

Ing. Pavol Heretik

Autoreferát dizertačnej práce

**VPLYV PRÚDOVÉHO RÁZU BLOKOVÉHO TRANSFORMÁTORA PRI
SPÍNANÍ NA PARALELNÉ ALEBO ELEKTRICKY BLÍZKE
TRANSFORMÁTORY**

na získanie akademickej hodnosti doktor (philosophiae doctor, PhD.)

v doktorandskom študijnom programe: Elektroenergetika
v študijnom odbore 5.2.30 elektroenergetika

Miesto a dátum: Bratislava, 24.07.2015

- [10] VOLČKO, V., ELESCHOVÁ, Ž., BELÁŇ, A., JANIGA, P., CINTULA, B., HERETÍK, P.: Verification of steady state model of power autotransformer. In Electric Power Engineering 2014 : 15th International scientific conference on Electric power engineering (EPE); Brno, Czech Republic, May 12-14, 2014. 1. vyd. Brno: Brno University of Technology, 2014, s. 521--525. ISBN 978-1-4799-3806-3.
- [11] KOVÁČ, M., ELESCHOVÁ, Ž., HERETÍK, P., KONÍČEK, M.: Analysis and mitigation of ferroresonant oscillations in power system. In Electric Power Engineering 2014 : 15th International scientific conference on Electric power engineering (EPE); Brno, Czech Republic, May 12-14, 2014. 1. vyd. Brno: Brno University of Technology, 2014, s. 211--215. ISBN 978-1-4799-3806-3.
- [12] KONÍČEK, M., BELÁŇ, A., HERETÍK, P., VOLČKO, V.: Connection of distributed resources to the distribution system and their impact on the power system. In Power Engineering 2014. Renewable Energy Sources 2014 : Proceedings of 5th International scientific conference OZE 2014. Tatranské Matliare, Slovakia, May 20-22, 2014. 1. vyd. Bratislava: Slovak University of Technology in Bratislava, 2014, s. 95--99. ISBN 978-80-89402-73-1.
- [13] BELÁŇ, A., HERETÍK, P., KOVÁČ, M.: Dimenzovanie prístrojových transformátorov prúdu pre rýchle ochrany. Poster [elektronický zdroj] : Internetový časopis Roč. 5, č. 11. s. 9. ISSN 1338-0087.
- [14] KOVÁČ, M., HERETÍK, P., ELESCHOVÁ, Ž.: Analysis of Ferroresonance. In Elektroenergetika 2013 : 7th International Scientific Symposium on Electrical Power Engineering. Stará Lesná, Slovakia, September 18-20, 2013. Košice: Technical University of Košice, 2013, s. 48--51. ISBN 978-80-553-1441-9.
- [15] KOVÁČ, M., HERETÍK, P., VOLČKO, V., ELESCHOVÁ, Ž.: Ferroresonant Oscillations in Electrical Power System. In ELITECH'13 [elektronický zdroj] : 15th Conference of Doctoral Students; Bratislava, Slovakia, 5 June 2013. 1. vyd. Bratislava: Nakladateľstvo STU, 2013, s. 5. ISBN 978-80-227-3947-4.
- [16] HERETÍK, P., KOVÁČ, M.: Modeling and Simulation of PV Cell Using Matlab/Simulink. In Renewable Energy Sources 2013 : 4th International Scientific Conference OZE 2013. Tatranské Matliare, Slovakia, May 21-23, 2013. 1. vyd. Bratislava: Slovak University of Technology in Bratislava, 2013, s. 391--396. ISBN 978-80-89402-64-9.
- [17] VOLČKO, V., ELESCHOVÁ, Ž., VIGLAŠ, D., HERETÍK, P.: Smart Grid - Reference Architecture. EE časopis pre elektrotechniku, elektroenergetiku, informačné a komunikačné technológie Roč. 19, mimoriadne č. : konferencia ELOSYS, Trenčín, 15.-18.10.2013. s. 217--220. ISSN 1335-2547.
- [18] HERETÍK, P., KOVÁČ, M., VIGLAŠ, D.: Smart Metering in Europe. In Renewable Energy Sources 2013 : 4th International Scientific Conference OZE 2013. Tatranské Matliare, Slovakia, May 21-23, 2013. 1. vyd. Bratislava: Slovak University of Technology in Bratislava, 2013, s. 199--204. ISBN 978-80-89402-64-9.
- [19] JANÍČEK, F., HERETÍK, P., KOVÁČ, M., VIGLAŠ, D.: Zavádzanie IMS v Európe a postavenie SR v tejto problematike. EE časopis pre elektrotechniku, elektroenergetiku, informačné a komunikačné technológie Roč. 19, č. 1. s. 19--21. ISSN 1335-2547.

**SLOVENSKÁ TECHNICKÁ UNIVERZITA V BRATISLAVE
FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A INFORMATIKY**

Ing. Pavol Heretík

Autoreferát dizertačnej práce

**VPLYV PRÚDOVÉHO RÁZU BLOKOVÉHO TRANSFORMÁTORA PRI SPÍNANÍ NA
PARALELNÉ ALEBO ELEKTRICKY BLÍZKE TRANSFORMÁTORY**

na získanie akademickej hodnosti doktor (philosophiae doctor, PhD.)

v doktorandskom študijnom programe: Elektroenergetika

Miesto a dátum: Bratislava, 24.07.2015

Dizertačná práca bola vypracovaná v dennej forme doktorandského štúdia

Na Ústave elektroenergetiky a aplikovanej elektrotechniky, Fakulta elektrotechniky a informatiky, Slovenská technická univerzita v Bratislave

Predkladateľ: **Ing. Pavol Heretík**
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Slovenská technická univerzita v Bratislave
Ústav elektroenergetiky a aplikovanej elektrotechniky
Ilkovičova 3, 812 19 Bratislava

Školiteľ: **Doc. Ing. Anton Beláň, PhD.**
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Slovenská technická univerzita v Bratislave
Ústav elektroenergetiky a aplikovanej elektrotechniky
Ilkovičova 3, 812 19 Bratislava

Konzultant: **prof. Joseph Ojo**
Electrical and Computer Engineering
Tennessee Tech University
Center for Energy Systems Research
Cookeville, TN 38505

Oponenti: **Doc. Ing. Petr Toman, PhD.**
Vysoké učení technické v Brně
Fakulta elektrotechniky a komunikačných technológií
Ústav elektroenergetiky
61600 Brno – Poruba Technická 3082/12, Královo Pole
Česká republika

Doc. Ing. Miroslav Gutten, PhD.
Žilinská univerzita v Žiline
Elektrotechnická fakulta
Katedra merania a aplikovanej elektrotechniky
010 26 Žilina, Univerzitná 8215/1

Autoreferát bol rozoslaný:

Obhajoba dizertačnej práce sa koná:

Na Ústave elektroenergetiky a aplikovanej elektrotechniky, Fakulta elektrotechniky a informatiky STU v Bratislave, Ilkovičova 3, miestnosť

.....
prof. Dr. Ing. Miloš Oravec
dekan FEI STU

Zoznam vybraných publikácií autora

- [1] HERETÍK, P., KOVÁČ, M., FARKAS SMITKOVÁ, M., BELÁŇ, A., VOLČKO, V.: Analysis of Selected System Factors on Sympathetic Inrush Current of Shunt Wound Transformers. In Vol. 22. Recent Researches in Electric Power and Energy Systems : Proceedings of the 13th International Conference on Electric Power Systems, High Voltages, Electric Machines (POWER '13); 1st International Conference on Power and Energy Systems (POES '13); Crete Island, Greece, 27-29 August 2013. [s.l.]: WSEAS Press, 2013, s. 332--337. ISBN 978-960-474-328-5.
- [2] HERETÍK, P., KOVÁČ, M., BELÁŇ, A., VOLČKO, V., KONÍČEK, M.: Controlled switching methodology for reducing of transformer inrush currents. In Power Engineering 2014. Control of Power Systems 2014 : Proceedings of the 11th International Scientific Conference CPS 2014; Tatranské Matliare, Slovakia; 20-22 May 2014. Institut of Robotics and Cybernetics, Faculty of Electrical Eng. and Information Tech., Slovak Univ. of Tech. in Bratislava, 2014, s. 9--13. ISBN 978-80-89402-72-4.
- [3] VOLČKO, V., HERETÍK, P., ELESCHOVÁ, Ž., LIŠKA, M.: Model verification of power autotransformer. EE časopis pre elektrotechniku, elektroenergetiku, informačné a komunikačné technológie Roč. 20, mimoriadne č. : Zborník ku konferencii s medzinárodnou účasťou Elektrotechnika, Informatika a Telekomunikácie 2014, ELOSYS. s. 250--254. ISSN 1335-2547.
- [4] HERETÍK, P., BELÁŇ, A., KOVÁČ, M., VOLČKO, V.: Proposal of Current Transformers for Rapid Protection Relay. In ELITECH'13 [elektronický zdroj] : 15th Conference of Doctoral Students; Bratislava, Slovakia, 5 June 2013. 1. vyd. Bratislava: Nakladateľstvo STU, 2013, s. 5. ISBN 978-80-227-3947-4.
- [5] HERETÍK, P., KOVÁČ, M., BELÁŇ, A., VOLČKO, V., KONÍČEK, M.: Analytical analysis of transformer interaction caused by inrush current. In Electric Power Engineering 2014 : 15th International scientific conference on Electric power engineering (EPE); Brno, Czech Republic, May 12-14, 2014. 1. vyd. Brno: Brno University of Technology, 2014, s. 23--27. ISBN 978-1-4799-3806-3.
- [6] HERETÍK, P., BELÁŇ, A., KOVÁČ, M., VOLČKO, V.: Protecting of PV Power Plant / Model of Current Transformer. In Elektroenergetika 2013 : 7th International Scientific Symposium on Electrical Power Engineering. Stará Lesná, Slovakia, September 18-20, 2013. Košice: Technical University of Košice, 2013, s. 488--491. ISBN 978-80-553-1441-9.
- [7] HERETÍK, P., KOVÁČ, M., FARKAS SMITKOVÁ, M., BELÁŇ, A., VOLČKO, V.: Research on Transformer Interaction Caused by Inrush Current and Parametric Study of this Phenomenon. International Journal of Energy Vol. 7, Iss. 3. s. 72--81. ISSN 1998-4316.
- [8] HERETÍK, P., KOVÁČ, M.: Rozdielová ochrana transformátora a analýza jej činnosti pri abnormálnych dejoch v elektrizačnej sústave. Poster [elektronický zdroj] : Internetový časopis Roč. 6, č. 1. s. 9. ISSN 1338-0087.
- [9] VOLČKO, V., ELESCHOVÁ, Ž., KOVÁČ, M., HERETÍK, P.: The Influence of Transformer Impedance on Short Circuit Current. In ELITECH'13 [elektronický zdroj] : 15th Conference of Doctoral Students; Bratislava, Slovakia, 5 June 2013. 1. vyd. Bratislava: Nakladateľstvo STU, 2013, s. 3. ISBN 978-80-227-3947-4.

