

Fakulta elektrotechnická Regionální inovační centrum elektrotechniky

Protokol o měření dekompenzační tlumivky

TTC 34075 – 0024 – Závislost magnetických ztrát na rostoucí frekvenci při zachování poměru U/f

Pracoviště:	
Číslo dokumentu:	
Typ zprávy:	
Řešitelé:	

FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ ZÁPADOČESKÉ UNIVERZITY V PLZNI

Vedoucí projektu: Počet stran: Datum vydání: Oborové zařazení: Rice – elektrické stroje 22190 – 040 – 2021 Výzkumná zpráva Skala B., Klouda O., Ondřej Š., Kubaň M., Kindl V. Čermák R., Veg L., Tyrpekl M., Zavřel M., Frank Z. Bohumil Skala 18 21.10.2021 2.2 Electrical engineering, Electronic engineering, Information engineering -Robotics and automatic control

Zadavatel / zákazník:

ELZAT sro. Rožmitál pod Třemšínem Česká republika

František Henkl

Zpracovatel / dodavatel:

Západočeská univerzita v Plzni Research and Innovation Centre for Electrical Engineering Univerzitní 8 306 14 Plzeň **Kontaktní osoba:** Bohumil Skala tel. 377634 473 skalab@fel.zcu.cz

Práce vznikla s podporou projektu CZ.01.1.02/0.0/0.0/20_321/0024444.

soubor: Protokol o měření dekompenzační tlumivky TTC 34075 - 0024

RICE-S-01-2017-P02

RICE - Regionální inovační centrum elektrotechniky FEL ZČU www.rice.zcu.cz

Anotace

Tato výzkumná zpráva se zabývá měřením dekompenzační tlumivky TTC 34075 – 0024 od firmy Elektrokov a.s. Znojmo. Ve zprávě jsou zpracovány následující měření: měření výkonů a ztrát v jednotlivých sloupcích v závislosti na frekvenci.

Klíčová slova

Třífázová tlumivka, Odpor vinutí, Měření ztrát

Název zprávy v anglickém jazyce / Report title

Measurement of the decompensation choke TTC 34075 – 0024 – Dependence of magnetic losses on increasing frequency while maintaining the U/f ratio

Anotace v anglickém jazyce / Abstract

This research report deals with the measurement of the decompensation choke TTC 34075 – 0024 from the manufacturer Elektrokov a.s. Znojmo. The following measurements are processed in the report: dependences of power and losses in individual columns on the frequency.

Klíčová slova v anglickém jazyce / Keywords

Three-phase choke, Winding resistance, Losses measurement

Obsah

1.	ÚVOD	4
2.	MĚŘENÍ DEKOMPENZAČNÍ TLUMIVKY TTC 34075 – 0026	5

1. Úvod

V rámci projektu pro společnost ELZAT bylo provedeno měření třífázové dekompenzační tlumivky o Q = 5kVAr. Ve zprávě jsou přiloženy naměřené závislosti jednotlivých výkonů a ztrát v prostředním sloupku na frekvenci.

2. Měření dekompenzační tlumivky TTC 34075 – 0026

Při měření dekompenzační tlumivky byla postupně zvyšována frekvence za stálého udržování poměru U/f. Tlumivka byla připojena k měřícímu přístroji YOKOGAWA (obr. 1) a na prostředním sloupku tlumivky bylo změřeno fázové napětí U, proud I, činný výkon P, zdánlivý výkon S, jalový výkon Q a účinník $cos \varphi$. Před každým měřením byla dále změřena aktuální hodnota odporu R vinutí prostředního sloupku mikroohmetrem od firmy CROPICO (obr. 3), pro co nejpřesnější určení Jouleových ztrát ΔP_i .

Na prostřední sloupek tlumivky byly navinuta měřící cívka o 15 závitech N = 15, na které bylo osciloskopem změřeno indukované napětí Ui (obr. 2).

