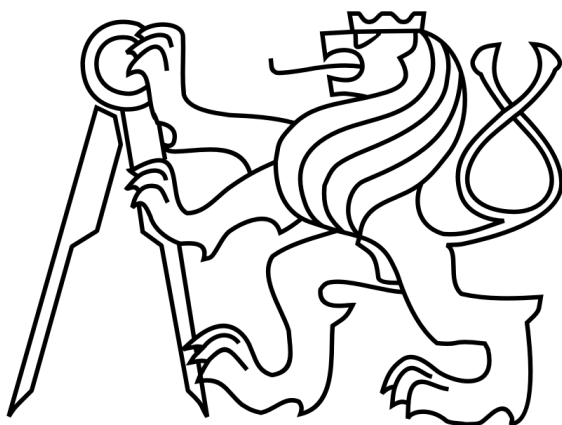


ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE



TEZE K DISERTAČNÍ PRÁCI

České vysoké učení technické v Praze
Fakulta elektrotechnická
Katedra elektroenergetiky

Ing. Zbyněk Brettschneider

NELINEÁRNÍ JEVY V ELEKTRIZAČNÍ SOUSTAVĚ

Doktorský studijní program: Elektrotechnika a informatika
Studijní obor: Elektroenergetika

Teze disertace k získání akademického titulu "doktor", ve zkratce "Ph.D."

Praha, duben 2011

Disertační práce byla vypracována v prezenční formě doktorského studia na Katedře elektroenergetiky Fakulty elektrotechnické ČVUT v Praze.

Uchazeč: Ing. Zbyněk Brettschneider
Katedra elektroenergetiky
Fakulta elektrotechnická ČVUT v Praze
Technická 2, 166 27 Praha 6

Školitel: Prof. Ing. Josef Tlustý, CSc.
Katedra elektroenergetiky
Fakulta elektrotechnická ČVUT v Praze
Technická 2, 166 27 Praha 6

Školitel-specialista:

Oponenti:

.....

.....

Teze byly rozeslány dne:

Obhajoba disertace se koná dne v hod. před komisí pro obhajobu disertační práce ve studijním oboru Elektroenergetika v zasedací místnosti č Fakulty elektrotechnické ČVUT v Praze.

S disertací je možno se seznámit na děkanátu Fakulty elektrotechnické ČVUT v Praze, na oddělení pro vědu, výzkum a zahraniční styky, Technická 2, Praha 6.

.....
předseda komise pro obhajobu disertační práce
ve studijním oboru Elektroenergetika
Fakulta elektrotechnická ČVUT v Praze
Technická 2, Praha 6

OBSAH

Anotace	1
Abstract	2
1. ÚVOD	3
2. SOUČASNÝ STAV, CÍLE A PŘÍNOSY PRÁCE	4
2.1 Současný stav	4
2.2 Cíle a přínosy.....	5
2.3 Výzvy do budoucnosti.....	7
3. METODY ZPRACOVÁNÍ.....	8
3.1 Modelování hysterezní smyčky	8
3.2 Odvození magnetizační charakteristiky v okamžitých hodnotách $\Phi(t)=f(i_m(t))$ z VA charakteristiky $U=f(I)$	10
3.3 Modelování transformátorů s diferenciálním popisem hysterezní smyčky	10
3.4 Analýza ferorezonančních obvodů	11
3.5 Analytická metoda analýzy ferorezonančních obvodů	11
3.6 Využití numerických metod k analýze ferorezonančních obvodů ..	13
4. VÝSLEDKY PRÁCE.....	14
4.1 Aplikace nelineárních modelů transformátorů	14
4.2 Analýza ferorezonančních obvodů	17
4.3 Vypínač s řídicí kapacitou vypíná nezatížený vývod rozvodny s měřicím transformátorem napětí (MTN).....	17
4.4 Napájení nezatíženého výkonového transformátoru z měkkého zdroje přes kapacitní systém.....	24
5. ZÁVĚR.....	28
6. LITERATURA	30
6.1 Použitá literatura	30
6.2 Použitý SW	32
6.3 Publikace autora	33

Anotace

Práce se zabývá analýzou elektromagnetických dynamických dějů vznikajících v elektrizačních sítích, které jsou způsobovány nelineární závislostí magnetické indukce na intenzitě magnetického pole u feromagnetických materiálů tvořících jádra transformátorů. Práce se zaměřuje na dva typické nelineární děje a to spínání nezatížených transformátorů v elektrizační síti a ferorezonanční děje.

