

Výroční zpráva projektu specifického výzkumu na rok 2016 - zakázka č. 2127

Název projektu: Analýza funkčnosti proudově kompenzovaného transformátoru pro měření velkých střídavých proudů v energetických sítích

Specifikace řešitelského týmu

Odpovědný řešitel: doc. dr. René Drtina, Ph.D.
Studenti magisterského studia na PdF UHK: Bc. Jakub Janouch, P15P1053, IN-ZT
Bc. Michal Zavřel, P15P0340, IN-ZT

Externí spolupráce doc. Ing. Jaroslav Lokvenc, CSc. - konzultant specialista, spoluautor projektu
doc. Ing. Bohumil Skala, Ph.D., FEL ZČU - konzultant specialista (MG obvody)
doc. Ing. Pavel Karban, Ph.D., FEL ZČU - konzultant specialista (řešení MG pole)
Ing. Mgr. Josef Šedivý, Ph.D. - konzultant statistického modelu
Josef Andris - konzultant technologického řešení mechanické části

Celková částka přidělené dotace 157 295 Kč (vč. navýšení rozpočtu projektu)

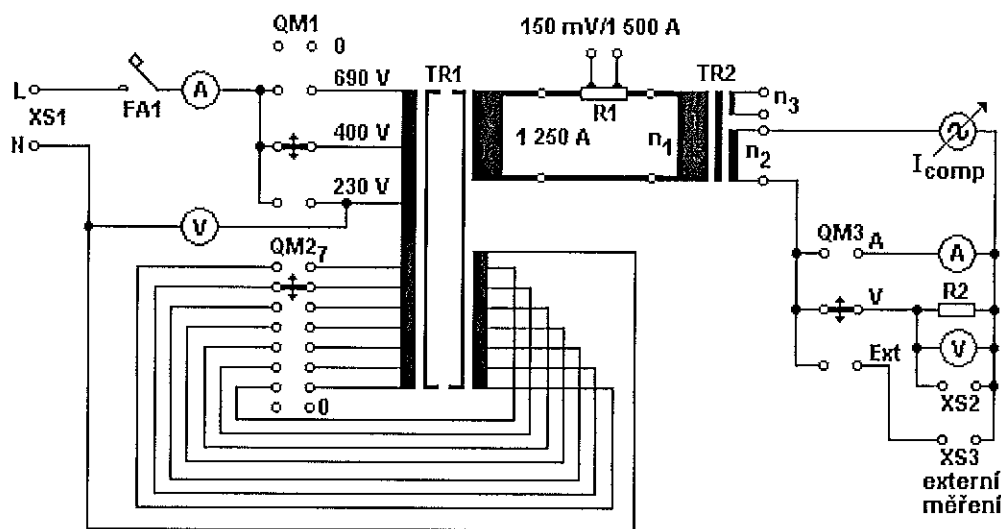
Východiska projektu

Měření velkých střídavých proudů v širokém pásmu frekvencí představuje určitý technický problém, který obvykle řešíme standardizovanými způsoby - proudovým transformátorem, odporovým bočníkem, Rogowskiho vinutím nebo Hallovou sondou. S využitím poznatků získaných při vývoji a konstrukci transformátorových kompenzátorů rušivého napětí pro výkonové stejnosměrné zdroje [1, 2] byl pro měření velkých střídavých proudů navržen bezindukční proudově kompenzovaný transformátor s možností přímého měření proudu bez negativního zpětného působení.

Postup při řešení projektu

Projekt specifického výzkumu vychází z nefinancovaného projektu TAČR jehož cílem byl vývoj, ověření a patentová ochrana konstrukce proudově kompenzovaného transformátoru pro měření velkých střídavých proudů, a to jak v běžných 50/60Hz energetických sítích, tak v oblasti vysokofrekvenčních proudů (např. pro bezkontaktní dobíjení elektromobilů a elektrobuseů). Původně plánovaný tříletý projekt s rozpočtem 2,5 mil. Kč tak byl zredukován na ověření funkčnosti a spolehlivosti patentově chráněného principu měření velkých střídavých proudů s frekvencí 50 Hz [3] ve smyslu ČSN IEC 51-2 [4], ČSN IEC 51-8 [5], ČSN IEC 51-9 [6], ČSN ISO 5725-2 [7] a ČSN ISO 21748 [8].

