitých otáčkách a vinutím kotvy nakrátko	6.25	τ_d'	ne ^x
Nárazové buzení s vinutím kotvy nakrátko	6.26	τ_d'	ne ^x
Zkouška dozrívání budícího proudu za klidu stroje se dvěma fázemi vinutí spojenými nakrátko	6.27	τ_d'	ne ^x
Zkouška napájením kotvy stroje s vyjmutým rotorem	6.28	X_σ	ano
Zkouška doběhu naprázdno	6.29	τ_j, H, J	ano
Zkouška kmitáním zavěšeného rotoru	6.30	τ_j, H	ano
Zkouška se zabrzděným rotorem	6.31	Z_{st}	ano
Zkouška v přebuzeném stavu při nulovém účinníku a proměnném napětí kotvy	6.32	i_{fk}	ne*
Zkouška asynchronního chodu při napájení stroje malým napětím	6.33	frekvenční charakteristiky, asynchronní charakteristiky	ne***
Zkouška napětím o proměnném kmitočtu za klidu stroje	6.34	frekvenční charakteristiky	ano

2.4 ČSN EN 60349-2 ed. 2: Elektrická trakce - Točivé elektrické stroje pro kolejová a silniční vozidla - Část 2: Střídavé motory napájené z elektronických měničů

Norma ČSN EN 60349-2 ed. 2 [6] s platností od 1. 12. 2013 definuje přehled zkoušek synchronních trakčních motorů napájených z polovodičových měničů, a to včetně synchronních strojů s permanentními magnety. Kompletní přehled zkoušek zmiňovaných v normě ČSN EN 60349-2 ed. 2 aplikovatelných na synchronní stroj s permanentními magnety je uveden v Tabulce IV.

Z níže jmenovaných zkoušek jsou zkoušky ve druhém až čtvrtém řádku výrobními kusovými zkouškami, zkouška oteplení a zkouška na hluk jsou zkouškami typovými. Norma ČSN EN 60349-2 ed. 2 jako taková pak sice stanovuje požadovaný rozsah a tolerance výsledků zkoušek, ale neurčuje způsob jejich provedení, toto je předmětem dalších norem k jednotlivým typům elektrických strojů.

Tabulka IV. Zkoušky synchronních strojů dle ČSN EN 60349-2 ed. 2

zkouška	kapitola	výstup	aplikovatelné
Oteplení	8.1	kontrola tepelně ventilačního výpočtu	ano
Charakteristiky	8.2	ověření vypočtených charakteristik stroje	ano
Zvýšené otáčky	8.3	mechanická odolnost rotoru	ano

Elektrická odolnost	9.5	ověření elektrické odolnosti vinutí	ano
Vibrace	8.4	ověření mechanické konstrukce	ano ^d
Hluk	C	ověření mechanické konstrukce	ano

2.5 ČSN EN 60349-4: Drážní zařízení - Točivé elektrické stroje pro kolejová a silniční vozidla - Část 4: Synchronní elektrické stroje s permanentními magnety napájené z elektronických měničů

Poslední řešenou normou je norma ČSN EN 60349-4 [7] s platností od 1.11.2013. Tato norma je přímo zaměřena na (trakční) synchronní stroje s permanentními magnety napájené z elektronických měničů. Zkoušky zmiňované normou (Tabulka V) jsou pak typovými zkouškami dle ČSN EN 60349-4 s výjimkou poslední, která je tzv. informační zkouškou. Výrobními kusovými zkouškami jsou pak zkoušky v řádcích 4 až 8.

Tabulka V. Zkoušky synchronních strojů dle ČSN EN 60349-4

zkouška	kapitola	výstup	aplikovatelné
Oteplení s měničem	8.1	kontrola tepelně ventilačního výpočtu	ano
Zkouška oteplení pro redukovanou typovou zkoušku	7.3.1 až 7.3.5	kontrola tepelně ventilačního výpočtu	ano ^d
Charakteristiky	8.2	ověření vypočtených charakteristik stroje	ano
Zkouška naprázdno	9.2.2	U_i , k_U , charakteristika naprázdno	ano
Zkouška s proudovým zatížením	9.2.3	charakteristika nakrátko	ano
Zvýšené otáčky	8.3	ověření mechanické odolnosti rotoru	ano
Elektrická odolnost	9.4	ověření elektrické odolnosti vinutí	ano
Vibrace	8.4	ověření mechanické konstrukce	ano
Hluk	8.5	ověření mechanické konstrukce	ano ^d
Informační zkouška	10	M_{rel} , ϑ_{high} , t_{kU}	ano ^d