Zmíněné jevy mohou být nebezpečné pro energetická zařízení nebo jejich provoz, jelikož se projevují zvýšenými hodnotami napětí a proudů a značným zkrácením jejich průběhů a je tedy důležité těmto jevům porozumět a umět je předpovídat a analyzovat.

V elektroenergetických systémech existuje velmi mnoho uspořádání, pod kterými se může ferorezonance vyskytnout. Je to dáno tím, že jsou zde hojně zastoupeny nelineární indukčnosti ve formě přenosových transformátorů, měřících transformátorů, stejně tak jako kapacit ve formě kabelů, dlouhých vedení, kapacitních transformátorů napětí, sériových či paralelních kondenzátorových baterií a řídicích kapacit vypínačů.

Základem pro analýzu ferorezonančních obvodů jsou vyhovující matematické modely nelineárních prvků. Práce v první části rozebírá problematiku modelování transformátorů v elektroenergetických systémech určených pro obvodové výpočty v nf oblasti. Přináší matematické modely transformátorů s novým matematickým modelem hysterezní smyčky včetně metodik jejich sestavení vhodné pro využití při analýze uvedených nelineárních elektromagnetických dějů.

V další části se práce zabývá rozбором a modifikací metodik analýzy ferorezonančních obvodů. Metodiky jsou založeny jednak na analytickém přístupu řešení a dále na použití numerických metod řešení. Jsou srovnány jejich výhody a nevýhody a aplikovány na dvou konkrétních případech energetických systémů velmi náchylných na vznik ferorezonance.

Cílem analýzy ferorezonančních obvodů je vymezení oblastí rizikových parametrů, při kterých může dojít k přechodu obvodu do ferorezonance a stanovení odpovídajících opatření.

Výsledky v této práci mohou přispět ke zvýšení spolehlivosti a bezpečnosti při návrzích energetických systémů a při jejich provozování s využitím moderních výpočetních prostředků.

Klíčová slova: Model transformátoru, Magnetizační charakteristika, Model hysterezní smyčky, Ferorezonance

Abstract

The thesis deals with the analysis of electromagnetic dynamic procedures resulting from electro-energetic systems which are caused by nonlinear behaviour of ferromagnetic materials creating especially cores of transformers. Temporary procedures, which occur when switching on a transformer and ferroresonance are the main focus of the analysis.

Mentioned procedures can be dangerous for energy devices and their operations as the mentioned procedures lead to increased values in voltage and current. In addition they can be responsible for a significant distortion of processes and thus it is important to understand and be able to foresee and analyze such procedures.

There are various kinds of arrangements in the electromagnetic systems where the ferroresonance can occur. It is a result of the nonlinear induction which is vastly present in the form of polyphase transformers, measuring transformers, as well as capacities in the form of cables, power cables, transformers with power capacities, serial and parallel capacitor batteries and controlling-capacity switches.

The basis for the analysis of the ferroresonance circuits are the corresponding mathematical models of the nonlinear elements. In the first part, the thesis deals with problematic considering modelling of transformers in electro-energetic systems suitable for circuit calculations in the nf area. It introduces mathematical models of transformers with the new mathematical model of hysteresis loop including methodology of their formation suitable for usage when analyzing the nonlinear electromagnetic procedures previously mentioned.

In the following part, the paper is considering analysis and modification of the methodology analyzing ferroresonance circuits. The methodologies used are on the one hand based on the analytical solution approach and secondly on the usage of numerical solution methods. Their pros and cons are compared and applied to two concrete examples of energetic systems which are liable to ferroresonance.

The main reason for analyzing ferroresonance circuits is the determination of areas of precarious parameters, where a circuit transition into ferroresonance may occur, and the assessment of corresponding precautions.

Results of the thesis may contribute to increase in reliability and safety when proposing energetic systems and when using them with exploitation of modern computing systems.

Keywords: Transformer model, Hysteresis loop model, Ferroresonance

1. Úvod

Práce se zabývá analýzou elektromagnetických dynamických dějů vznikajících v elektrizačních sítích, které jsou způsobovány nelineární závislostí magnetické indukce na intenzitě magnetického pole u feromagnetických materiálů tvořících zejm. jádra transformátorů.