Normal	Mode			Peak (Over	0.1			Integ: Reset		YOKOGAWA 🔶
						AVG	Erea F	ilter	Time:		PLL1: U1 267.61 Hz
	_					TING	TTOGT			PAGE	Update Rate
Volt		Element1_	_Element2_	_Element3_	_∑A(3P4₩),	Element4	Element5	Element6			
Curr	age ent	104	10A	10A		400mA	400mA	50A		1	Auto
Urms (V]	78.88	78.72	78.64	78.75	0.00	0.000	0.0000k		R	NEE
Irns [[A]	7.383	7.200	7.374	7.319	3.28m	0.00m	0.000		Z	
P [W]	0.0277k	0.0342k	0.0429k	0.1049k	-0.00	-0.000	0.000k		3	
S [VA]	0.5824k	0.5668k	0.5799k	1.7292k	0.00	0.000	0.000k		Ř	
QI	[var]	0.5818k	0.5658k	-0.5783k	0.5693k	0.00	0.000	0.000k		4	
λ []	0.0476	0.0603	0.0740	0.0606	Error	Error	Error		F	Fast.
ø [•]	G87.27	G86.54	D85.75	86.52	Error	Error	Error		5	(500ms)
fU [Hz]	267.61	267.72	312.66		Error	Error	Error		6	ţ
fl [Hz]	17.000	17.000	17.000		Error	Error	Error		Ř	Commonst Doto
										7	Gurrent Kate
Urns [V]	78.88	78.72	78.64	78.75	0.00	0.000	0.0000k		H	1e
Umn (V]	78.61	78.59	78.50	78.57	0.00	0.000	0.0000k		8	
Udc [V]	-0.04	-0.05	-0.04	-0.04	-0.00	0.001	0.0000k		a	Į.
Urmn [V]	70.77	70.76	70.67	70.74	0.00	0.000	0.0000k			(2 <u>s</u>)
Vac [V]	78.88	78.72	78.64	78.75	0.00	0.000	0.0000k		10	0IUW
U+pk [V 1	129.21	125.37	125.73		1.18	0.139	0.0028k		\mathbf{H}	
U-pk [V]	-129.43	-126.14	-123.80		-1.13	-0.149	-0.0029k		11	
C fU (]	1.641	1.602	1.599		Error	Error	Error		10	
Pc [W]	0.0276k	0.0341k	0.0429k	0.1046k	Error	Error	Error		14	
P+pk [W]	0.7816k	0.7312k	0.7584k		0.01	0.000	0.000k			Time Out at
P-pk [W]	-0.6770k	-0.6242k	-0.6230k		-0.01	-0.000	-0.000k			
Update		12 (1	000)		_					000	1/10/10 00:00:00

Obr. 1 Výstupních hodnoty z měřícího přístroje YOKOGAWA



Obr. 2 Měření třífázové dekompenzační tlumivky TTC 34075 - 0026



Obr. 3 Měření odporu vinutí prostředního sloupku

Naměřené hodnoty jsou uvedeny v tab. 2.1. Kromě výše uvedených hodnot, které byly změřeny přímo, byly dopočítány:

- Jouleovy ztráty ve vinutí prostředního sloupku $\Delta P_j = RI^2$.
- Ztráty v železe $\Delta P_{Fe} = P \Delta P_j$.
- Poměr mezi ztrátami v železe a frekvencí v poměrných jednotkách.
- Poměr mezi fázovým napětím a frekvencí v poměrných jednotkách.
- Poměr mezi fázovým napětím a napětím indukovaným na měřící cívce navinuté kolem prostředního sloupku.
- Magnetický tok procházejícím prostředním sloupkem $\Phi = \frac{Ui}{4.44Nf}$.