Vzhledem k omezenému rozpočtu byl zjednodušenou metodou navržen proudově kompenzovaný transformátor na uzavřeném jádru pro měření proudů do 1,5 kA. Zdrojem proudu je trvale zkratuvzdorný rozptylový transformátor s regulací výstupního proudu ve 21 stupních od 30 A do 1,25 kA. Technologický vývoj a konstrukci transformátorů tradičně zajišťovala firma BV elektronik Holice. Schéma zapojení zkušebního měřicího zařízení je na obr.1.



Obr.1 Schéma zapojení zkušebního měřicího zařízení pro velké střídavé proudy

Měřený proud I_1 protéká snímacím vinutím n_1 měřicího transformátoru a vytvoří magnetomotorické napětí F_{m1} (1), které v uzavřeném jádru s magnetickým odporem R_m (2), kde l_e je délka střední siločáry a S_{Fe} čistý průřez jádra, vybudí magnetický tok Φ_1 (3) a magnetickou indukci B_1 (4).

$$F_{m1} = n_1 I_1 \quad (1); \quad R_m = \frac{l_e}{\mu_0 \mu_r S_{Fe}} \quad (2); \quad \Phi_1 = \frac{F_{m1}}{R_m} = n_1 I_1 \frac{\mu_0 \mu_r S_{Fe}}{l_e} \quad (3); \quad B_1 = \frac{\Phi_1}{S_{Fe}} = n_1 I_1 \frac{\mu_0 \mu_r}{l_e} \quad (4)$$

Kompenzační vinutí n_2 je napájeno z regulovaného zdroje proudem I_2 , který je tvarově stejný, ale fázově opačný jako je měřený proud I_1 . Proud I_2 vytvoří magnetomotorické napětí F_{m2} (5), které v uzavřeném jádru s magnetickým odporem R_m (2) vybudí magnetický tok Φ_2 (6) a magnetickou indukci B_2 (7).

$$F_{m2} = -n_2 I_2 \quad (5); \quad \Phi_2 = \frac{F_{m2}}{R_m} = -n_2 I_2 \frac{\mu_0 \mu_r S_{Fe}}{l_e} \quad (6); \quad B_2 = \frac{\Phi_2}{S_{Fe}} = -n_2 I_2 \frac{\mu_0 \mu_r}{l_e} \quad (7)$$

Pro výsledný magnetický tok Φ v jádru transformátoru platí

$$\Phi = n_1 I_1 \frac{\mu_0 \mu_r S_{Fe}}{l_e} - n_2 I_2 \frac{\mu_0 \mu_r S_{Fe}}{l_e} = \frac{\mu_0 \mu_r S_{Fe}}{l_e} \cdot (n_1 I_1 - n_2 I_2) \quad (8)$$

a pro výslednou magnetickou indukci B

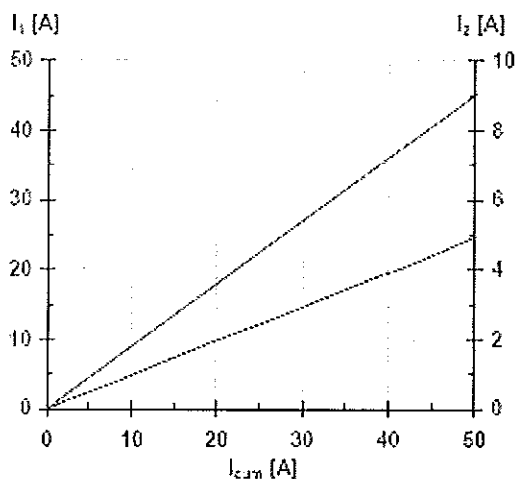
$$B = \frac{\Phi}{S_{Fe}} = n_1 I_1 \frac{\mu_0 \mu_r}{l_e} - n_2 I_2 \frac{\mu_0 \mu_r}{l_e} = \frac{\mu_0 \mu_r}{l_e} \cdot (n_1 I_1 - n_2 I_2) \quad (9)$$

Platí-li pro velikost magnetomotorických napětí, že $F_{m1} = -F_{m2}$ (11) a současně pro jejich fázový posun platí vstupní předpoklad, že $\varphi_{m1} - \varphi_{m2} = \pi$ (12), bude výsledné magnetomotorické F_m napětí budící jádro rovno nule a magnetická indukce v jádru zanikne.