Jádra transformátorů jsou navrhována tak, aby v ustálených provozních stavech pracoval transformátor v lineární části magnetizační charakteristiky. Vliv nelinearity v důsledku nasycení jádra se pak projevuje zejména při přechodných stavech způsobených např. spínacími operacemi, vznikem poruch v síti, vznikem přepětí a to zejména při provozu transformátoru naprázdno nebo s nízkým zatížením.

Práce se zaměřuje na dva typické nelineární děje a to spínání nezatížených transformátorů v elektrizační síti a ferorezonanční děje. V obou případech dochází vlivem nelinearity ke zvýšeným hodnotám proudů a napětí a značným zkreslením průběhů obvodových veličin.

Analýzu spínacích dějů lze uplatnit např. při nastavování elektrických ochran. Analýza ferorezonančních jevů je pak důležitá z pohledu bezpečnosti a spolehlivosti provozu sítě, jelikož vzniklé přepětí může být nebezpečné pro samotná energetická zařízení. Úroveň tohoto přepětí nemusí vést vždy k působení ochran a přitom může způsobovat přetížení energetického zařízení z pohledu izolačního či tepelného. Dalším nebezpečím tohoto jevu je, že se ferorezonance může vyskytnout v širokém rozsahu hodnot parametrů (na rozdíl od rezonance lineární) a také, že její vznik je velmi citlivý na počáteční podmínky.

Současná doba přináší v rámci obnovy a nové výstavby elektrizačních sítí podstatnou změnu parametrů. Například dnes nové transformátory mají nižší magnetizační ztráty dané zlepšenými vlastnostmi magnetických plechů. Vzhledem k ekonomice provozu sítě je to samozřejmě přínosné, nicméně vzhledem ke vzniku ferorezonance to představuje snížení disipativního prvku v síti a tím menší schopnosti sítě ji tlumit. Další změnu parametrů v síti představují moderní vypínače SF₆, které mají vyšší hodnoty řídicích kapacit. Zatímco vzduchové vypínače měly hodnoty řídicích kapacit v rozmezí 30 – 800 pF, olejové pak 800 – 1350 pF, tak dnes používané SF₆ mají hodnoty 1500 – 1600 pF.

Z těchto důvodů je v současné době důležité umět tyto jevy analyzovat, předpovídat jejich možný vznik a průběh a vyhodnotit jejich vliv na energetická zařízení a na přenos elektrické energie v soustavě. V praxi však není analýza možnosti vzniku ferorezonance běžná, nicméně je ji vhodné provádět při:

- Návrhu nebo obnově části energetického systému
- Změně topologie nebo struktury energetického systému
- Při rozpadu a obnově části soustavy
- Nastavování ochran
- Analýze poruch

2. Současný stav, cíle a přínosy práce

2.1 Současný stav

Schopnost analyzovat zmíněné nelineární elektromagnetické děje je stálým aktuálním tématem v rámci elektroenergetických konferencí a je řešeno v řadě prací. Je to dáno tím, že tyto děje mohou mít vliv na spolehlivost a bezpečnost provozu elektrických sítí. Jak bylo zmíněno v předchozím odstavci, důsledkem obnovy a modernizace sítí v současné době dochází ke změnám parametrů (nové transformátory – nižší magnetizační ztráty, nové vypínače – vyšší hodnoty řídicích kapacit, aj.). Právě vznik ferorezonance se vyznačuje velkou citlivostí na změnu parametrů systému a na počáteční podmínky. Například uvedení systému do ferorezonance může být nečekaně vyvoláno změnou konfigurace sítě, následkem spínacího procesu či vznikem přepětí v síti. Vznik ferorezonance je dále velmi závislý na tvaru magnetizační charakteristiky. Proto při samotné analýze je důležitý její vhodný a odpovídající model.

Současně používaný nejjednodušší matematický popis magnetizační křivky je lineární nahrazení dvěma úsečkami, jejichž směrnice vyjadřují změnu hlavní indukčnosti v nenasyceném a nasyceném stavu. Takovýto model je vhodný pro svoji jednoduchost a pro možné analytické přiblížení (rozdělením na dva lineární případy), viz [14], [16]. Je však nedostačující pro komplexní vyšetření systému.

Lepší aproximace magnetizační charakteristiky se dosahuje použitím funkce ve tvaru lichého polynomu (z důvodu symetrie vůči počátku souřadnic). Tato náhrada magnetizační křivky již přesněji vystihuje chování nelineárního prvku. Polynomem aproximovaná křivka určuje závislost jednoznačně, tzn. neuvažuje hysterezi materiálu. Proto je zde nutné k vyjádření ztrát ve feromagnetiku připojit paralelně odpor R_{Fe} . Aproximace polynomem lichého řádu se hojně využívá, dokladem jsou publikace [17], [4].