Stručný zoznam použitej literatúry

- [1] G. B. Kumbhar and S. V. Kulkarni, "Analysis of sympathetic inrush phenomena in transformers using coupled field-circuit approach," in IEEE Power Engineering Society General Meeting, pp. 1-6, Florida, USA, June 2007.
- [2] R. Yacamini and H. S. Bronzeado, "Transformer inrush calculation using a coupled electromagnetic model," IEE Proceedings - Science, Measurement and Technology, vol. 141, no. 6, pp. 491-498, November 1994.
- [3] H. S. Bronzeado, P. B. Brogan, and R. Yacamini, "Harmonic analysis of transient currents during sympathetic interaction," IEEE Transactions, , vol. 11, no. 4, pp. 2051-2056, 1996.
- [4] P. Heretik, M. Kováč, M. Smitková, A. Beláň and V. Volčko, "Analysis of Selected System Factors on Sympathetic Inrush Current of Shunt Wound Transformers," Wseas Proceedings - Electric Power and Energy Systems, pp. 333-337, 2013.
- [5] H. Bronzeado and R. Yacamini, "Phenomenon of sympathetic interaction between transformers caused by inrush transients," IEE Proceedings - Science, Measurement and Technology, vol. 142, no. 4, pp. 323-329, 1995.
- [6] N. K. Dhote, J. B. Helonde, "Diagnosis of Power Transformer Faults based on Five Fuzzy Ratio Method", WSEAS Transactions on Power Systems, Issue 3, Volume 7, pp. 114-125, July 2012.
- [7] M. Srinivasan, A. Krishnan, "Effects of Environmental Factors in Transformer's Insulation Life", WSEAS Transactions on Power Systems, Issue 1, Volume 8, pp. 35-44, January 2013.
- [8] C. D. Hayward, "Prolonged inrush currents with parallel transformers affect differential relaying," Transactions of Electrical Engineers, vol. 60, no. 12, pp. 1096-1101, 1941.
- [9] J. Meng-Liang, Y. Xiang-Gen, Y. Tai-Hai, "Reason of Differential Protection Mal-operation Caused by Complex Sympathetic Inrush and Its Countermeasure[J]", Proceeding of the CSEE, 2011, 31(1): 86-93.
- [10] H. R. Puent, M. L. Burges, E. V. Larsen and H. Elai-Il: "Energization of Large Shunt Reactors Near Static Var Compensators and HVDC Converters", IEEE Trans. On PowerDelivery, Vol. 4, No. 1, pp. 629-635, Jan. 1989.
- [11] J. H. Brunke, K. J. Fröhlich, "Elimination of transformer inrush currents by controlled switching – part I: theoretical considerations", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 16, No.2, pp.276-280, April 2001.
- [12] N. Chiesa, H. K. Høidalen, "Novel approach for reducing transformer inrush currents: laboratory measurements, analytical interpretation and simulation studies", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 25, No. 4, pp. 2609-2616, October 2010.
- [13] Y. Cui, S. G. Abdulsalam, S. Chen and W. Xu, "A sequential phase energization technique for transformer inrush current reduction – part I: simulation and experimental results", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 20, No. 2, pp. 943-949, April 2005.
- [14] A.G. Phadke and J. S. Thorp, "Computer Relay for Power System", Research Studies Press Ltd, 1988.
M. A. Rahman, B. So, and M.R.Zaman, "Experimental Testing Of A Stand Alone Digital Relay For Power Transformers", Submitted for IEEE PES Summer meeting, 1996.
- [15] Hassan Khorashadi- Zadeh, Zuyi LI, "A Sensitive ANN Based Differential Relay for Transformer Protection with Security against CT Saturation and Tap Changer Operation" Turk J Elec Engin, VOL.15, NO.3 2007.
- [16] A new approach to fast inrush current discrimination based on the transformer magnetizing characteristics, 14th PSCC, Sevilla, session 42, paper 2, page 1, 24-28 June 2002.
- [17] Segatto, E. C., and Coury, D. V. "A differential Relay for Power Transformer Using Intelligent Tools," IEEE Transaction on Power Delivery, vol. 21, no. 3, August 2006.
- [18] A. Ebner, M. Bosch, and R. Cortesi, "Controlled switching of transformers - effects of closing time scatter and residual flux uncertainty," in Proc. 43rd International Universities Power Engineering Conference UPEC 2008, Sep. 2008, pp. 1-5.
- [19] W. Schmidt, "Ueber den einschaltstrom bei drehstromtransformatoren," Elektrotechnische Zeitschrift – Edition A, vol. 82, no. 15, pp. 471-474, Jul. 1961.

Obsah

TÉZY DIZERTAČNEJ PRÁCE	3
ÚVOD	4
1 PRECHODNÝ DEJ NA TRANSFORMÁTORE PRI ZAPNUTÍ ELEKTRICKY BLÍZKEHO TRANSFORMÁTORA	5
1.1 Príčina vzniku prechodného deja	5
2 ANALÝZA SYSTÉMOVÝCH FAKTOROV VPLYVU ZAPNUTIA TRANSFORMÁTORA NA ZAPÍNAČÍ PRÚD A VEĽKOSŤ VZÁJOMNEJ INTERAKCIE MEDZI TRANSFORMÁTORMI	7
2.1 Východisková simulácia vplyvu faktorov zapnutia transformátora	7
2.2 Vplyv paralelného transformátora	9
2.3 Zhrnutie analýzy vplyvu systémových faktorov	10
3 NÁVRH METODIKY NA POTLAČENIE NEGATÍVNYCH VPLYVOV ZAPÍNAČIEHO RÁZU TRANSFORMÁTORA	11
3.1 Priebeh veličín magnetizačnej charakteristiky pri zapnutí paralelného transformátora	11
3.2 Detekcia presýtenia magnetického obvodu	12
4 KONTROLOVANÉ SPÍNANIE VÝKONOVÉHO TRANSFORMÁTORA	13
4.1 Simulácia vplyvu časových okamihov spínania na veľkosť prechodného deja	13
4.2 Analýza dosiahnutých výsledkov	15
4.3 Vplyv konfigurácie zapojenia transformátora na optimálny čas spínania transformátora	17
4.4 Porovnanie navrhutej metódy so stratégiou rýchleho spínania „Rapid-Closing Switching Strategy“	18
ZÁVER	20
STRUČNÝ ZOZNAM POUŽITEJ LITERATÚRY	22
ZOZNAM VYBRANÝCH PUBLIKÁCIÍ AUTORA	23

Tézy dizertačnej práce

Na základe predloženej písomnej práce k dizertačnej skúške bolo stanovené, že dizertačná práca sa bude zameriavať na riešenie vplyvu prúdového rázu blokového transformátora pri spínaní na paralelné alebo elektricky blízke transformátory. Vzhľadom na výsledky rozboru súčasného stavu uvedené v písomnej práci k dizertačnej skúške sa v dizertačnej práci predpokladá dosiahnutie nasledovných cieľov:

- Definovanie a analýza systémových vplyvov na charakter prechodného deja spojeného s uvedením transformátora do prevádzky s uvažovaním podobných elektricky blízkych zariadení.
- Analýza prechodného deja na dlhodobu prevádzkovanom transformátore pri zapínanom prúdovom ráze na susednom transformátore a rozbor vplyvu tohto deja na vybrané elektrické ochrany v rámci danej elektrickej siete.
- Vytvorenie modelu vyvedenia výkonu jadrovej elektrárne v simulačnom programe Matlab-Simulink.
- Simulácia prechodného deja zapnutia blokového transformátora v elektrickej stanici zabezpečujúcej vyvedenie výkonu jadrovej elektrárne so zameraním na vzájomnú interakciu medzi transformátormi „Sympathetic Inrush“.

Úvod

V poslednom desaťročí bolo publikovaných viacero výskumných prác zaoberajúcich sa problematikou prechodných dejov, spôsobených zapnutím transformátorov do elektrickej siete za zjednodušujúceho predpokladu zanedbania iných transformátorov prepojených v rámci rovnakej elektrickej siete (kap. 2 – dizertačnej práce) .

V praxi je však privedenie elektrického napätia na transformátor zvyčajne vykonávané buď paralelne alebo v sérii s inými elektricky blízkymi transformátormi, ktoré sú už v stave trvalej prevádzky. Nedávnymi pozorovaniami sa zistilo, že takéto prvky môžu významne ovplyvniť veľkosť, ako aj dĺžku trvania zapínacieho prúdu a preto je dôležitý komplexný pohľad na prechodný dej spínania transformátora z pohľadu elektrickej siete ako celku [5, 7].

V elektrickej sieti so značnou sériovou rezistanciou a teda v prípadoch prenosových sietí s relatívne dlhými vedeniami prepájajúcimi jednotlivé uzly siete, môže úbytok napätia na systémových impedanciách zapríčinený zapínaním magnetizačným prúdom transformátora spôsobiť neočakávané nasýtenie transformátorov, ktoré už boli po dlhšiu dobu prevádzkované v ustálenom stave v rámci danej siete. V dôsledku tohto nasýtenia prichádza k produkcii magnetizačných prúdov o značnej amplitúde v týchto transformátoroch a tak dochádza k javu vzájomnej interakcie medzi spínanými a už prevádzkovanými transformátormi.

Táto interakcia významne ovplyvňuje rozsah a trvanie zapínacieho prúdu, čo môže spôsobiť problémy v elektrickej sieti v podobe chybného pôsobenia diferenciálnych ochrán transformátora, nadprúdových relé spolu s napäťovými ochranami, keďže táto vzájomná interakcia je spojená s dlhotrvajúcimi dočasnými harmonickými prepätiami na prenosovej strane a poklesmi napätia na distribučnej strane prevádzkovaných transformátorov.

Vzájomné pôsobenie medzi transformátormi nie je bežne uvažované v energetických štúdiách, ktoré sa zaoberajú týmto druhom prechodných dejov. Táto dizertačná práca je zameraná najmä na všeobecný opis danej problematiky, spolu s opisom vykonaných testov spojených s výskytom vzájomnej interakcie medzi transformátormi „Sympathetic Inrush“. V práci prezentovaná matematická analýza zaoberajúca sa vysvetlením spôsobu generovania „zapínacieho“ prúdu v prevádzkovanom transformátore, ako aj významným predĺžením dĺžky trvania prechodného deja pri zapnutí transformátora v elektrickej blízkosti podobných zariadení.

V záverečnej časti tejto dizertačnej práce bol vytvorený simulačný model s cieľom analyzovania účinku vybraných systémových faktorov na veľkosť a charakter prechodného deja zapínacieho prúdu pri spínaní paralelného resp. sériového transformátora a študovaniu vzájomnej interakcie medzi týmito zariadeniami. Keďže pri študovanom efekte dochádza ku generovaniu neúmerne veľkých hodnôt prechodných prúdov, ktoré môžu mať negatívny vplyv na systém chránenia daných zariadení v rámci elektrizačnej sústavy [6, 9]. Časť dizertačnej práce je zameraná na bližšie špecifikovanie súčasných spôsobov identifikácie spínacieho rázu na základe dostupných manuálov jednotlivých ochrán. V prípade zabezpečenia spoľahlivej funkcie chrániacich systémov spojených s generovaním zapínacieho rázového prúdu resp. neočakávaným nasýtením transformátora spôsobeným vzájomnou interakciou, tieto prúdové rázy pri spínaní výkonového transformátora vedú k postupnej degradácii izolačných materiálov a teda prispievajú k zníženiu životnosti transformátora. V závere práce je z uvedených dôvodov venovaná pozornosť taktiež spôsobom eliminácie resp. minimalizovania týchto neželaných prúdových rázov.

modelovaný na druhom modeli časti elektrickej siete, ktorý bol navrhnutý na základe analýzy konkrétnych schém a zapojení blokov jadrových elektrární.