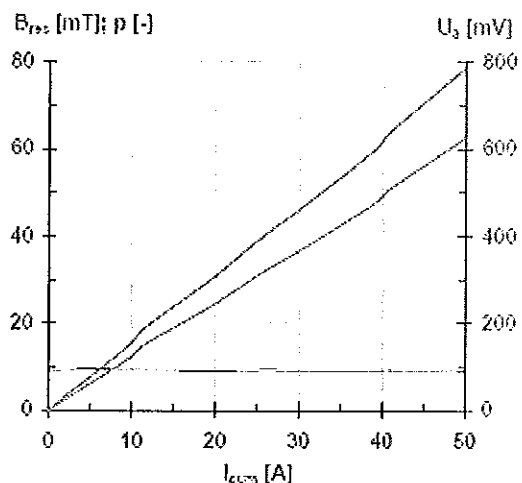
Vzhledem k silně omezeným možnostem (oproti projektu TAČR) byl pro ověření teoretických předpokladů principu měření velkých střídavých proudů proudově kompenzovaným transformátorem sestaven měřící vzorek na dvou-sloupkovém jádru UI 32×40, kdy lze očekávat větší rozptylový tok a tím i horší parametry ve srovnání s plášťovým jádrem EI. Výhodou je naopak možnost relativně jednoduché úpravy vinutí.

Dosažené výsledky

Pro napájení zkušebního měřicího obvodu byly použity dva paralelně spojené regulační transformátory WTR-22 a bezindukční odporová zátěž, přičemž maximální dosažitelný proud 50 A byl dán současnými technickými možnostmi laboratoře. Výsledky zkušebních měření jsou uvedeny v grafech na obrázcích 2 a 3.



Obr. 2 Závislost proudů v primárním a sekundárním vinutí na celkovém proudu



Obr. 3 Zbytková magnetická indukce a poměr mezi primárním a sekundárním proudem

Výsledky zkušebního měření ukazují, že závislost měřeného a kompenzačního proudu je lineární v celém rozsahu měření, poměr obou proudů byl stabilně 9,14:1. Vlivem drobných nepřesností, možné nesymetrie vinutí zkušebního transformátoru a s větším rozptylem dvou-sloupkového jádra existuje určitý rozdíl v magnetomotorických napětích. Zbytková magnetická indukce v jádru nepřesáhla 80 mT při magnetomotorických napětích $F_{m1} = 3\,125\text{ Az}$ a $F_{m2} = 3\,100\text{ Az}$. Podle výsledků měření zkušební vzorku byly následně optimalizovány silové transformátory zku-

šebního měřicího zařízení. Celý měřicí okruh je propojen paralelní dvojicí pletených plochých měděných lan o průřezu $2 \times 250 \text{ mm}^2$ s přípustným trvalým zatížením 1,56 kA.

Výstupy projektu

V rámci řešení projektu byl zpracován článek - výsledek kategorie D (přijat na konferenci ICEEA 2016, publikován bude v lednu-únoru 2017):

ID E224: Jaroslav Lokvenc, René Drtina, Josef Sedivy, Jakub Janouch, Michal Zavřel.

A Current Compensated Transformer for Measurement of Large AC Currents in Power Networks.

Přehled realizovaných výdajů

a) osobní náklady nebyly pro administrativní náročnost a nutné odvody nárokovány.

b) po schválení změn a navýšení rozpočtu byla navýšena částka na stipendia na 35 929 Kč. Stipendia byla přiznána studentům P15P1053 - Bc. Jakub Janouch a P15P0340 - Bc. Michal Zavřel, za spolupráci při řešení úkolu: specifikace mechanických dílů a příprava podkladů pro objednávky, pomocné výpočty návrhu spojovacích prvků, transport materiálu a řešitelů do výrobních a kooperujících organizací (BV elektronik Holice, Schrack Technic Praha, Rychlý Tom Výrava), řezání vodním paprskem, převinutí zkušebního transformátoru, měření linearitu proudově kompenzovaného transformátoru, měření přenosových vlastností, zpracování a vyhodnocení dat z měření, spolupráce na tvorbě publikačního výstupu, překlad článku pro konferenci ICEEA2016, zajištění drobných nákupů spojovacího materiálu a tyčoviny z elektrovedné mosazi, dělení materiálu, výroba speciálních svorníků, podložek a matic pro silové spoje, vrtání a závitování základové desky, spolupráce na výrobě textitových konzol pro referenční bočník, přeprava materiálu a řešitelů do/z výrobních a kooperujících organizací (EPM Jaroměř, Ferona Praha, Revatech Praha, OMP Kotvrdovice, ALMS Brno), spolupráce na montáži mechanických dílů, ověřovací měření, zátěžové testy.

c) materiálové náklady dosáhly výše 102 504 Kč.

d) po dodatečném navýšení rozpočtu a schválení změn byla pořízena termokamera FLIR C2 pro měření tepelného zatížení prvků měřicího zařízení

e) konferenční poplatky dosáhly výše 14 087,96 Kč. Článek bude publikován začátkem roku 2017.