Jako nejkomplexnější se používají modely hysterezních smyček – známé jsou zejména Preisachův a Jiles-Athertonův model [15]. Preisachův model hystereze je vytvářen pomocí superpozice releových operátorů. Naproti tomu

Jiles-Athertonův model hystereze je založený na fyzikálním popisu pochodů při magnetizaci feromagnetického materiálu.

Modely magnetizačních charakteristik se pak používají k sestrojení celého modelu transformátoru. U komerčních *SW* mají modely transformátorů různou úroveň propracovanosti. Magnetizační charakteristika bývá modelována jako jednoznačná funkce a např. třífázový transformátor jádrového typu je modelován jako tři jednofázové jednotky.

Tato práce přináší inovativní matematické modely transformátorů se zaměřením na popis magnetizační charakteristiky v diferenciálním tvaru včetně metodik jejich sestrojení, kdy nejsme omezeni magnetickými případně elektrickými vazbami. Práce přináší nový přístup k řešení dané problematiky, kdy nelineární systém obsahuje zcela nový model hysterezní smyčky v diferenciálním tvaru, a použitá matematická řešení jsou stabilní a plně postihují vliv při malých změnách počátečních podmínek.

Dále se práce zabývá metodami analýzy ferorezonančních obvodů. Výsledkem takovéto analýzy je vymezení nebezpečných oblastí rizikových parametrů pro vznik ferorezonance. K tomuto účelu se používají dvě hlavní techniky. Jedna je založena na analytickém přístupu a využití metody harmonické rovnováhy [4]. Druhá je založena na simulaci v časové oblasti s použitím numerických metod výpočtu. Druhá metoda ve formě parametrických výpočtů je používána také komerčními programy jako jsou např. EMTP. Mimo zmíněné metody analýzy ferorezonančního obvodu se také dnes používají jednodušší graficko-početní metody [19].

Práce přináší rozbor, modifikaci a nové přístupy ke dvěma metodám analýzy ferorezonančních obvodů s využitím nových modelů transformátorů. První metoda je zaměřená na analytický přístup, druhá na numerický. Zmíněné metodiky jsou modifikovány a jsou vypracovány vlastní nové algoritmy s použitím *SW Matlab* a *SW Mathematica*. Aplikace je pak provedena na dvou případech elektroenergetických systémů citlivých na vznik ferorezonance.

2.2 Cíle a přínosy

V první části má práce za cíl rozebrat problematiku modelování transformátorů v elektroenergetických systémech pro obvodové výpočty v *nf* oblasti.

Práce přináší nové přístupy k modelování transformátorů a nové modely a metodiky pro sestrojení magnetizačních charakteristik, které splňují předpoklady pro dobrou aplikovatelnost ve výpočtech. To jest:

- Model musí být rozumně složitý (pro popis a sestrojení)

- Pro model musí existovat vhodné metodiky jeho sestavení
- Model nesmí být výpočtově náročný
- Model musí být dostatečně přesný

Práce rozebírá modelování třífázových transformátorů s různým typem magnetického obvodu, kdy je nutné doplnit model o popis magnetických vazeb daných konstrukcí jádra transformátoru.

Modely transformátorů aplikuje na konkrétním praktickém případě, kdy je analyzován zapínací děj blokového transformátoru v elektrárně Temelín z rezervního napájení 110 kV přes vlastní spotřebu. Modely jednofázových transformátorů jsou zde použity pro modelování přístrojových transformátorů proudu (PTP) a modely třífázových transformátorů pro modely blokového, odbočkového a rezervního transformátoru.

V další části práce přináší detailní popis jevu ferorezonance, příčiny jeho vzniku, hlavní charakteristiky jako je citlivost na počáteční podmínky a na změnu hodnot parametrů, definuje módy ferorezonance a také uvádí typické konfigurace energetických systémů náchylných na vznik ferorezonance.