V štvrtej časti dizertačnej práce sme sa zamerali na analyzovanie vplyvu rôznych systémových parametrov na generovanie „sympatického“ prúdu na susednom transformátore počas vzniku vzájomnej interakcie medzi transformátormi, zapríčinennej spínaním. Predmetom analýzy bola veľkosť maximálnej hodnoty zapínacieho prúdu, dĺžka tlmenia rázového prúdu, ako jednotlivé závislosti vplyvajúce na sledovaný efekt. Na základe uvedenej štúdie boli zhodnotené jednotlivé závery, ktoré sú uvedené v kap. 5. Súčasné metódy na zamedzenie vzniku zapínacieho rázu transformátorov v rámci jednotlivých chrániacich terminálov sú taktiež uvedené v práci, pričom bližšia pozornosť je venovaná konkrétnym spôsobom eliminácie negatívnych vplyvov.

Piata časť prezentuje analýzu využitia nového algoritmu detekcie zapínacieho rázu, ktorý sa ešte len postupne zavádza do chrániacich terminálov transformátorov. Tento chrániaci algoritmus bol pôvodne vyvinutý na zvýšenie citlivosti tradičných techník rozpoznania zapínacieho rázu spojeného so saturáciou jadra transformátora a poruchového prúdu. Avšak na základe vykonanej analýzy v častiach kap. 6.1.2 - 6.14 dizertačnej práce, resp. v Prílohe C bolo preukázané, že tento prístup môže byť aplikovaný aj na detekciu „sympatického“ rázu spojeného so zapnutím paralelného transformátora. V prípade aplikácie uvedenej metódy (originálne navrhutej na detekciu zapínacieho rázu) so zámerom detekcie vzniku „sympatickej“ interakcie je badateľný prínos z hľadiska možnosti rýchlej detekcie presýtenia na základe uvedenej časovej charakteristiky medzi integrálnou hodnotou napätia, resp. prúdu v spojení s takmer okamžitým výskytom „Lissajousevej“ závislosti, na rozdiel od použitia tradičného spôsobu detekcie vyšších harmonických spojených s postupným nárastom sledovaných veličín.

Aj v prípade zabezpečenia spoľahlivej funkcie chrániacich systémov spojených s opísanými problémami pri generovaní zapínacieho rázového prúdu, resp. neočakávaným nasýtením transformátora spôsobeným vzájomnou interakciou, tieto prúdové rázy pri spínaní výkonového transformátora vedú k postupnej degradácii použitých izolačných materiálov a teda prispievajú k zníženiu životnosti transformátora. Z tohto dôvodu vychádzajú požiadavky na ich eliminovanie, resp. minimalizovanie.

Záverečná časť dizertačnej práce sa zameriava na nový prístup minimalizácie zapínacieho prúdu v prípade použitia kontrolovaného spínania trojpólového vypínača, keďže tento spôsob je ekonomicky veľmi výhodný s možnosťou použitia aj v elektrických systémoch bez možnosti nezávislého ovládania jednotlivých pólov výkonového vypínača. Platnosť prezentovanej metódy je overená na prípade nezaťaženej blokového transformátora o menovitom výkone 250 MVA. S požiadavkou stanovenia všeobecnosti prezentovaného prístupu minimalizácie zapínacieho prúdu je nevyhnutné vykonanie doplňujúcich simulácií ako aj meraní na reálnom modeli. Na analyzovanie navrhutej metódy na redukovanie veľkosti rázových prúdov pri zapnutí výkonového transformátora bolo použité 3D zobrazenie vzoru zapínacieho prúdu, ako inovatívny spôsob efektívneho spôsobu prezentácie citlivostnej analýzy na veľkosť rázového prúdu pri zapnutí výkonového transformátora. Jednotlivé výsledky boli overené pomocou systematickej analýzy modelu časti elektrickej sústavy a simulovaním zapnutia rozličných typov výkonových transformátorov, ako aj konfigurácií ich zapojení.

Hlavnou výhodou uvedenej metódy obmedzenia rázových prúdov pri zapnutí transformátora je schopnosť realizovania uvedeného mechanizmu bez potreby vykonávania dodatočných meraní, resp. výpočtov s cieľom stanovenia príslušných hodnôt jednotlivých remanentných magnetických tokov transformátora spolu s možnosťou použitia kompaktného trojfázového vypínača bez schopnosti nezávislého ovládania jednotlivých pólov.

Záver

Téma dizertačnej práce, prechodný dej na transformátore pri zapnutí paralelného alebo elektricky blízkeho transformátora je relatívne nová, z dôvodu výskytu výlučne pri moderných typoch transformátorov o veľkom výkone, vznikajúcich pri výrobe novými technologickými postupmi pre podporu minimálnych strát v stave naprázdno. Väčšina prác zaoberajúcich sa touto problematikou bola v poslednom desaťročí publikovaná najmä vo Veľkej Británii, USA, Číne a v niektorých krajinách Južnej Ameriky. V súčasnej dobe existuje viacero prác zaoberajúcich sa témou prechodných dejov spôsobených zapnutím transformátorov do elektrickej siete, za zjednodušujúceho predpokladu zanedbania iných transformátorov prepojených v rámci elektrickej siete na rovnakej napäťovej hladine.

Avšak podstatný aspekt tohto prechodného deja je, že za určitých podmienok prichádza k saturácii elektricky blízkeho transformátorov, ktoré už boli prevádzkované v ustálenom stave ako súčasť elektrickej siete, pričom v literatúre sa tomuto faktoru venuje len veľmi malá, resp. takmer žiadna pozornosť. Toto zdieľanie zapínacieho rázu transformátorov v prúdovej oblasti sa zvykne označovať ako „Sympathetic Inrush“. Hlavným cieľom tejto dizertačnej práce je analyzovanie vplyvu tohto prúdového rázu výkonového transformátora pri spínaní na paralelné, alebo elektricky blízke transformátory a stanovenie negatívnych vplyvov tohto javu na systém chránenia daných zariadení.

Prvá časť dizertačnej práce teoreticky opisuje prechodný dej uvedenia transformátora do prevádzkového stavu za zjednodušujúceho predpokladu uvažovania samostatného transformátora. Táto časť sa zameriava najmä na odvodenie základných princípov opisujúcich generovanie zapínacieho prúdového rázu na tomto transformátore, ktoré je nevyhnutné pre následné odvodenie veľkosti maximálnej amplitúdy nárazového prúdu a tým položením teoretických základov potrebných pre výklad nasledujúcich častí. Zároveň boli uvedené silové účinky tohto deja spolu s dôkladným opisom možnosti obmedzenia nárazového prúdu na základe dostupnej literatúry opísanej v kap. 2 dizertačnej práce.

Ďalej v druhej časti je pozornosť zameraná na zdieľanie zapínacieho rázu transformátorov v prúdovej oblasti, bežne označované ako „Sympathetic Inrush“. Táto časť práce z oblasti vzájomnej interakcie medzi transformátormi obsahuje komplexný opis tohto deja na základe matematickej analýzy, čiastočne odpublikovanej rôznymi zahraničnými odborníkmi z tejto oblasti, pričom sa kladie dôraz najmä na analyticko - matematický opis tohto deja. Na rozdiel od ostatných publikovaných prác citovaných v tejto časti, ktoré sa zväčša zameriavajú na prípad dvojice identických paralelných transformátorov, sú v tejto práci všeobecne prezentované rôzne prípady paralelného, ale aj sériového zapojenia, pričom pre úplnosť sú doložené reálnymi prípadmi výskytu interakcie „Sympathetic Inrush“. Tieto prípady boli v nedávnej minulosti viackrát spozorované a v poslednej dobe aj zachytené poruchovými záznamami. V niektorých prípadoch tento dej spôsobil značné problémy systémov chránenia bližšie opísaných v tejto časti práce. Demonštrované zjednodušené analytické riešenie s uvážením lineárneho priebehu magnetizačnej charakteristiky použité v predchádzajúcich častiach práce nie je postačujúce pre potrebu presného opisu prechodného deja spojeného so saturáciou, resp. hysterézou transformátorov. Z toho dôvodu je nevyhnutné využiť simulačné metódy, opísané v tretej časti, ktorých primárnou úlohou bolo vytvorenie jednotlivých modelov, ktoré boli použité na simulovanie odvodených teoretických priebehov prúdov a magnetických tokov v prechodnom stave pri spínaní transformátorov.

V práci boli predstavené dva nezávislé modely, ktoré boli ďalej použité na analýzu vplyvu spínania transformátorov. V prvom modeli je uvažované s ideálnym napäťovým zdrojom, resp. neuvažujeme kolísanie napätia a teda v skúmanom prípade je umožnené zanedbanie zvyšku elektrickej siete. Vplyv jednotlivých faktorov s nezanedbateľným vplyvom fluktuácie napätia, resp. konfigurácie siete je

1 Prechodný dej na transformátore pri zapnutí elektricky blízkeho transformátora

V literatúre existuje viacero publikácií zameraných na štúdiu, ako aj obmedzenie vysokých prúdov spojených so skratmi v elektrickej blízkosti transformátorov a s tým spojený prechod skratových prúdov. Účinkami skratových prúdov sa zaoberajú takmer všetky literatúry venované rozboru výkonových transformátorov. Avšak ďaleko menej sa v literatúre venuje prípadom porúch transformátorov vzniknutých elektromagnetickou silou vyvolanou zapínaním prúdom spínaného alebo paralelného transformátora.

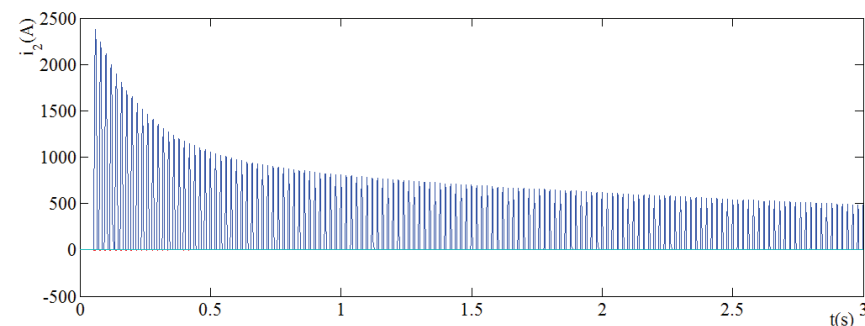
V dizertačnej práci je uvedená kapitola zameraná na opis všeobecného stavu danej problematiky spolu s opisom vykonaných testov spojených s výskytom vzájomnej interakcie medzi transformátormi „Sympathetic Inrush“. Pričom v rámci autoreferátu dizertačnej práce je prezentovaná krátka časť zaoberajúca sa vysvetlením spôsobu generovania „zapínacieho“ prúdu v prevádzkovanom transformátore, ako aj významným predĺžením dĺžky trvania prechodného deja pri zapnutí transformátora v elektrickej blízkosti podobných zariadení. Podrobná analytická štúdia tohto prechodného deja je uvedená v dizertačnej práci.