2.6 Možný rozsah zkoušek motoru M5 dle ČSN

Na základě průniku jednotlivých norem byl vytvořen přehled zkoušek realizovatelných na stroji M5. Vzhledem k tomu, že největší rozsah norem je předepsán normou ČSN 35 0010, je tato norma brána jako kořenová a doplněna o normy, které určují vhodnější způsob provedené pro synchronní stroj vybavený permanentními magnety. Zároveň, vzhledem k faktu, že stroj bude napájen z frekvenčního měniče, je toto zohledněno v náplni a provedení příslušných zkoušek.

zkouška	dle normy
Základní mechanické zkoušky: • prohlídka stroje • kontrola rozměrů a montáže • kontrola chodu stroje	ČSN 35 0010
Měření izolačního odporu	ČSN 35 0010
Měření činného odporu za studena	ČSN 35 0010
Zkouška závitové izolace	ČSN CLC/TS 60034-18-42
Zkouška vinutí přiloženým napětím	ČSN 35 0010
Oteplovací zkouška s měničem	ČSN EN 60349-4
Zkouška mechanické odolnosti	ČSN EN 60034-1 ed. 2
Měření kmitání	ČSN EN 60034-14 ed. 2
Měření hluku	ČSN EN 60034-9 ed. 2
Měření množství chladiva	?
Zkouška krytí	ČSN EN 60034-5
Zkouška odrušení	ČSN EN 55011 a 55014
Měření charakteristiky naprázdno	ČSN EN 60349-4
Měření charakteristiky nakrátko	ČSN EN 60349-4
Kontrola izolace proti hřídelovým proudům	ČSN EN 60034-4
Kontrola sledu fází	ČSN 35 0000-1-1
Kontrola tvaru křivky napětí	ČSN EN 60349-4
Měření ztrát a účinnosti	ČSN EN 60034-2-1
Zkouška přetížitelnosti	ČSN EN 60034-1 ed. 2
Zkratová odolnost a zkratový proud • zkouška náhlým trojfázovým zkratem	ČSN EN 60034-4
Měření reaktancí, časových konstant a dalších veličin ze zkoušek • měření zátěžného úhlu při zatížení • zkouška doznívání stejnosměrného proudu ve vinutí kotvy za klidu stroje • zkouška připojením na napětí s rotorem v podélné a příčné poloze • zkouška jednofázovým napájením tří fází • dvoufázová zkouška nakrátko • zkouška napájením kotvy stroje s vyjmutým rotorem • zkouška doběhu naprázdno • zkouška napětím o proměnném kmitočtu za klidu stroje • informační zkouška	ČSN EN 60034-4 ČSN EN 60349-4
Stanovení momentu setrvačnosti rotoru	ČSN EN 60034-4
Měření polarizačního indexu	ČSN 35 0010
Měření ztrátového činitele	ČSN 35 0000-1-1
Zkouška elektrické odolnosti	ČSN EN 60034-15 ed. 2

2.7 Poznámky

- ^d Pro tuto zkoušku je třeba dalšího ujednání jak o způsobu provedení, tak i o účasti odběratele.
- ^v Pro stroje výkonu stroje M5 a u PMSM se neprovádí.
- ^m Vzhledem k tomu, že M5 je určený pro napájení z měniče, nemá její provedení

opodstatnění.

- * Postup zkoušky vyžaduje konstantní otáčky a proměnné buzení stroje.
- ** Postup vyžaduje zkoušku při jmenovitých otáčkách a sníženém napětí.
- *** Postup vyžaduje napájení nenabuzeného stroje sníženým napětím.
- X Pro daný typ stroje nemá tato zkouška význam.
- ? S ohledem na předpokládané výsledky může být problematické vyhodnocení zkoušky.

3 Možnosti přímého připojení stroje M5 k síti

Vzhledem k faktu, že některé ze zmiňovaných zkoušek stroje je vhodné provádět při sinusovém napájení (např. měření zátěžného úhlu při zatížení), je nezbytné připojit synchronní stroj M5 přímo k síti. Toto propojení je možné realizovat za pomoci transformátoru AJT10, který bude snižovat napětí z 22 000 V na cca 6 000 V. Synchronní stroj M5 je přitom konstruován jako mírně podbuzený synchronní motor a tedy při jmenovitých otáčkách, kdy bude poskytovat frekvenci 50 Hz, bude jeho napětí nižší, nežli napětí poskytované transformátorem AJT10. Při připojení synchronního stroje k transformátoru AJT10 lze tedy očekávat tok vyrovnávacích proudů, které vzniknou v důsledku rozdílů indukovaných napětí stroje M5 a transformátoru AJT10.