Cílem práce je rozbor, modifikace a nový přístup k metodikám pro analýzu ferorezonančních obvodů v energetických systémech s využitím nových modelů transformátorů. Metodiky jsou založeny jednak na analytickém přístupu a dále na použití numerických metod řešení diferenciálních rovnic. Jsou srovnány jejich výhody a nevýhody a aplikovány na dvou konkrétních případech. Jedná se o:

1. Vypínání nezatíženého vývodu linky v rozvodně 110 kV s měřícím transformátorem napětí. Toto představuje jednu z častých a typických elektroenergetických konfigurací citlivých na vznik ferorezonance, která vede na sériový ferorezonanční obvod.
2. Dále se jedná o analýzu případu napájení nezatíženého blokového transformátoru elektrárny z měkkého zdroje (generátor vodní elektrárny) přes síť 400 kV, což vede na paralelní ferorezonanční obvod. Tento případ reprezentuje stav při najíždění systémové elektrárny z nezávislého zdroje např. po kolapsu sítě (tzv. Blackoutu). Takovéto případy najíždění jsou v praxi v současné době analyzovány a zkoušeny a to z důvodu vyšších nároků na přenosovou soustavu (rozmach obnovitelných zdrojů energie) a v poslední době zkušební se vznikem reálných případů „Blackoutu“ ve světě (USA a

Kanada 2003, Indonésie 2005, Kolumbie 2007) a také v Evropě (Itálie 2003, Dánsko a Švédsko 2003, Řecko 2004).

Oba případy jsou velmi nebezpečné z důvodu vzniku značných přepětí, které mohou mít za následek poškození energetických zařízení. Cílem analýzy ferorezonančních obvodů je určení oblastí rizikových parametrů, při kterých může dojít k přechodu obvodu do ferorezonance a návrh možných opatření proti vzniku ferorezonance.

V rámci práce byla vytvořena řada programů v *SW Matlab* a *SW Mathematica*, jednak pro účely návrhu nových modelů hysteretických smyček a dále pro zpracování algoritmů metodik pro analýzu ferorezonančních obvodů. Modely transformátoru byly dále aplikovány do prostředí knihovny *SimPowerSystem*, což je účelově zaměřená knihovna pro elektroenergetické výpočty v prostředí *SW Matlab-Simulink*, která umožňuje práci s hotovými bloky prvků elektrizační sítě.

Je předpoklad, že práce bude sloužit k upozornění a zdůraznění problematiky ferorezonance a jevů v nelineárních obvodech elektroenergetických systémů. Důležitost této práce vystupuje do popředí díky potřebě určení nebezpečných stavů soustavy v mimořádných stavech, kdy je systém náchylný ke vzniku ferorezonančních jevů a následných kolapsových stavů vedoucích k Blackoutům.

Výsledky v této práci tak mohou dále přispět ke zvýšení spolehlivosti a bezpečnosti při návrzích energetických systémů a při jejich provozování s využitím moderních výpočetních prostředků.

2.3 Výzvy do budoucnosti

Uvedená řešení nelineárních matematických modelů v budoucnosti přinese možnost spolehlivějšího chránění a řízení elektrizačního systému. Zároveň modely mohou sloužit k zlepšení návrhových postupů elektrických strojů s feromagnetiky a tím úspory materiálu a energie. Navržené dílčí postupy bude vhodné zabudovat do obecných monitorovacích a řídicích systému v propojených elektrizačních soustavách.

3. Metody zpracování

3.1 Modelování hysterezní smyčky

Práce přináší nový matematický model hysterezní smyčky aplikovaný v modelech transformátorů pro použití v obvodových výpočtech (nf oblast). Model je založen na diferenciálním popisu s uvažováním prvních derivací obvodových veličin $F(i(t), i'(t), \Phi(t), \Phi'(t)) = 0$, které se při řešení elektrických obvodů obvykle vyskytují. Konkrétní podoba jednoho z modelů, viz (1).

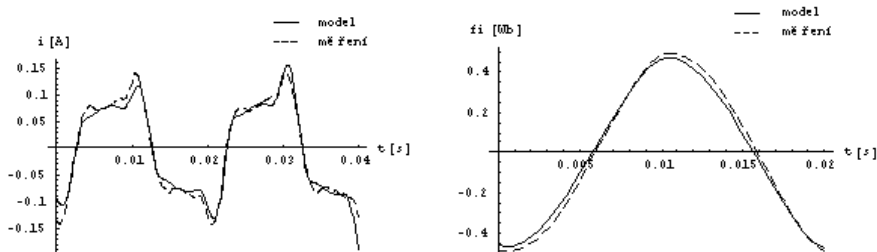
$$\Phi'(t) = p_1 \cdot \Phi(t) + \frac{p_2 \cdot i(t)}{1 + p_4 \cdot (\Phi(t)^2)^{p_5}} + \frac{p_3 \cdot i'(t)}{1 + p_6 \cdot (e^{\Phi(t)^2 \cdot p_7}) + p_8 \cdot (i(t)^2)^{p_9}} \quad (1)$$

Dále práce popisuje metodiky ke stanovení parametrů modelu ($p1$ až $p9$) a to jednak z přímého měření na transformátoru (tzv. přímá metoda), tak i ze štítkových parametrů transformátorů a znalosti bezetrátové magnetizační charakteristiky (tzv. nepřímá metoda).