1.1 Príčina vzniku prechodného deja

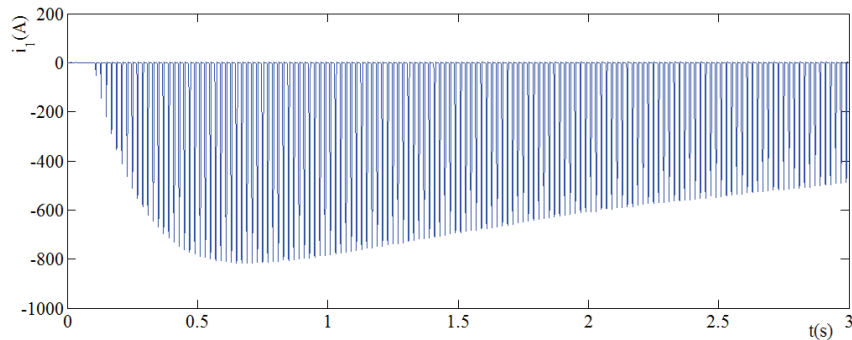
Pre objasnenie procesu vzájomnej interakcie medzi transformátormi „Sympathetic Inrush“ použijeme typický príklad dvojice paralelných transformátorov podľa obr. 3.4 vytvorený v práci [2] spolu s následným vykonaním simulácie prechodného deja, ktoré boli návazne na tento model vykonané v prácach [3] a [4].

Simulované priebehy prúdov $i_1(t)$ a $i_2(t)$ transformátorov T1 a T2 spolu s prúdom tvrdej siete $i_s(t)$ napájajúcej dvojicu transformátorov sú zobrazené na obr. 1.1, 1.2 a 1.3 Ako je vidieť, nárazový prúd $i_2(t)$ dosiahne maximálnej hodnoty tesne po zapnutí transformátora T2, zatiaľ čo nárast prúdu v transformátore T1, tzv. „Sympathetic Inrush Current“, spôsobený interakciou medzi T1 a T2 a ním spôsobená prechodná zložka prúdu $i_1(t)$ narastá postupne na maximálnu hodnotu. Na záver sú obidva prúdy $i_1(t)$ a $i_2(t)$ utlmené na harmonický priebeh zodpovedajúci ustálenému stavu.

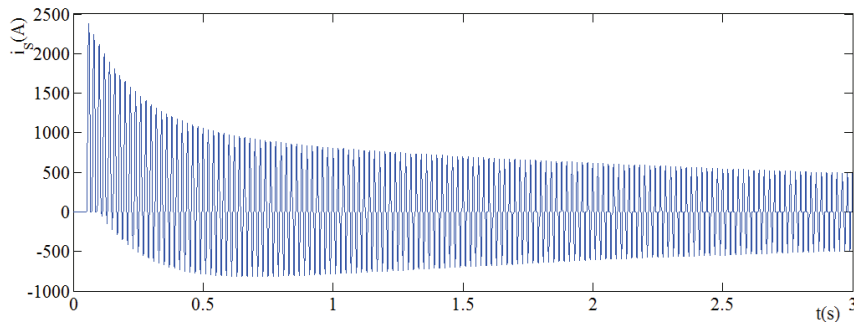
Priebehy týchto prúdov budú podrobnejšie analyzované v nasledujúcich podkapitolách.



Obr. 1.1 Časová závislosť zapínacieho prúdu $i_2(t)$ po pripojení transformátora T2 podľa obr. 3.4 [2]



Obr. 1.2 Časová závislosť prúdu $i_1(t)$ transformátora T1 po pripojení paralelného transformátora T2 „Sympathetic Inrush Current“ [2]



Obr. 1.3 Prúd tvrdej siete $i_s(t)$ napájajúcej dvojicu transformátorov T1 a T2 podľa obr. 3.4 [2]

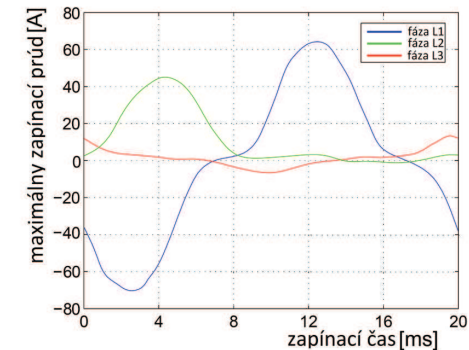
Poznámka: Obr. 1.1 – 1.3 zodpovedá dvojici transformátorov T1 a T2 s menovitými parametrami 230/15,5 kV, 150 MVA na základe modelu prezentovaného v prácach [2] a [3]. Napájací prúd $i_s(t)$ dvojice transformátorov sa skladá zo súčtu jednotlivých prúdov $i_1(t)$ a $i_2(t)$.

Príčinu vzájomnej interakcie medzi transformátormi „Sympathetic Inrush“, ako prvý opísal Blume L. F. [8]. Časovú závislosť prúdu podľa obr. 1.1 – 1.3 možno vysvetliť na základe obr. 1.4. Pred zapnutím spínača S sa transformátor T1 nachádza v ustálenom stave napájaný z tvrdej siete cez prenosové vedenie a je v stave naprázdno.

Zapnutím výkonového vypínača S a následným privedením harmonického napätia na transformátor T2 spôsobí generovanie zapínacieho prúdového rázu medzi tvrdou sieťou a transformátorom T2 podľa kap. 2. Táto prechodná zložka magnetizačného prúdu obsahuje jednosmernú zložku, ktorej veľkosť a polarita závisí od okamihu pripojenia. Jednosmerná zložka prúdu produkuje jednosmerný napäťový pokles na systémovej rezistancii R_s (súčet rezistancií medzi zdrojom napätia a prípojnicou napájajúcou dvojicu transformátorov), ktorý má polaritu danú jednosmernou zložkou magnetizačného prúdu transformátora T2.

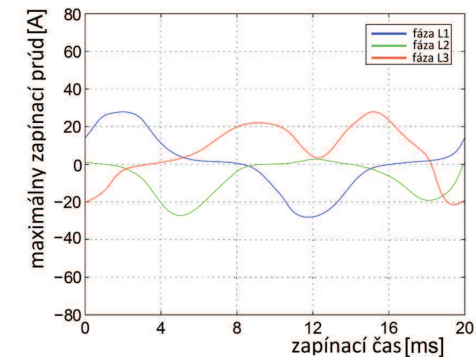
Napäťový pokles spolu s harmonickým napätím tvrdej siete vytvorí zmenu hodnoty napätia, ktorá je na svorkách transformátora T1. Toto napätie následne spôsobí, že magnetické pole transformátora T1 sa začne vybíjať formou jednosmernej zložky prúdu $i_1(t)$, ktorý bude pretekať smerom k napäťovému poklesu a to znamená opačným smerom ako prúd $i_2(t)$ transformátora T2. Tento prúd sa postupne

případe bude generovaný rázový prúd o veľkosti 67A. Obr. 4.6 zobrazuje korešpondujúce hodnoty zapínacieho prúdu s predchádzajúcim obr. 4.5, avšak v tomto prípade je použitá navrhnutá stratégia, pričom výsledkom je, že maximálna hodnota zapínacieho prúdu v najnepriaznivejšom prípade sa rovná takmer 3 násobne menšej hodnote, ako pri použití stratégie rýchleho spínania.



Obr. 4.5 Závislosť maximálnej hodnoty zapínacieho prúdu od okamihu zapnutia v prípade stratégie rýchleho spínania transformátora Ynyn

Uvedená simulačná analýza vykonaná na výkonovom transformátore 250 MVA preukazuje, že metóda simultálneho ovládania sekvencie spínania výkonových vypínačov môže byť použitá na minimalizáciu zapínacích prúdov výkonového transformátora. Hlavnou výhodou je, že sledovaná metóda si nevyžaduje nezávislé ovládanie jednotlivých pólov výkonového vypínača. Táto technika je navrhnutá s ohľadom na prenosové a distribučné transformátory, avšak z hľadiska ekonomickosti a prístupnosti navrhnutého systému môže byť použitá aj v systémoch vysokého napätia.



Obr. 4.6 Závislosť maximálnej hodnoty zapínacieho prúdu od okamihu zapnutia v prípade stratégie simultálneho ovládania transformátora Ynyn

Poznámka: Predchádzajúce analýzy uvádzajú, že remanentné magnetické toky vo všetkých troch fázach musia byť dostupné s cieľom obmedzenia veľkosti zapínacieho prúdu na základe eliminovania rozdielových hodnôt magnetických tokov. Tento predpoklad kladie najvýraznejšie obmedzenie na použiteľnosť tejto metódy [13, 14]. Opísaná metóda v diz. práci poukazuje na fakt, že časová hodnota jednotlivých spínacích cyklov môže byť efektívne využitá na obmedzenie zapínacieho prúdu bez potreby kalkulácie veľkosti remanentných mag. tokov.

transformátora. Navyše uvažujeme hlavnú rozptylovú indukčnosť medzi vinutiami nižšieho a vyššieho napätia a indukčnosť vzduchovej medzery je taktiež uvážená, keďže hrá výraznú úlohu v tlmení pri prechodných dejoch na transformátore. Parametre modelu transformátora je možné stanoviť na základe štandardných meraní slúžiacich na požadované účely.

Tab. 4.1 sumarizuje výsledky simulácií prezentovaných v dizertačnej práci obr. 6.21 – 6.31 a obr. 6.17 – 6.19, pričom porovnaním jednotlivých maximálnych hodnôt rázového prúdu v najnepriaznivejšom čase zapojenia korešpondujúcich k danému zapojeniu transformátora. Štandardný faktor k prezentovaný v literatúrach [19] je možné použiť na analytické určenie maximálnej hodnoty zapínacieho prúdu trojfázového transformátora. Faktor k je odvodený semi-empirickými úvahami založenými na topológii magnetického jadra, ako aj distribúciou prúdu medzi jednotlivými vinutiami transformátora.

Tab. 4.1: Vplyv konfigurácie zapojenia transformátora na veľkosť maximálneho prechodného prúdu počas zapnutia

Konfigurácia zapojenia	Maximálny špičkový prúd (A) [pu] (%)	Maximálny prúd neutrálneho vodiča (A) [pu] (%)	k - factor
Yyn	2524 (100%)	1747 (70%)	1
Ynd	2235 (87%)	796 (31%)	1
Yyn	1985 (78%)	-	0,7-0,85
Yd	2036 (80%)	-	2.3
Dyn	2310 (90%)	-	1

Pomer medzi časovými píkmami maximálnych zapínacích prúdov v prípadoch Yyn a Yyn sú v súlade s hodnotami opisujúcimi rovnakú závislosť na základe semi-empirického faktora k uvedenými v uvedenej literatúre. Rozdiely o veľkosti 15%-20% boli pozorované v prípade zapojenia príslušných vinutí transformátora do trojuholníka a to ako na primárnej, tak aj sekundárnej strane transformátora.