Mezním případem v průběhu zatěžování stroje M5 pak může být i jeho vypadnutí ze synchronizmu. V tomto případě je extrémní možností provoz stroje v protifázi vůči síti, díky čemuž poteče mezi transformátorem AJT10 a strojem M5 značný proud.

Ustálené hodnoty obou těchto proudů lze předběžně určit na základě údajů o transformátoru AJT10 a motoru M5, které jsou dostupná z realizační dokumentace zhotovitele (RDZ) [1].

Dodané parametry stroje M5 jsou následující:

jmenovité napětí	$U_n = 6000 \text{ V}$
jmenovitý proud	$I_n = 190 \text{ A}$
napěťová konstanta	$k_U = 7660 \text{ V/1000 ot/min}$ (sdružených)
jmenovité otáčky stroje	$n_n = 750 \text{ ot/min}$
odpor kotvy	$R_a = 0,113 \text{ } \Omega$
podélná indukčnost stroje	$L_d = 75 \text{ mH}$

Z uvedených hodnot lze určit sdruženou hodnotu indukovaného napětí ve stroji jako

$$U_{in} = \frac{k_U}{1000} \cdot n_n = \frac{7660}{1000} \cdot 750 = 5745 \text{ V} \quad (1)$$

čemuž odpovídá fázová hodnota

$$U_{if} = \frac{U_{in}}{\sqrt{3}} = \frac{5745}{\sqrt{3}} = 3316,9 \text{ V} \quad (2)$$

Podélná reaktance stroje je dle RDZ

$$X_d = 2\pi f L_d = 2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 0,075 = 23,56 \text{ } \Omega \quad (3)$$

Z hlediska výpočtu jsou významnými štičkovými hodnotami transformátoru AJT10 následující:

jmenovité napětí primárního vinutí	$U_{n1} = 22000 \text{ V}$
------------------------------------	----------------------------

jmenovité napětí sekundárního vinutí	$U_{n2} = 6300 \text{ V}$
odpor sekundárního vinutí	$R_2' = 0,922 \Omega$
rozptylová reaktance sekundárního vinutí	$X_2' = 4,516 \Omega$
odbočky vinutí:	$\pm 3 \times 2,5\% U_n$

Jmenovitý převod transformátoru je

$$k \simeq \frac{U_{n1}}{U_{n2}} = \frac{22000}{6300} = 3,49 \quad (4)$$

Odtud skutečná hodnota odporu R_2 :

$$R_2 = \frac{R_2'}{k^2} = \frac{0,922}{3,49^2} = 0,076 \Omega \quad (5)$$

a reaktance X_2 :

$$X_2 = \frac{X_2'}{k^2} = \frac{4,516}{3,49^2} = 0,37 \Omega \quad (6)$$

Přibližná hodnota sdružené hodnoty minimálního indukovaného napětí sekundáru transformátoru:

$$U_{i2min} \simeq (1 - 3 \cdot 0,025) U_{n2} = (1 - 3 \cdot 0,025) \cdot 6300 = 5827,5 \text{ V} \quad (7)$$

Fázová hodnota indukovaného napětí pak je

$$U_{if2min} = \frac{U_{i2min}}{\sqrt{3}} = \frac{5827,5}{\sqrt{3}} = 3364,5 \text{ V} \quad (8)$$

Rozdíly fázových hodnot indukovaných napětí stroje M5 a transformátoru AJT10 v poloze na nejvyšší odbočce jsou

$$\Delta U_i = U_{if2min} - U_{if} = 3364,5 - 3316,9 = 47,63 \text{ V} \quad (9)$$

Mezi těmito napětími se nachází impedance o velikosti

$$Z = \sqrt{(R_a + R_2)^2 + (X_d + X_2)^2} = \sqrt{(0,113 + 0,076)^2 + (23,56 + 0,37)^2} = 23,93 \Omega \quad (10)$$

Ustálená hodnota vyrovnávacího proudu po připojení stroje M5 k transformátoru AJT10 tedy je

$$I_0 = \frac{\Delta U_i}{Z} = \frac{47,63}{23,93} = 1,99 \Omega \quad (11)$$

Vzhledem k faktu, že stroj není vybaven tlumičem ani budícím vinutím, bude špičková hodnota proudu po připojení k síti pouze několikanásobek vypočtené hodnoty ustálené a velmi pravděpodobně bude nižší, nežli 10 A.