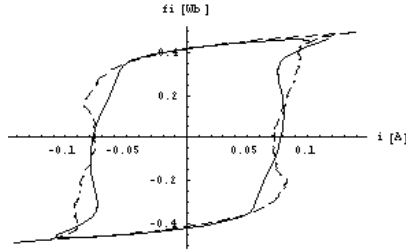
Přímá metoda je založena na přímém měření časových průběhů obvodových veličin $u(t)$, $i(t)$ v přesyceném stavu jádra transformátoru. Z těch jsou následně výpočtem stanoveny zbylé veličiny vyskytující se v modelu $\Phi(t)$, $i'(t)$. Pomocí aproximační metody nejmenších čtverců jsou poté stanoveny parametry. Příklad modelu hysterezní smyčky pro MTN 6kV/100V určený přímoou metodou, viz (2).

$$\Phi'(t) = -14.7 \cdot \Phi(t) + \frac{1765.5 \cdot i(t)}{1 + 8156.7 \cdot (\Phi(t)^2)^{4.8}} + \frac{0.693 \cdot i'(t)}{1 - 5.29(i(t)^2)^{2.85} + 756.39(\Phi(t)^2)^{5.4}} \quad (2)$$

Tento model byl verifikován s reálným transformátorem při měření naprázdno, při zatížení transformátoru, při měření se ss složkou a také v rámci zapojení do sériového ferorezonančního obvodu. Obr. 1 ukazuje některé výsledky porovnání modelu s měřením.



Obr. 1 Časové průběhy mag. proudu a mag. toku; model (plně), měření (čárkovaně)



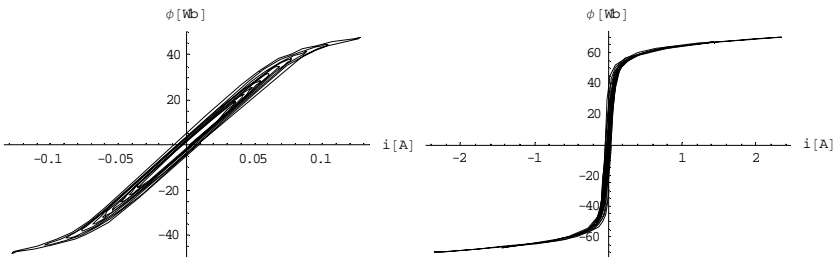
Obr. 2 Vývoj hysterezní smyčky; model (plně), měření (čárkovaně)

Nepřímá metoda je založena na znalosti bezztrátové magnetizační charakteristiky (často uváděná ve tvaru lichého polynomu $i(\Phi) = a_1\Phi + a_n\Phi^n$ a ztrát naprázdno P_0). Principem je “rozšíření“ bezztrátové magnetizační charakteristiky přičtením určité funkce závislé na derivaci magnetického toku tak, aby ztrátový výkon odpovídal ztrátám naprázdno.

Nepřímou metodou bylo sestrojeno několik diferenciálních modelů hysterezních smyček použitých k sestrojení jednofázových a třífázových modelů transformátorů. Některé byly dále využity pro analýzu energetických systémů náchylných ke vzniku ferorezonance. Příklad modelu hysterezní smyčky MTN 10000/ $\sqrt{3}/100/\sqrt{3}$ V určené ze znalosti bezztrátové mag. charakteristiky $i(\Phi) = 0.0019\Phi + 1.2 \times 10^{-20}\Phi^{11}$ a ztrát naprázdno $P_0=6$ W je dán rovnicí (3).

$$\Phi'(t) = -26.8 \cdot \Phi(t) + \frac{164951 \cdot i(t) + 491.4 \cdot i'(t) - 257.4 \cdot \Phi(t)}{1 + 1.19 \times 10^{-51} ((-82.7 + \Phi(t))^2)^{12.17} + 1.19 \times 10^{-51} ((82.7 + \Phi(t))^2)^{12.17}} \quad (3)$$

Obr. 3 ukazuje vývoj modelu hysterezní smyčky při vzrůstající amplitudě napětí přiloženého zdroje.