Prítomnosť delta zapojenia redukuje amplitúdu prúdu spojovacieho vedenia medzi transformátorom a napájacou sieťou, keďže toto zapojenie umožňuje cirkuláciu jednosmernej zložky prúdu medzi jednotlivými vinutiami a teda elimináciu tretej harmonickej zložky prúdu, ako aj jej násobkov. Umožnenie cirkulácie jednosmernej zložky prúdu v rámci transformátora ovplyvňuje amplitúdu zapínacieho prúdu, pretože umožňuje obmedzenie, resp. blokovanie generovania násobkov tretích harmonických prúdu z pohľadu vedenia.

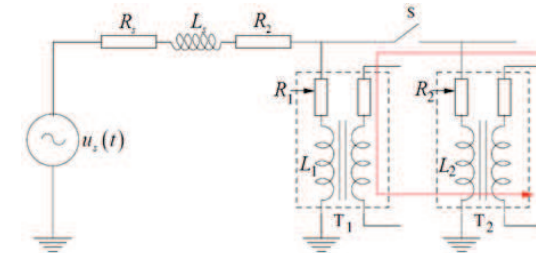
Poznámka: Podrobnejším pozorovaním jednotlivých maximálnych hodnôt zapínacích prúdov na obr. 6.21- 6.31, resp. obr. 6.17 – 6.19 uvedených v dizertačnej práci boli vyvodené viaceré konštatovanie, ktoré sú uvedené v kap. 6.2.5. dizertačnej práce.

4.4 Porovnanie navrhutej metódy so stratégiou rýchleho spínania „Rapid-Closing Switching Strategy“

Stratégia rýchleho spínania „Rapid Closing Switching Strategy“, opísaná v úvodnej časti kap. 6.2 dizertačnej práce a navrhnutý mechanizmus redukcie veľkosti zapínacieho prúdu (kap. 6.2.5 diz. práce) na základe pozorovanej stratégie sú porovnané na obr. 4.5, resp. obr. 4.6 v prípade transformátora v zapojení Yyn. Na obr. 4.5 je aplikovaná stratégia rýchleho spínania na pripojenie transformátora za predpokladu, že nie sú k dispozícii informácie o hodnotách remanentných magnetických tokov. Prvá fáza sa uzatvára v okamihu, keď hodnota napätia dosahuje vrcholovej hodnoty (fáza – L1) a ďalšie dve fázy sú oneskorené o 5 ms. Za predpokladu, že hodnota remanentného magnetického toku nie je známa, pôsobenie výkonového vypínača, tlmenie zapínacieho prúdu nie je vždy optimálne a teda v najhoršom

zväčšuje rýchlosťou danou časovou konštantou $\tau = R_2 / L_2$ na hodnotu určenú poklesom napätia na systémovej impedancii. V rovnakej dobe ako narastá zapínací prúd $i_2(t)$ spínaného transformátora, narastá aj prúd $i_1(t)$ paralelného transformátora T1 spôsobený napäťovým poklesom na danej prípojnici.

Po nejakej dobe sa veľkosti týchto prúdov vyrovnajú a vzhľadom k tomu, že tieto prúdy tečú z pohľadu prípojnice v opačných smeroch, sa vzájomne rušia a preto napäťový pokles v tomto čase je rovný nule. Tieto dva prúdy sa potom stávajú v podstate jediným cirkulujúcim prúdom v elektrickej sieti (obr. 1.4), pričom tento prúd tečie v slučke tvorenej dvojicou transformátorových vinutí a následne je tento prúd postupne utlmaný na základe časovej konštanty nezávislej od parametrov siete a vedenia, bližšie opísaný v kap. 3.2.1, dizertačnej práce.



Obr. 1.4 Zdieľanie zapínacieho magnetizačného prúdu dvojicou paralelných transformátorov

Veľká hodnota jednosmerného prúdu v jednotlivých primárnych transformátorových vinutiach spôsobí nasýtenie magnetického jadra jednosmernou zložkou magnetického toku. Výsledok jednosmernej saturácie je, že dvojica prúdov $i_1(t)$ a $i_2(t)$ transformátorov T1 a T2 výrazne prekročí nominálne hodnoty prúdov primárnych vinutí, čo vyplýva z magnetizačnej charakteristiky feromagnetických materiálov. Vzhľadom k tomu, že magnetické jadrá transformátorov sú presýtené navzájom opačnými hodnotami magnetických tokov a teda jednosmerné prúdy $i_1(t)$ a $i_2(t)$ kmitajú v opačnom smere nezávisle od siete, čiže sú utlmané na základe parametrov samotných transformátorov, čo pri moderných typoch nízko stratových magnetických obvodov vedie k výraznému (rádovému) predĺženiu trvania prechodného deja v porovnaní so spínaním samostatného transformátora.

2 Analýza systémových faktorov vplyvu zapnutia transformátora na zapínací prúd a veľkosť vzájomnej interakcie medzi transformátormi

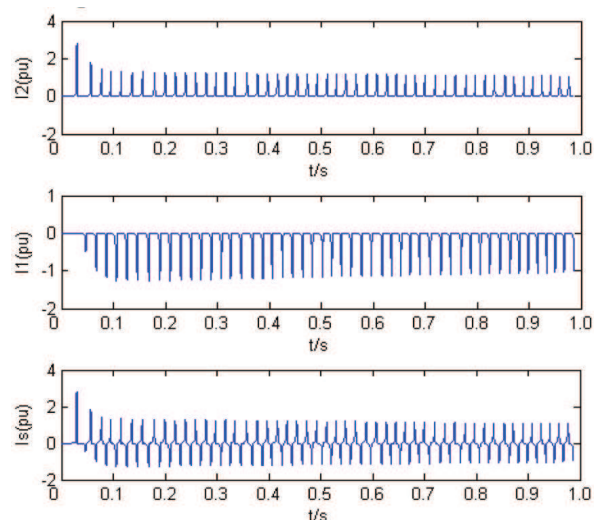
Pre analyzovanie účinku vybraných systémových faktorov na veľkosť a charakter prechodného deja zapínacieho prúdu pri spínaní paralelného resp. sériového transformátora a analýze vzájomnej interakcie medzi týmito zariadeniami sme použili modely, bližšie prezentované v dizertačnej práci, kap. 4. resp. v Prilohe G a H. Tieto modely boli vytvorené v softvérovom prostredí Matlab a využívajú trojfázové zapojenie transformátora, čo nám umožňuje bližšie skúmať vplyv rôznych druhov zapojenia transformátora ako aj uzemnenia.

2.1 Východisková simulácia vplyvu faktorov zapnutia transformátora

Z dôvodu analýzy vplyvu jednotlivých systémových parametrov na charakter „Symphatetic Inrush Current“, je potrebné zdefinovať východiskový stav – referenčnú simuláciu na základe ktorej môžeme následne vykonať priame porovnanie vplyvu zmeny jednotlivých parametrov.

Na nasledujúcom obr. 2.1 je zobrazený priebeh okamžitých hodnôt prúdov:

- *Systémový prúd* i_s (napájací prúd, súčet $i_1 + i_2$),
- „*Sympatetický*“ (interakčný) prúd i_1 transformátora T1 (transformátor T1 je prevádzkovaný v ustálenom stave v čase pripojenie transformátora T2),
- *Zapínací rázový prúd* i_2 transformátora T2,



Obr. 2.1 Priebeh okamžitých hodnôt prúdov i_1 , i_2 a i_s počas uvedenia transformátora T2 do prevádzkového stavu

Jednotlivé prúdy zodpovedajú principiálnej schéme na obr. 1.4 (východiskový model – referenčná simulácia). Uvedenie transformátora do prevádzkového stavu je vykonané výkonovými vypínačmi v pozitívnej sekvencii pri prechode okamžitej hodnoty napätia (magnetického toku) vo fáze L1 nulou. Ďalej je dôležité podotknúť, že v rámci východiskovej simulácie neuvažujeme zaťaženie na terciárnom vinutí transformátora.

Na základe referenčnej simulácie zobrazenej na obr. 2.1 je zrejmé, že k vzájomnej interakcie medzi dvomi transformátormi T1 a T2 dochádza v slučke, čo možno pozorovať na tom, že prechodné zložky prúdov $i_1(t)$ a $i_2(t)$ majú opačné polaritu.

- Magnetický tok prevádzkového transformátora T1 sa postupne zväčšuje, rovnako ako sa transformátor T1 postupne dostáva do oblasti nasýtenia magnetizačným prúdom $i_1(t)$, na rozdiel od okamžitého prechodu do stavu nasýtenia transformátora T2, čo simulačne potvrdzuje matematickú analýzu v kap. 3.2.1 dizertačnej práce.
- Magnetický tok prevádzkovaného transformátora T1 a spínaného transformátora T2 dosahujú vrcholy nasýtenia striedavo a navyše ich vrcholy sú opačnej polaritu, čo je spôsobené tým, že po určitom čase tento prúd takmer nezávisle od systémovej impedancie preteká v slučke medzi T1 a T2.
- Súčet prúdov týchto transformátorov zodpovedá prúdu $i_s(t)$. Jednosmerná zložka tohto prúdu sa pomerne rýchlo utlmí a po jej odznení je prúd $i_s(t)$ takmer úplne symetrickým (ešte v čase hlbokoj saturácie T1 a T2) a na základe množstva vyšších harmonických je preukázané, že skreslenie tohto prúdu na rozdiel od prúdov $i_1(t)$ a $i_2(t)$ je minimálne.

Rovnica (4.6) dokazuje, že hodnota jednosmernej zložky magnetického ϕ_{offs} je periodická veličina a jej veľkosť je funkciou Δt_{POW} . Veľkosť zapínacieho prúdu je závislá od veľkosti jednosmernej zložky magnetického toku a táto hodnota je rozhodujúcim faktorom vo vývoji prechodného deja pri nasledujúcom zapnutí transformátora. Jednosmerná zložka magnetického toku je redukovaná zmenšením parametra C, alebo sinusovej hodnoty vo vzťahu (4.6), pričom minimálna hodnota parametra $C(\xi, \Delta t_{POW}, \beta)$ je v rozsahu 1 - ξ a teda pre čas Δt_{POW} platí:

$$\min(|\phi_{offs}|) \rightarrow \Delta t_{POW} = -\frac{\beta}{\omega} \quad (4.9)$$

Pričom pre jednotlivé fázy platí, $\sin(\omega \cdot \Delta t_{zap} + \theta + \gamma) = 0$ a tak:

$$\min(|\phi_{offs}|) \rightarrow \Delta t_{zap} = -\frac{\theta_j + \gamma + n\pi}{\omega} \quad (4.10)$$

Minimálna hodnota amplitúdy jednosmernej magnetickej zložky ϕ_{offs} sa objavuje s konštantným Δt_{POW} nezávisle od fázového posunu θ_j ako je naznačené vo vzťahu (4.9). To zodpovedá tmavomodrej diagonálnej čiare na obr. 4.1 a identifikuje konzistentnú oblasť minimálnych zapínacích prúdov vo všetkých troch fázach. Rovnica (4.10) taktiež označuje oblasť, kde hodnota ϕ_{offs} je nulová. Avšak táto rovnica predstavuje nelineárny vzťah, ktorý je závislý od fázového posunu θ_j . Na obr. 4.1 táto oblasť môže byť identifikovaná v 3D zobrazení ako „dolina“ okolo jednotlivých vrcholov s rozličnými miestami pre každú fázu.