Číslo měření	1	2	3	4	5	6
f (Hz)	17 Hz	20 Hz	30 Hz	40 Hz	50 Hz	60 Hz
$U_1(V)$	78,88	92,52	138,38	184,3	230,25	276,24
$U_2(V)$	78,72	92,52	138,31	184,26	230,23	276,23
$U_3(V)$	78,64	62,36	138,19	184,23	230,05	275,99
I 1 (A)	7,383	7,384	7,38	7,382	7,383	7,385
I ₂ (A)	7,2	7,2	7,197	7,2	7,2	7,2
I ₃ (A)	7,374	7,376	7,376	7,379	7,379	7,38
$P_1(W)$	27,7	27,7	26,6	26,2	26,3	27
$P_2(W)$	34,2	35,6	39,5	43,5	48	52,8
$P_3(W)$	42,9	45,3	53,4	62,1	71,1	80,8
sum P (W)	104,9	108,6	119,2	131,8	145,5	160,6
$R_{avg}\left(\Omega ight)$	0,5479	0,5521	0,5593	0,5655	0,5682	0,5728
Ui (V)	5,021	5,929	8,906	11,86	14,86	17,8

ab. 2.1	Tabulka	naměřených	a vypočítaných	hodnot

S_1 (VA)	582,4	683,7	1021,2	1360,5	1699,8	2040
S_2 (VA)	566,78	666,14	995,42	1326,67	1657,66	1988,86
$S_3(VA)$	579,9	681,2	1019,2	1358,7	1697,6	2036,9
sum S (VA)	1729,2	2031,1	3035,9	4045,8	5055,3	6066,2
$Q_1(VAr)$	581,8	683,1	1020,8	1360,2	1699,6	2039,8
$Q_2(VAr)$	565,75	665,19	994,64	1325,96	1656,96	1988,16
$Q_3(VAr)$	578,3	679,7	1017,8	1357,3	1696,1	2035,3
sum Q (VAr)	569,3	668,7	3033,3	4043,5	5052,9	6063,8
$\cos \phi_1$	0,0476	0,0405	0,026	0,0193	0,0155	0,0132
cos φ ₂	0,060	0,054	0,040	0,033	0,029	0,027
cos φ ₃	0,074	0,665	0,0523	0,0457	0,0419	0,0397
cos φ	0,0606	0,0534	0,0393	0,0326	0,0288	0,0265
$\Delta P_{j1}(W)$	29,87	30,10	30,46	30,82	30,97	31,24
$\Delta P_{j2}(W)$	28,40	28,62	28,97	29,32	29,46	29,69
$\Delta P_{j3}(W)$	29,79	30,04	30,43	30,79	30,94	31,20
$sum \Delta P_j(W)$	88,06	88,76	89,86	90,93	91,37	92,13
$\Delta P_{Fe1}(W)$	-2,17	-2,40	-3,86	-4,62	-4,67	-4,24
$\Delta P_{Fe2}(W)$	5,80	6,98	10,33	14,18	18,54	23,11
$\Delta P_{Fe3}(W)$	13,11	15,26	22,97	31,31	40,16	49,60
$sum \Delta P_{Fe}(W)$	16,74	19,84	29,44	40,87	54,03	68,47
$\Delta P_{Fe1} / f (W/Hz)$	-0,13	-0,12	-0,13	-0,12	-0,09	-0,07
$\Delta P_{Fe2} / f (W/Hz)$	0,34	0,35	0,34	0,35	0,37	0,39
$\Delta P_{Fe3} / f (W/Hz)$	0,77	0,76	0,77	0,78	0,80	0,83
$sum \Delta P_{Fe2} / f (W/Hz)$	0,98	0,99	0,98	1,02	1,08	1,14
U/f (V/Hz)	4,63	4,63	4,61	4,61	4,60	4,60
U/Ui (V)	15,68	15,60	15,53	15,54	15,49	15,52
$\Phi(mWb)$	4,43	4,45	4,46	4,45	4,46	4,45

Závislosti jednotlivých veličin na stoupající frekvenci byly vyneseny do grafů na obr.4-7.