V případě prokluzu stroje bude velikost proudu mezi transformátorem AJT10 a motorem M5 dána součtem indukovaných fázových napětí:

$$\sum U_i = U_{if2min} + U_{if} = 3364,5 + 3316,9 = 6681,4 \text{ V} \quad (12)$$

a minimální velikost proudu při prokluzu stroje bude:

$$I_p = \frac{\sum U_i}{Z} = \frac{6681,4}{23,93} = 279,17 \text{ A} \quad (13)$$

Uvedená hodnota pak poroste v závislosti na vlastnostech stroje při prokluzu (jeho přechodové a rázové impedanci). Vzhledem k výše uvedenému faktu, že stroj neobsahuje tlumič ani budící vinutí, lze očekávat nárůst této hodnoty maximálně v řádech jednotek násobků této hodnoty, tj. cca max 2x – 3x.

Zároveň lze určit proud nakrátko pro motor M5, ten bude dle dodaných hodnot

$$I_k = \frac{U_{if}}{Z_d} = \frac{U_{if}}{\sqrt{R_a^2 + X_d^2}} = \frac{3316,9}{\sqrt{0,113^2 + 23,56^2}} = 140,78 \text{ A} \quad (14)$$

Na základě dodaných hodnot lze (za předpokladu blízkosti hodnot Z_d'' a Z_d) dále provést kontrolu velikosti zkratového momentu stroje. Poměrná hodnota Z_d je pro motor M5:

$$z_d = \frac{Z_d}{Z_n} \quad (15)$$

kde Z_d je podélná impedance stroje určená jako

$$Z_d = \sqrt{R_a^2 + X_d^2} = \sqrt{0,113^2 + 23,56^2} = 23,56 \Omega \quad (16)$$

a Z_n je jmenovitá impedance stroje

$$Z_n = \frac{U_n}{\sqrt{3} I_n} = \frac{6000}{\sqrt{3} \cdot 190} = 18,23 \Omega \quad (17)$$

Odtud poměrná hodnota z_d :

$$z_d = \frac{Z_d}{Z_n} = \frac{23,56}{18,23} = 1,29 \text{ p.u.} \quad (18)$$

Hodnota zkratového momentu pak vychází

$$M_k = \frac{M_n}{z_d} = \frac{M_n}{1,29} \simeq 0,77 M_n \quad (19)$$

Hodnota prvních rázů při uvedení stroje M5 do zkratu by tedy neměla za předpokladu blízkosti hodnot Z_d'' a Z_d přesáhnout velikost jmenovitého momentu. Vzhledem k faktu, že ve permanentních magnetech stroje se ale určité vířivé proudy budou uzavírat, budou se magnety chovat jako tlumič o nízké vodivosti. Hodnota zkratového momentu tedy mírně naroste, nelze však předpokládat, že by přesáhla více než dvojnásobek jmenovitého momentu.

Seznam použité literatury

- [1] COFELY, a. s.: Realizační dokumentace Zhotovitele (rev. 150504) [online]. <https://riceproject.fel.zcu.cz/svn/rice_stavba/RICE_RDZ_150504/F_Dokumentace_objektu/F3_Provozni_soubory/PS_01_2_Technologie/> [cit. 20. 8. 2015]
- [2] ÚNMZ: ČSN 35 0000-1-1: Točivé elektrické stroje - Část 1-1: Doplnující požadavky. Praha, ÚNMZ, 1997.
- [3] ÚNMZ: ČSN 35 0010: Točivé elektrické stroje. Zkoušky. Praha, ÚNMZ, 1992.
- [4] ÚNMZ: ČSN EN 60034-1 ed. 2: Točivé elektrické stroje - Část 1: Jmenovité údaje a vlastnosti. Praha, ÚNMZ, 2011.
- [5] ÚNMZ: ČSN EN 60034-4 ed. 2: Točivé elektrické stroje - Část 4: Metody určování veličin synchronního stroje ze zkoušek. Praha, ÚNMZ, 2009.
- [6] ÚNMZ: ČSN EN 60349-2 ed. 2: Elektrická trakce - Točivé elektrické stroje pro kolejová a silniční vozidla - Část 2: Střídavé motory napájené z elektronických měničů. Praha, ÚNMZ, 2013.
- [7] ÚNMZ: ČSN EN 60349-4: Drážní zařízení - Točivé elektrické stroje pro kolejová a silniční vozidla - Část 4: Synchronní elektrické stroje s permanentními magnety napájené z elektronických měničů. Praha, ÚNMZ, 2013.

Historie revizí

Rev.	Kapitola	Popis změny	Datum Jméno / Kat.
1.0	Vše	První verze dokumentu	25. 8. 2015 khruska / KEV
1.1	3	Doplněny výpočty zkratových proudů a momentů	14. 9. 2015 khruska / KEV