Zobrazenie veľkosti zapínacieho prúdu ako funkciu času Δt_{vyp} , resp. Δt_{zap} je možné získať teoretickou úpravou magnetického toku. Avšak, funkcia opisujúca vzťah medzi prúdom a magnetickým tokom je nelineárna, definovaná magneticou charakteristikou použitého železného jadra transformátora. Navyše elektrické a magneticke závislosti medzi jednotlivými fázami transformátora komplikujú akékoľvek ďalšie zjednodušenie bez použitia simulačného modelu, ako je bližšie opísané v kap. 3 dizertačnej práce.

4.3 Vplyv konfigurácie zapojenia transformátora na optimálny čas spínania transformátora

S cieľom porovnania pozorovaného správania maximálnej hodnoty zapínacieho prúdu na obr. 4.1 – 4.3 v prípade zapojenia Y_{yn} vinutí transformátora s inými druhmi jednotlivých konfigurácií vinutí je použitý model opísaný v kap. 4 dizertačnej práce, vytvorený v programe Matlab. Pri vytvorení modelu transformátora je potrebné reprodukovať vlastnosti jednotlivých výkonových vypínačov pri zapnutí, ako aj vypnutí s cieľom napodobniť charakteristické črty prechodných dejov.

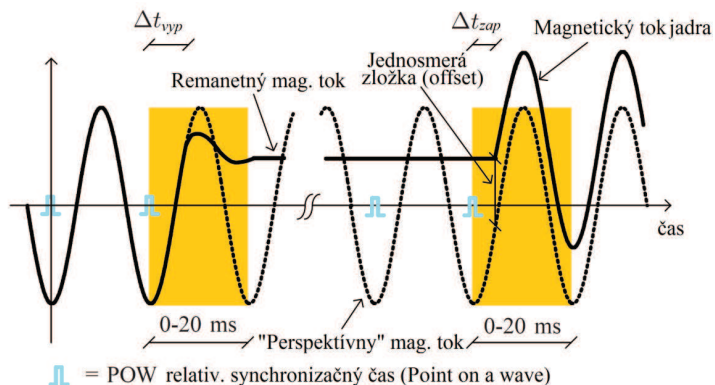
Štandardné modely dostupné v ATP/EMTP a PSCAD neumožňujú zahrnutie zvyškovej, remanentnej hodnoty magnetickej indukcie po odpojení transformátora a tým exaktné definovanie prechodného deja. Navyše modelovanie v čase saturácie je nepresné, keďže boli pozorované značné rozdiely medzi simuláciami a meraniami. Jednotlivé problémy sú bližšie definované v literatúre [19].

Použitý model transformátora v konkrétnom zapojení spĺňa požadované vlastnosti. Model transformátora je založený na topologickom opise jadra transformátora. Každá transformátorová časť je modelovaná ako nelineárny prvok z hysterézneho cievky. Hysterézný model je nevyhnutný z dôvodu presnej reprezentácie prechodných dejov, ako aj určenia remanentných magneticých tokov. Parazitné kapacity vo vinutiach je potrebné zohľadniť v danom modeli, pretože majú nezanedbateľný vplyv na reziduálne magneticke toky [18] a sú modelované ako pripojené kapacity k jednotlivým vinutiám

Táto simulácia počas vypnutia transformátora naznačuje periodickú závislosť remanentného magnetického toku od okamihu odpojenia transformátora, pričom podobné správanie bolo pozorované aj v kap. 5.7 dizertačnej práce resp. literatúre [6]. Periodicita remanentného, zvyškového magnetického toku môže byť vyjadrená Fourierovým radom, následne na to obmedzíme tento rád na hodnotu prvého člena a teda môžeme tento vzťah opísať, ako funkciu [13]:

$$\phi_{j_res}(\Delta t_{vyp}) = \xi \cdot \phi_{max_j_res} \sin(\omega \Delta t_{zap} + \phi_j + \beta) \quad (4.4)$$

prícom β opisuje fázový posun vlny, definovanej remanentným magnetickým tokom a ξ je pomer medzi menovitým a remanentným magnetickým tokom.



Obr. 4.4 Zobrazenie jednotlivých magnetických tokov počas spínania transformátora [18]

Keďže po vypnutí výkonového transformátora predpokladáme hodnotu reziduálneho magnetického toku za konštantnú, časové oneskorenie medzi vypnutím a nasledujúcim zapnutím transformátora nie je naďalej relevantné. Časový interval medzi vypnutím, resp. zapnutím možno považovať za relatívny, periodicky sa opakujúci (násobky dĺžky jednej periódy), definovaný ako:

$$\Delta t_{POW} = \Delta t_{vyp} - \Delta t_{zap} \quad (4.5)$$

Rovnica (4.2) môže byť na základe predchádzajúcich vzťahov ďalej analyticky upravená, ako [13]:

$$\begin{aligned} \phi_{offs}(\Delta t_{vyp}, \Delta t_{zap}) &= \\ &= \phi_{j_res}(\Delta t_{zap} + \Delta t_{POW}) - \phi_{j_persp}(\Delta t_{zap}) = \\ &= \phi_{max} \left[\xi \cdot \sin(\omega \Delta t_{zap} + \omega \Delta t_{POW} + \phi_j + \beta) \right] - \sin(\omega \Delta t_{zap} + \phi_j) = \\ &= \phi_{max} \left[\frac{\sin(\omega \Delta t_{zap} + \phi_j) \cdot (\xi \cdot \cos(\omega \Delta t_{POW} + \beta) - 1) + \cos(\omega \Delta t_{zap} + \phi_j) \cdot (\xi \cdot \sin(\omega \Delta t_{POW} + \beta))}{\xi \cdot \sin(\omega \Delta t_{zap} + \phi_j + \beta)} \right] = \\ &= \phi_{max} \cdot C(\xi, \Delta t_{POW}, \beta) \sin(\omega \Delta t_{zap} + \phi_j + \gamma) \end{aligned} \quad (4.6)$$

prícom platí:

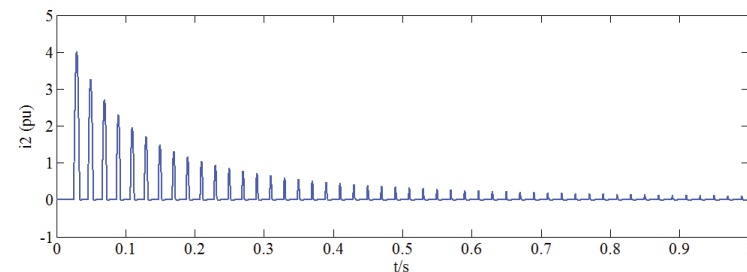
$$C(\xi, \Delta t_{POW}, \beta) = \sqrt{\xi^2 + 1 - 2\xi \cos(\omega \Delta t_{POW} + \beta)} \quad (4.7)$$

$$\gamma = \tan^{-1} \frac{\sin(\omega \Delta t_{POW} + \beta)}{\cos(\omega \Delta t_{POW} + \beta) - \xi^{-1}} \quad (4.8)$$

2.2 Vplyv paralelného transformátora

Na demonštrovanie vplyvu zapnutia výkonového transformátora je použitý model A uvedený v časti kap 4.2 resp. v Prílohe G dizertačnej práce. V nasledovnom prípade uvažujeme pripojenie nezávislého transformátora T2, pričom uvažuje okamih pripojenia do elektrickej siete v čase keď platí $\alpha = 0$, kde remanentný magnetický tok transformátora je rovný $\phi(0) = 0 \text{ Wb}$, čo zodpovedá predchádzajúcej simulácii z obr. 2.1.

Väčšina prác zaoberajúcich sa danou problematikou zapínacieho rázu transformátora počíta s daným zjednodušením (zanedbania iných transformátorov), ale ako je demonštrované na nasledujúcich výsledkoch je zrejmé, že takéto zjednodušenie je neopodstatnené a má nezanedbateľný vplyv na prechodný dej zapnutia transformátora. Zapínací prúd transformátora je charakterizovaný ako úplne jednosmerný, s prudkým nárastom jednosmernej zložky až do maximálnej hodnoty v rámci jednej polperiódy a následným postupným utlmením až do hodnoty zodpovedajúcej prevádzkovému stavu transformátora.



Obr. 2.2 Priebeh okamžitých hodnôt prúdu i_2 počas uvedenia transformátora T2 do prevádzkového stavu, prípad zanedbania T1

Veľkosti magnetizačného prúdu, ako aj rýchlosť tlmenia je vo veľkej miere závislá od uvedených faktorov. Tieto faktory boli viackrát prezentované v mnohých publikáciách (napr. [11] - [13]), avšak tieto štúdie boli vykonané za zjednodušujúceho predpokladu neuvažovania okolitých transformátorov a to už ako v sériovom, tak aj v paralelnom zapojení.

1. Okamžitej hodnote napätia na prípojnici, v čase zapnutia transformátora.
2. Hodnote remanentného, zostatkového magnetického toku feromagnetického jadra transformátora a jeho polaritu v porovnaní s hodnotou ustáleného magnetického toku jadra transformátora v čase zapnutia.
3. Maximálnej hodnote magnetického toku (magnetizačná charakteristika) feromagnetického materiálu jadra transformátora.
4. Celkovej systémovej impedancie elektrického obvodu tvrdej siete, z ktorej je napájaný transformátor.

V prípade prítomnosti elektricky blízkeho transformátora dochádza k javu vzájomnej interakcie týchto transformátorov a to vo väčšine prípadov spôsobuje výrazné zmeny v priebehu prechodného deja zapínacieho prúdu. Porovnaním priebehov zobrazených prúdov $i_2(t)$ na obr. 2.1 a obr. 2.2 možno konštatovať, že zapínací prúd $i_1(t)$ paralelného transformátora T2 pretrváva v elektrickej sieti výrazne dlhší čas, ako v prípade zapnutia rovnakého typu transformátora v rámci samostatnej prevádzky a toto pozorovanie potvrdzuje výsledky matematickej analýzy uvedenej v kap. 3 dizertačnej práce.

Poznámka: Experimentálne pozorovanie vzájomnej interakcie medzi transformátormi „Sympathetic Inrush“ je z dôvodu možnosti sledovania na najväčších typoch transformátorov veľmi vzácne. Najnovšie pozorovanie bolo vykonané z dôvodu bližšieho objasnenia tohto deja v elektrickej stanici Fortaleza Substation vodnej elektrárne São Francisco – CHESF v Brazílii [10], pričom niektoré konkrétne prípady výskytu „Sympathetic Inrush“ sú bližšie opísané v dizertačnej práci a to konkrétne v kap. 1.1.