Obr. 4 Graf závislosti celkových činných ztrát P, Jouleových ztrát ΔP_j a ztrát v železe ΔP_{Fe} na zvyšující se frekvenci



Obr. 5 Graf závislosti celkového jalového výkonu a jalového výkonu v jednotlivých fázích na zvyšující se frekvenci



Obr. 6 Graf závislosti celkového zdánlivého výkonu a zdánlivého výkonu v jednotlivých fázích na zvyšující se frekvenci



Obr. 7 Graf závislosti třífázového účiníku a účiníku v jednotlivých fázích na zvyšující se frekvenci

Celkové ztráty v železe byly přepočteny na $\frac{\Delta P_{Fe}}{f}$, vyneseny do grafu a proloženy regresivní přímkou (obr. 8 – 10). Průnik osy $\frac{\Delta P_{Fe}}{f}$ a regresivní přímky v bodě f = 0 Hz je konstanta $\frac{\Delta P_{Fe}}{f_0}$ která slouží pro výpočet hysterezních ztrát pro konkrétní frekvenci:

$$\Delta P_H = \frac{\Delta P_{Fe}}{f_0} \cdot f$$

Ztráty vířivými proudy jsou poté dány rozdílem celkových ztrát v železe a hysterezních ztrát:

$$\Delta P_V = \Delta P_{Fe} - \Delta P_H$$

Výsledné průběhy jsou na obr. 11-13.











Obr. 10 Graf závislosti $\frac{\Delta P_{Fe_3}}{f}$ na frekvenci a znázorněná regresivní přímka



Obr. 11 Graf závislosti ztrát v železe ΔP_{Fe_1} , ztrát vířivými proudy ΔP_{V_1} a hysterezních ztrát ΔP_{H_1} v závislosti na frekvenci



Obr. 12 Graf závislosti ztrát v železe ΔP_{Fe_2} , ztrát vířivými proudy ΔP_{V_2} a hysterezních ztrát ΔP_{H_2} v závislosti na frekvenci



Obr. 13 Graf závislosti ztrát v železe ΔP_{Fe_3} , ztrát vířivými proudy ΔP_{V_3} a hysterezních ztrát ΔP_{H_3} v závislosti na frekvenci V tab. 2.2 jsou uvedeny vypočtené hodnoty jednotlivých ztrát.

f(Hz)	30	40	50	60
$\Delta P_{Fe_1}(W)$	3 <i>,</i> 86	4,61	4,67	4,23
$\Delta P_{Fe_2}(W)$	10,33	14,18	18,54	23,10
$\Delta P_{Fe_3}(W)$	22,97	31,30	40,16	49,60
$\Delta P_{V_{-1}}(W)$	-1,84	-2,99	-4,84	-7,17
$\Delta P_{V_2}(W)$	1,28	2,12	3,47	5 <i>,</i> 02
$\Delta P_{V_3}(W)$	1,88	3,18	5,01	7,42
$\Delta P_{H_{-1}}(W)$	5 <i>,</i> 70	7,61	9,51	11,41
$\Delta P_{H_2}(W)$	9,04	12,05	15,07	18,08
$\Delta P_{H_3}(W)$	21,09	28,12	35,15	42,18

Tab. 2.2 Tabulka ztrát v železe, hysterezních ztrát a ztrát vířivými proudy

3. Rozbor magnetických napětí při nesymetrickém magnetickém obvodu

Pokud zanedbáme činný odpor vinutí

$$R_{L1} = 0, R_{L2} = 0, R_{L3} = 0$$

a jeho rozptylovou reaktanci

$$jX_{\sigma L1} = 0, jX_{\sigma L2} = 0, jX_{\sigma L3} = 0$$

předpokládáme, že můžeme také zanedbat ztráty v železe

$$\Delta P_{Fe} = 0$$
 ,

pak je indukované napětí stejné jako napájecí

$$\mathbf{U}_{iL1} = \mathbf{U}_{L1}$$

a magnetizační proud je proudem tlumivky

$$I_{\mu L1} = I_{L1}$$

Nakreslíme příslušný fázorový diagram tak, že nakreslíme souměrnou trojfázovou hvězdu pro svorkové napětí. Příslušné magnetické toky budou posunuté o 90°, každý za svým napětím.