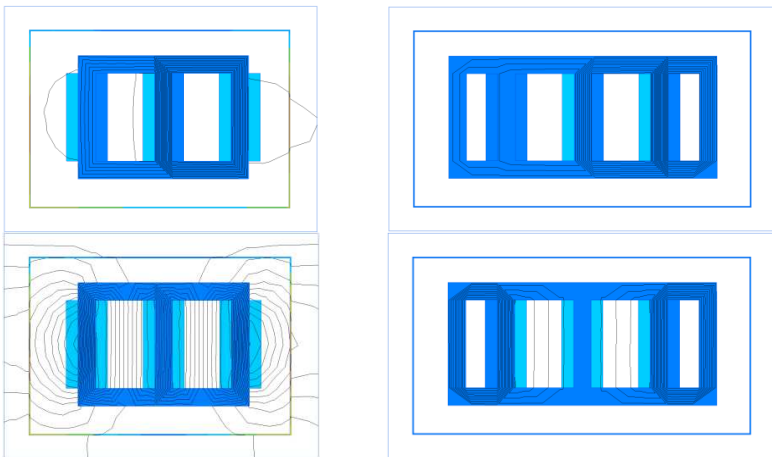
Obr. 3 Vývoj modelu hysterezní smyčky při vzrůstající amplitudě napětí přiloženého zdroje

3.2 Odvození magnetizační charakteristiky v okamžitých hodnotách $\Phi(t)=f(i_m(t))$ z VA charakteristiky $U=f(I)$

Často je výrobci transformátorů udávána magnetizační charakteristika jako závislost efektivních hodnot $U=f(I)$ (VA charakteristika). Potřebná magnetizační charakteristika aplikovatelná do modelu musí však vyjadřovat změnu magnetického toku na magnetizačním proudu v okamžitých hodnotách $\Phi(t)$, $i_m(t)$. Práce proto přichází s metodikou na sestrojení magnetizační charakteristiky v okamžitých hodnotách z dané VA charakteristiky $U=f(I)$.

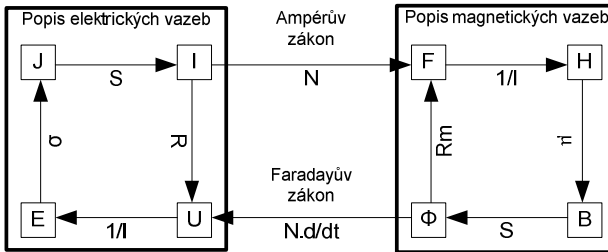
3.3 Modelování transformátorů s diferenciálním popisem hysterezní smyčky

Vypracované modely hysterezních smyček byly aplikovány do modelů jednofázových a třífázových transformátorů. Modely třífázových transformátorů je nutné rozlišovat podle magnetické vazby mezi jednotlivými fázemi. Z tohoto pohledu je lze rozdělit na dvě skupiny. První skupina představuje transformátory s volným uzavíráním magnetických toků. Jsou to typy transformátorů, u kterých konstrukce magnetického obvodu umožňuje uzavírání toků sousledné, zpětné a nulové složky a také konfázních harmonických po týchž cestách (plášťový typ, tři jednofázové jednotky, ...). Druhou skupinou jsou transformátory s vázaným uzavíráním mag. toků, kdy se magnetické toky nulové složky a tím i konfázních harmonických musejí uzavírat mezi spojkami vzduchem nebo olejem přes nádobu, jelikož jim to jinak konstrukce jádra nedovoluje. Obr. 4 ukazuje rozdíly v rozložení magnetického pole při buzení první harmonickou proudem (také souslednou složkou) a při buzení konfázní harmonickou (také nulovou složkou) u dvou typů transformátorů.



Obr. 4 Rozložení mag. pole v jádru transformátoru; jádrový typ (vlevo), plášťový typ (vpravo) buzení první harmonickou proudem (nahore), buzení konfázní harmonickou proudem (dole)

Z výše uvedeného vyplývá, že u některých typů třífázových transformátorů musíme respektovat magnetické vazby jádra a celkový matematický popis o ně doplnit. Svázání rovnic popisující elektrický a magnetický obvod nám umožňuje Ampérův a Faradayův zákon, jak je ukázáno na Obr. 5.