2.3 Zhrnutie analýzy vplyvu systémových faktorov

V dizertačnej práci v kap. 5.1 – 5.9 sme sa zamerali na analýzu vplyvu rôznych systémových parametrov na generovanie „sympatetického“ prúdu na susednom transformátore počas vzniku vzájomnej interakcie medzi transformátormi, zapríčinennej spínaním. Predmetom analýzy je veľkosť maximálnej hodnoty zapínacieho prúdu, dĺžka tlmenia rázového prúdu, ako aj jednotlivé závislosti vplyvajúce na sledovaný efekt. Na základe analýzy boli vyvedené nasledovné závery:

1. Vplyv okamihu zapnutia je rozhodujúci na veľkosť saturácie jednotlivých transformátorov, pričom platí, že najväčšia miera pozitívnej saturácie sa prejaví v okamihu zapnutia, ak uhol $\alpha = 0$.
2. Veľkosť interakcie je postupne redukovaná, úmerne k narastajúcemu uhlu v intervale medzi 0 a 90 stupňami.
3. Existencia systémovej rezistancie je základnou príčinou generovania zapínacieho prúdu. Veľkosť tejto rezistancie ovplyvňuje nielen rýchlosť tvorby a tlmenia rázového deja, ale aj veľkosť saturácie jednotlivých transformátorov.
4. Zaťaženie transformátora má pozitívny vplyv na tlmenie saturácie transformátora, avšak v prípade nízko stratových transformátorov s minimálnymi hodnotami rozptylových rezistancií a indukčností nie je tento efekt výrazne badateľný.
5. Existencia paralelného kondenzátora tlmí veľkosť rázového prúdu, pričom väčšia hodnota kapacity spôsobuje, že je tento efekt zreteľnejší.
6. Reziiduálny magnetický tok spínaného nezaťaženého transformátora je dôležitým faktorom ovplyvňujúcim veľkosť interakcie. Väčšia hodnota remanentného magnetického toku spôsobuje výraznejšie nasýtenie transformátorov a zároveň prechod transformátorov do stavu saturácie je výrazne urýchlený.
7. Mechanizmus zdieľania „sympatetického“ rázu paralelných transformátorov je identický ako v prípade sériového zapojenia, ale z dôvodu vplyvu rezistancie spojovacieho vedenia medzi transformátormi je amplitúda zapínacieho, resp. „sympatetického“ prúdu redukovaná v porovnaní s paralelným zapojením. Taktiež miera tlmenia je výrazne urýchlená, pričom paradoxne prechodný dej „sympatetického“ rázu prevádzkovaného transformátora pretrváva v sieti aj po utlmení prúdového rázu na spínanom transformátore v prípade nezaťaženého transformátora.
8. Spôsob uzemnenia transformátora je jeden z ovplyvňujúcich faktorov zapínacieho prúdu trojfázového transformátora, nie však rozhodujúcim. Veľkosť prúdových rázov dvojice paralelných transformátorov je najcitlivejší v prípade uzemnenej hviezdy. Napriek tomu zmenou uzemnenia nie je možné dosiahnuť výraznejších zmien sledovanej hodnoty prúdu v čase zapnutia.

Účelom daného grafického zobrazenia maximálnych hodnôt zapínacích prúdov zobrazených na obr. 4.1 – 4.3 je zvýraznenie zapínacieho prúdu v jednotlivých fázach transformátora v závislosti od rôznych časových hodnôt jednotlivých spínaní (Δt_{zap} a Δt_{vyp}). Hodnota $t = 0$ synchronizuje jednotlivé spínanie udalosti a prislúcha okamihu, keď napätie na strane zvlášť vysokého napätia V_{RS} sledovaného transformátora prechádza nulovou hodnotou.

V najnepriaznivejšom prípade maximálna hodnota zapínacieho prúdu sledovaného transformátora je takmer 2 kA, čo predstavuje niekoľkonásobok menovitej hodnoty prúdu transformátora. V uvedených grafoch na obr. 4.1 – 4.13 sú uvedené hodnoty zapínacieho prúdu v medziach 20-20 ms, pričom tieto grafy zobrazujú dva hlavné vrcholy, ktoré sú striedavo kladné a záporné hodnoty a vytvárajú grafické vzory. (Grafická závislosť zobrazuje charakteristiku v závislosti od absolútnej hodnoty). Tento vzor sa opakuje v dôsledku periodicity jednotlivých priebehov. Prechod z pozitívnych do záporných hodnôt je postupný a vytvára regióny, kde rázový prúd dosahuje minimálne absolútne hodnoty.

Diagonálna línia na obr. 4.1 – 4.3 zobrazená tmavomodrou čiarou predstavuje konzistentné oblasti vo všetkých troch fázach, kde rázový prúd je výrazne minimalizovaný a to konkrétne na hodnotu nižšiu ako 3-násobok menovitého prúdu transformátora. Skutočnosť, že táto podmienka je splnená vo všetkých troch fázach súčasne, tvorí silný predpoklad možnosti redukovania potreby riadeného spínanie – separátneho spínanie jednotlivých výkonových vypínačov.

4.2 Analýza dosiahnutých výsledkov

Nasýtenie magnetického jadra transformátora je hlavnou príčinou vzniku prechodnej zložky zapínacieho prúdu v elektrickej sieti. Ako bolo preukázané v kap. 5 dizertačnej práce, uvedenie transformátora do prevádzky v najnepriaznivejšom okamihu s najväčšou hodnotou remanentného magnetického toku, môže dosiahnuť maximálnu teoretickú hodnotu dvoj až trojnásobok menovitého prúdu transformátora. V prípade reálneho transformátora tento prúd môže dosiahnuť dokonca veľkosti desiatok násobkov menovitej hodnoty. [11]

Veľkosť magnetického toku v jadre transformátora v okamihu zapnutia je rovná tzv. reziiduálnemu magnetickému toku transformátora. Integrál napätia, ktoré bude aplikované na transformátor v čase pripojenia možno nazvať „perspektívny“ magnetický tok v tom zmysle, že rovnaké hodnoty magnetického toku sa dosiahu po pripojení v rovnovážnom stave [18], ako je znázornené na obr. 4.4.

„Perspektívny“ magnetický tok môže byť vyjadrený ako funkcia času:

$$\phi_{persp}(t) = \phi_{max} \cdot \sin(\omega t + \theta_j) \quad (4.1)$$

Pričom $1 < j < 3$ je index príslušnej fázy, θ_j je fázový posun v trojfázovej symetrickej sústave a platí, že $\theta_j = [0, -2\pi/3, 2\pi/3]$. Asymetrická (jednosmerná) zložka tohto prúdu je vytvorená, v prípade ak reziiduálny magnetický tok nie je rovný „perspektívnej“ hodnote magnetického toku v okamihu zapnutia a je definovaná ako:

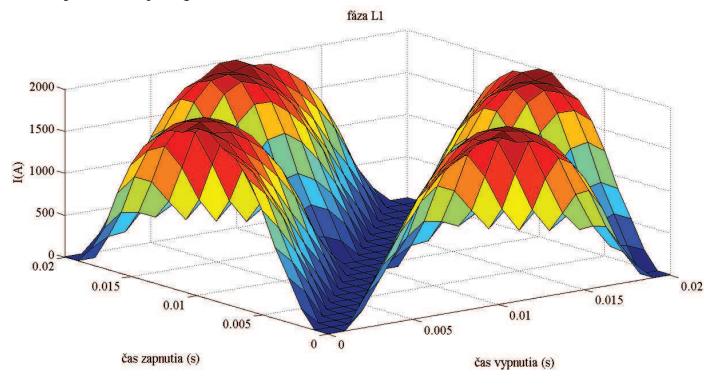
$$\phi_{offs}(\Delta t_{vyp}, \Delta t_{zap}) = \phi_{j_res}(\Delta t_{vyp}) - \phi_{j_persp}(\Delta t_{zap}) \quad (4.2)$$

Zanedbanie tlmenia jednosmernej zložky transformátora je zjednodušenie, ktoré uvažujeme v rámci tejto krátkej analytickej analýzy, kde magnetický tok po zapnutí možno vyjadriť ako:

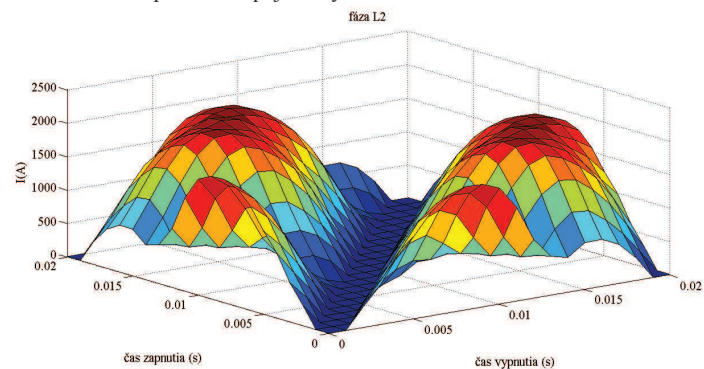
$$\phi_{j_jadra}(t) = \phi_{j_persp}(\Delta t_{zap}) + \phi_{j_offs}(\Delta t_{vyp}, \Delta t_{zap}) \quad (4.3)$$

V tomto špecifickom prípade je daný transformátor simulovaný spolu s výkonovým vypínačom s vysokou vypínacou schopnosťou v rámci špecifickej elektrickej siete (viď kap. 4 dizertačná práca).

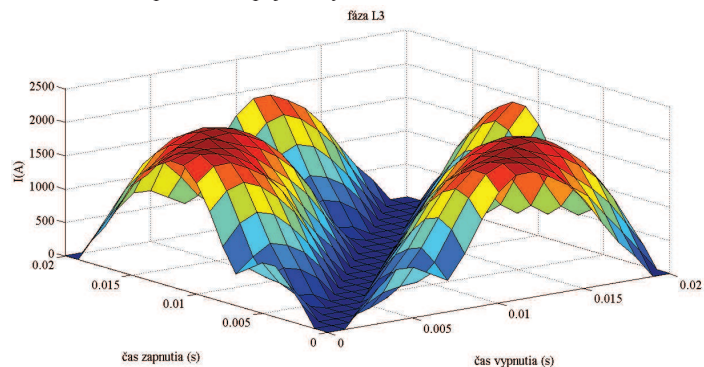
4.1 – 4.3 v závislosti od príslušnej fázy transformátora, pričom jednotlivé časové okamihy výskytu špičkových hodnôt jednotlivých prúdov nie sú zohľadnené.



Obr. 4.1 Závislosť maximálnej hodnoty zapínacieho prúdu transformátora od okamihu vypnutia resp. zapnutia v zapojení Yyn transformátora – fáza L1



Obr. 4.2 Závislosť maximálnej hodnoty zapínacieho prúdu transformátora od okamihu vypnutia resp. zapnutia v zapojení Yyn transformátora – fáza L2



Obr. 4.3 Závislosť maximálnej hodnoty zapínacieho prúdu transformátora od okamihu vypnutia resp. zapnutia v zapojení Yyn transformátora – fáza L3

3 Návrh metodiky na potlačenie negatívnych vplyvov zapínacieho rázu transformátora

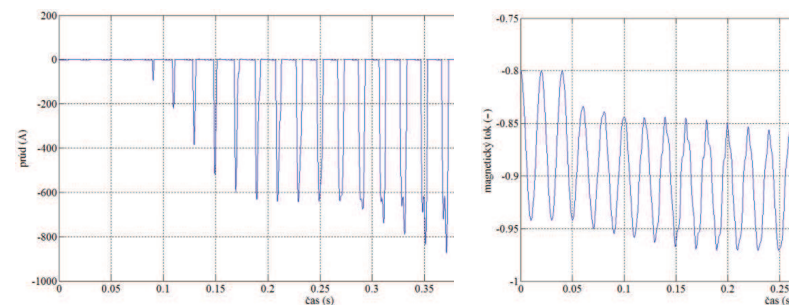
Keďže pri prechodnom deji ako je preukázané v kapitolách kap. 3 a 5 dizertačnej práce, počas vzájomnej interakcie medzi transformátormi dochádza ku generovaniu neúmerne veľkého zapínacieho prúdu, ktorý je z pohľadu rozdielovej ochrany chápaný ako rozdielový (viď Príloha D resp. E, dizertačnej práce) je nevyhnutné zabrániť falošnému pôsobeniu rozdielovej ochrany, ako aj iných chrániacich algoritmov pracujúcich na základe prúdového kritéria.