Přidělená dotace ve výši 157 295 Kč byla po schválených změnách v rozpočtu projektu zcela vyčerpána. Podrobný přehled čerpání je uveden v tabulce 1.

Tab.1 Přehled nákladů projektu 2127

položka	náklady
silové transformátory 1,2 kA	34 642,00
bočník Weigel TT 150 mV/1,5 kA	6 746,00
základová deska a podložky Textit	8 808,00
přístrojová kola	1 324,00
rozvaděčová skříň Schrack WSM 604015	2 130,00
měřicí přístroje Weigel EQ96K	1 464,00
V/A-metry TDE Instruments DPM-802-TW-TV	7 560,00
řadiče OBZOR VSR20 spec	2 629,00
pletená plochá spojovací lana CRS250	4 774,66
napájecí zdroj MEAN WELL RS-15-12, měrné rezistory	1 230,00
spojovací vodiče, svorky, kabelová konfekce, jističe	3 891,00
stykač V33D	4 876,00
laboratorní odporová zátěž MT9	3 500,00
termokamera FLIR C2	23 704,00
konferenční a bankovní poplatky	14 087,96
stipendia	35 929,00
celkové náklady	157 295,62
přečerpáno	-0,62


Závěr

Výsledky ověřovacích měření potvrdily linearitu a stabilitu měření velkých střídavých proudů pomocí proudově kompenzovaného transformátoru. Vzhledem k tomu, že magnetický obvod při 100% kompenzaci nepřenáší žádný výkon (narozdíl od běžných proudových transformátorů), neuplatňují se tzv. ztráty v železe a návrh měřicího transformátoru lze podřídit výhradně minimálnímu odporu vinutí a potřebné ochlazovací ploše pro rozptýlení ztrátového výkonu (tzv. ztráty v mědi). Při výpočtu jádra a návrhu transformátoru můžeme uvažovat s povolenou indukci až 5 T. Podle typu použitého jádra a konstrukce vinutí by zbytková magnetická indukce v jádru měla být minimálně o dva řády nižší než u klasického transformátoru. Proudově kompenzovaný transformátor pro měření střídavých proudů lze využít v průmyslových a školních laboratořích, v lehkých a těžkých zkušebnách, jako měřicí přístroj v energetice nebo v průmyslových aplikacích, jako je např. měřicí systém bezdrátového dobíjení elektromobilů.

Použité zdroje

- [1] LOKVENC, J. - DRTINA, R. *Power supply voltage with the transformer ripple filter*. In The 11th WSEAS/IASME International Conference on Electric Power Systems, High Voltages, Electric Machines, Penang, Malaysia, October 3-5, 2011
- [2] LOKVENC, J. - DRTINA, R. - SOBEK, M. *Three-phase high overload DC power supply voltage with the mid frequency transformer ripple filter*. POWER 2012 - proceedings of the 12th WSEAS international conference on electric power systems, high voltages, electric machines. Athens. World scientific and engineering academy and society. 2012. ISBN 978-1-61804-128-9. ISSN 1790-5117.
- [3] LOKVENC, J. - DRTINA, R. *Proudový bočník indukčního typu*. Praha. ÚPV. PV 2016-32.
- [4] ČSN IEC 51-2. *Elektrické měřicí přístroje přímopůsobící ukazovací analogové a jejich příslušenství. Část 2: Speciální požadavky pro ampérmetry a voltmetry*. Praha. ÚNMZ. 1992.
- [5] ČSN IEC 51-8. *Elektrické měřicí přístroje přímopůsobící ukazovací analogové a jejich příslušenství. Část 8: Speciální požadavky pro příslušenství*. Praha. ÚNMZ. 1992.
- [6] ČSN IEC 51-9. *Elektrické měřicí přístroje přímopůsobící ukazovací analogové a jejich příslušenství. Část 9: Doporučené zkušební metody*. Praha. ÚNMZ. 1992.
- [7] ČSN ISO 5725-2. *Přesnost (správnost a shodnost) metod a výsledků měření - Část 2: Základní metoda pro stanovení opakovatelnosti a reprodukovatelnosti normalizované metody měření*. Praha. ÚNMZ. 1997.
- [8] ČSN ISO 21748. *Návod pro použití odhadů opakovatelnosti, reprodukovatelnosti a pravdivosti při odhadování nejistoty měření*. Praha. ÚNMZ. 2012.

Datum: 29. prosince 2016


doc. dr. René Drtina, Ph.D.