Obr. 14 Svorková napětí a magnetické toky

Magnetická napětí je však potřeba vypočítat. Tato napětí vyplývají z rovnic II. Kirchhoffova zákona.

Magnetické napětí fáze A je U_{mA}. Toto magnetické napětí je tvořené počtem závitů fáze a protékajícím magnetizačním proudem. Podobně je to i pro ostatní fáze. Pokud předpokládáme stejný počet závitů ve všech fázích, tak obdržíme rovnice:

$$U_{mL1} = N_{L1} I_{\mu L1}$$
$$U_{mL2} = N_{L2} I_{\mu L2}$$
$$U_{mL3} = N_{L3} I_{\mu L3}$$

Tato magnetická napětí jsou silou, které protlačují magnetické toky Φ_{L1} , Φ_{L2} , Φ_{L3} a tyto toky vytvoří úbytek magnetického napětí na příslušné délce části magnetického obvodu

$$\Delta U_{mL1} = \phi_{L1} (R_j + 2R_s)$$
$$\Delta U_{mL2} = \phi_{L2} R_j$$
$$\Delta U_{mL3} = \phi_{L3} (R_j + 2R_s)$$



Obr. 15 Náhradní schéma pro jádrový magnetický obvod tlumivky

Napíšeme II. Kirchhoffův zákon pro levou smyčku (pravotočivá orientace)

$$2\phi_{L1}R_s - \phi_{L2}R_j + U_{mL2} + \phi_{L1}R_j - U_{mL1} = 0$$

což je po úpravě

$$\phi_{L1}(R_j + 2R_s) - \phi_{L2}R_j = U_{mL1} - U_{mL2}$$

Pro pravou smyčku (levotočivá orientace) máme po úpravě

$$\Phi_{L3}(R_j + 2R_s) - \Phi_{L2}R_j = U_{mL3} - U_{mL2}$$

První Kirchhoffův zákon pro okamžité hodnoty toků je

$$\varphi_{L1} + \varphi_{L2} + \varphi_{L3} = 0$$

Tuto soustavu rovnic je potřeba vyřešit pro neznámá magnetická napětí. Tato magnetická napětí jsou úměrná proudům jednotlivých fází podle

$$U_{mL1} = N_{L1} I_{\mu L1}$$
$$U_{mL2} = N_{L2} I_{\mu L2}$$
$$U_{mL3} = N_{L3} I_{\mu L3}$$

Řešením soustavy rovnic pak máme výsledek

$$U_{mL1} = \phi_{L1}(R_j + 2R_s) + \frac{2}{3} \phi_{L2}R_s$$
$$U_{mL2} = \phi_{L2}R_j + \frac{2}{3} \phi_{L2}R_s$$
$$U_{mL3} = \phi_{L3}(R_j + 2R_s) + \frac{2}{3} \phi_{L2}R_s$$

Z následujícího obrázku je zřejmé, že magnetická napětí tvoří nesouměrnou hvězdu. Ve fázích L1 a L3 mají stejnou velikost, ve fázi L2 menší velikost.



Obr. 16 Nesouměrná hvězda magnetických napětí

Jak je vidět z měření, proudy tvoří asymetrický systém. To se projevuje hlavně v malých tlumivkách, kde se projevuje silněji vliv magnetických spojek. Proud střední fáze je menší.

Pokud se podíváme na činné výkony, tak proud I_{L2} se zpožďuje za napětím o 90° a proto je výkon fáze L2 nulový. Výkon fáze L3 je kladný, protože průmět proudu IL3 do směru napětí UL3 je kladný. Výkon fáze L1 je stejný co do velikosti jako výkon fáze L1, ale má záporná znaménko. Celkový výkon je proto nulový.

Realita je samozřejmě poněkud odlišná, protože se uplatňuje jak činný odpor vinutí, tak i ztráty v magnetickém obvodu. Nicméně zde je potřeba hledat příčina záporných naměřených výkonů ve fázi L1, i když v menším měřítku.

Historie revizí

Rev.	Kapitola	Popis změny	Datum	Jméno