Súčasne používané chrániace terminály obsahujú viaceré algoritmy na včasné identifikovanie poruchy. Tradičné techniky na rozoznanie spínacieho rázu v rozdielovej ochrane sú založené na detekcii vysokej hodnoty druhej, resp. piatej harmonikovej zložky prúdu v prípade, ak je transformátor v stave saturácie a nízkej hodnoty tejto veličiny v prípade internej poruchy. V prácach [14, 15] je poukázané, že hodnota druhej resp. piatej harmonikovej v zapínacom prúde nízko stratových transformátorov je podstatne redukovaná. Tento fakt sťažuje činnosť ochrán pracujúcich na základe kritéria sledovania vyšších harmonických a vytvára predpoklad vzniku falošných popudov týchto ochrán. Spoľahlivé, včasné a efektívne identifikovanie rozdielu medzi poruchami chráneného systému a zapínacím rázom v čase uvedenia transformátora do prevádzkového stavu zostáva výzvou pre ďalší rozvoj ochrán.

3.1 Priebeh veličín magnetizačnej charakteristiky pri zapnutí paralelného transformátora

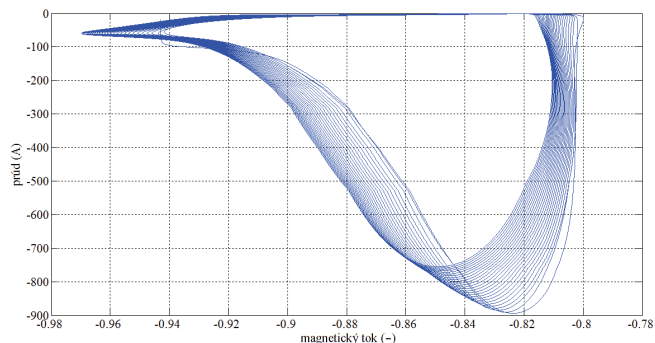
Neočakávaná saturácia magnetického jadra pri vystavení vplyvu „sympatickej“ interakcii je príčinou harmonického skreslenia prúdu transformátora a tak z fyzikálnej podstaty je zrejmé, že detekovanie zmeny uvedenej závislosti je umožnené v kratšom čase, ako v prípade použitia klasickej techniky detekcie obsahu vyšších harmonických prúdov [17]. Tento fakt je obzvlášť zaujímavý v oblasti chránenia výkonových, blokových transformátorov. Na základe uvedenej časovej charakteristiky medzi integrálnou hodnotou napätia a okamžitou hodnotou prúdu je zrejmé, že bezprostredne po pripojení susedného transformátora nastáva rapidná zmena v správaní. Na porovnanie môže slúžiť zobrazenie rovnakej závislosti v prípade medzizávitového skratu, obr. 6.11 dizertačnej práce.

Tento fakt je mimoriadne zaujímavý v prípade vzájomnej interakcie, keďže ako je možné pozorovať na obr. 3.1 sledované hodnoty prúdu resp. magnetického toku vyhodnocované klasickými algoritmi nie sú spojené s okamžitým nárastom na rozdiel od zapínacieho prúdu. A teda aj v prípade správneho nastavenia je vysoko pravdepodobné, že výsledný povet na blokovanie pôsobenia ochrany bude generovaný s oneskorením, čo môže viesť k falošnému vypínaciu povetu danej ochrany.



Obr. 3.1 Priebeh okamžitých hodnôt „sympatického“ prúdu a magnetického toku pri zapnutí paralelného transformátora

Ako je zobrazené na obr. 3.1 v prípade prevádzkovaného transformátora v ustálenej prevádzke, ktorý je vystavený vplyvu vzájomnej interakcie pri zapnutí paralelného transformátora, výsledkom je neočakávané presýtenie magnetickým tokom. Obr. 3.2 zobrazuje magnetizačnú charakteristiku, pričom prvý pohľad je pozorovateľný, odlišný charakter ako v prípade ustáleného stavu, medzifázového (obr. 6.11, uvedený v dizertačnej práci) resp. medzifázového skratu. Tento poznatok je predpokladateľný, keďže v oboch prípadoch ide o dej, ktorý sa z pohľadu magnetickej charakteristiky transformátora odohráva v „lineárnej“ časti.



Obr. 3.2 Závislosť pomernej hodnoty magnetického toku od prúdu počas výskytu vzájomnej interakcie, danej zapnutím paralelného transformátora

V prípade zapínacieho rázu, ako aj pri „sympatetickom“ ráze susedného transformátora ide o jav spojený s nasýtením magnetického jadra, daný vznikom aperiodickej zložky magnetického toku. Na základe uvedených grafických zobrazení je možné konštatovať, že jednotlivé priebehy sú v podstatnej miere odlišné. A tak na základe algoritmu opísaného v dizertačnej práci, kap. 6.1.5 a pozorovaných rozdielov je umožnené identifikovanie, presýtenia magnetického jadra (zapnutie vs. porucha) ale navyše aj neočakávaný prúdový ráz spôsobený zapnutím elektricky blízkeho transformátora.

3.2 Detekcia presýtenia magnetického obvodu

Na okamžité identifikovanie prechodu z normálnej prevádzky do stavu saturácie je nevyhnutné definovanie jednotlivých parametrov určujúcich konkrétny transformátor. Keďže tieto parametre sú jedinečné pre daný transformátor a ich definovanie je veľmi časovo náročné, tak tento fakt predstavuje výraznú nevýhodu navrhutej metódy. Avšak v poslednej dobe s rozvojom moderných druhov algoritmov neurónových sietí, bolo umožnené nasadenie týchto technológií do viacerých oblastí riadenia, ako aj do chrániacich systémov. Na základe použitia tejto technológie je možné navrhnúť univerzálny postup stanovenia jedinečného chránenia pre konkrétny typ transformátora.

Umelé neurónové siete (ANNs) boli navrhnuté so zámerom aplikovania na algoritmy rozdielových ochrán s cieľom doplnenia logiky a zaručenia správneho pôsobenia ochrany [15]. V dizertačnej práci je ďalej opísaný navrhnutý algoritmus rozdielovej ochrany relé pomocou viacvrstvovej „Feed- forward back propagation“ (FFBP) schémy neurónovej siete proti vnútorným poruchám transformátora (medzifázové poruchy resp. skraty), ako aj spínacími prúdmi pomocou detekcie internej poruchy a vyslaniu povelu na výkonový vypínač.

Na základe vykonanej analýzy prezentovanej v dizertačnej práci kap. 6.1.2 - 6.14, resp. v Prílohe C, ako aj simulácii pri uvažovaní rozličných parametrov chráneného zariadenia, s uvažovaním rozličných magnetickej vlastností jadier transformátorov je preukázaná podstatná podobnosť medzi sledovanou magnetizačnou závislosťou v prípade zapnutia, resp. „sympatetickej“ interakcie. A teda je možné konštatovať, že algoritmus uvedený v práci môže byť použitý aj na detekciu „sympatetického“ rázu spojeného so zapnutím paralelného transformátora.

Ďalej pozorovaním rozdielov jednotlivých magnetizačných charakteristík v dizertačnej práci, kap. 6.1.2 - 6.1.4, ako aj v príspevku [15] je možné stanoviť sekvencie merania zapnutí potrebných na vykonanie pri zavádzaní danej ochrany a následne na to je možné využiť hlavnú výhodu neurónových sietí a to konkrétne schopnosť samostatnej funkcie auto-nastavenia [15, 17]. V prípade aplikácie uvedenej metódy (originálne navrhutej na detekciu zapínacieho rázu [16]) so zámerom detekcie vzniku „sympatetickej“ interakcie je badateľný veľký prínos z hľadiska možnosti okamžitej detekcie presýtenia na základe uvedenej časovej charakteristiky medzi hodnotou integrálnej hodnoty napätia a prúdu spojenou takmer okamžitým výskytom „Lissajousovej“ závislosti, na rozdiel od použitia tradičného spôsobu detekcie a pozorovaným postupným nárastom absolútnej hodnoty prúdu. (obr. 3.1).

4 Kontrolované spínanie výkonového transformátora

Aj v prípade zabezpečenia spoľahlivej funkcie chrániacich systémov spojených s opísanými problémami pri generovaní zapínacieho rázového prúdu, resp. neočakávaným nasýtením transformátora spôsobeným vzájomnou interakciou, tieto prúdové rázy pri spínaní výkonového transformátora vedú k postupnej degradácii použitých izolačných materiálov a teda z tohto dôvodu vychádzajú požiadavky na ich eliminovanie resp. minimalizovanie.

Táto dizertačná práca sa špecificky zameriava na efekt vzájomnej interakcie a generovanie neočakávaného prúdového rázu na prevádzkovanom transformátore spôsobené zapnutím elektricky blízkeho transformátora. Avšak, v prípade snahy eliminovania zapínacieho rázu výkonového transformátora ide o identický cieľ, keďže v prípade zamedzenia vzniku zapínacieho rázu neumožníme vznik vzájomnej interakcie medzi transformátormi, resp. generovaniu zdieľaného prechodného prúdu na paralelnom prevádzkovanom transformátore. Z uvedeného dôvodu je kap. 6.2 v rámci dizertačnej práce zameraná na prípad pripájania samostatného transformátora do elektrickej siete.

Nasledujúca kapitola sa konkrétne zameriava na nový prístup minimalizácie zapínacieho prúdu v prípade použitia kontrolovaného spínania trojpóloveho vypínača, keďže tento spôsob je ekonomicky veľmi výhodný, s možnosťou použitia aj v elektrických systémoch bez možnosti nezávislého ovládania jednotlivých pólov výkonového vypínača.

4.1 Simulácia vplyvu časových okamihov spínania na veľkosť prechodného deja

Jednotlivé časové priebehy okamžitých hodnôt zapínacích prúdov v rámci všetkých troch fáz transformátora sú zaznamenávané počas simulácie bližšie popísanej v dizertačnej práci, kap. 6.1. Následne na to sú extrahované príslušné maximálne hodnoty z každého súboru, predstavujúceho jeden špecifický okamih pripojenia resp. odpojenia. Na základe odôvodnených uvedených v dizertačnej práci a na základe zvolenej diferencie 1ms je nevyhnutné vykonanie celkom 400 (20x20) možných kombinácií, opisujúcich časové okamihy pripojenia resp. odpojenia transformátora.

Prúdové špičky sa objavujú v rôznych časoch a majú kladné alebo záporné hodnoty. Absolútne hodnoty týchto prúdov sa potom vynesú do príslušného grafu, ako funkcia časov predstavujúcich odpojenie Δt_{vyp} , resp. pripojenie Δt_{zap} transformátora. Jednotlivé spínacie charakteristiky sú znázornené na obr.