Obr. 5 Svázání rovnic popisující elektrické a magnetické vazby

3.4 Analýza ferorezonančních obvodů

Práce se dále zabývá analýzou energetických systémů náchylných na vznik ferorezonance. K těmto účelům jsou využívány zde popisované modely transformátorů.

Práce přináší rozbor a modifikaci metodik pro analýzu ferorezonančních obvodů, které jsou založeny jednak na analytickém přístupu, tak s použitím numerických metod výpočtu. Jsou vypracovány nové algoritmy s použitím *SW Matlab* a *SW Mathematica* a u obou přístupů jsou srovnány jejich výhody a nevýhody a aplikovány na dvou typických konfiguracích elektroenergetických systémů citlivých na vznik ferorezonance.

Cílem analýzy je určení oblastí rizikových parametrů, při kterých může dojít k přechodu systému do ferorezonance.

3.5 Analytická metoda analýzy ferorezonančních obvodů

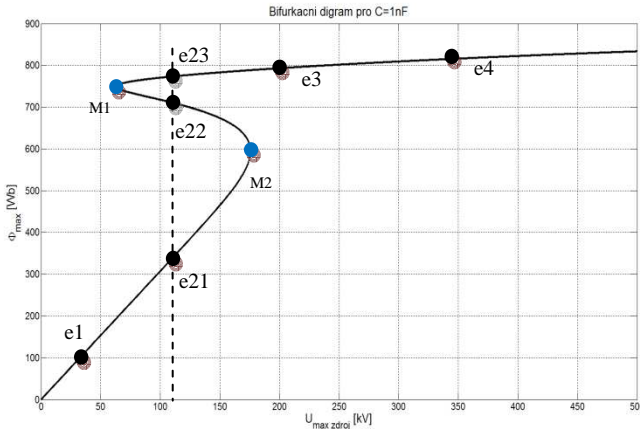
Tato metoda je dobře aplikovatelná při zjednodušení celého systému na jednoduchý ferorezonanční obvod. Metoda je založena na předpokladu řešení pro základní harmonickou magnetického toku $\Phi(t)$ ve tvaru (4).

$$\Phi(t) = a \cdot \cos(\omega t) + b \cdot \sin(\omega t) = \Phi_{max} \cdot \cos(\omega t + \varphi) \quad (4)$$

Dosažením tohoto řešení do nelineární diferenciální rovnice pro $\Phi(t)$ popisující ferorezonanční obvod a s použitím metody harmonické rovnováhy lze nalézt řešení pro základní harmonickou a určit tak možnost výskytu základního ferorezonančního módu.

Z řešení dostáváme hodnoty ustálených stavů, nebo-li stacionárních bodů či eqvilibrií systému. Nachází-li se systém v eqvilibriu znamená to, že stavové proměnné jsou konstantní a systém se v čase nikam nevyvíjí. Eqvilibrií mohou mít nelineární systémy více na rozdíl od systémů lineárních. Výpočtem

eqvilibríí v závislosti na hodnotě parametru obvodu lze pak vykreslit bifurkační diagramy, např. v závislosti $\Phi_{max} = f(U_{max\ zdroj})$, jak ukazuje Obr. 6.



Obr. 6 Bifurkační diagram $\Phi_{max} = f(U_{max\ zdroj})$

Vidíme, že systém mění počet a hodnotu eqvilibríí v závislosti na změně parametru systému a v tzv. limitních bodech $M1$, $M2$ dochází ke skokové změně z jednoho ustáleného stavu řešení do jiného.

V rámci analýzy je dále nutné vyšetřit chování systému v okolí daného eqvilibría a zjištění, zda je systém v tomto okolí stabilní či nestabilní. K tomu lze použít metodu pomalu měnící se amplitudy řešení, kdy uvažujeme řešení s časově proměnnými koeficienty $a(t)$, $b(t)$ ve tvaru:

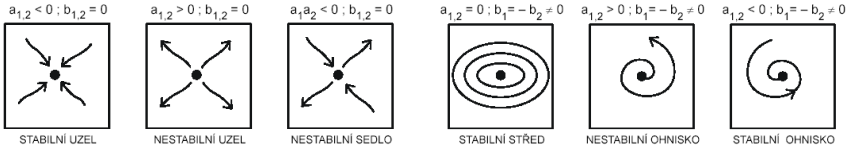
$$\Phi(t) = a(t).cos(\omega t) + b(t).sin(\omega t) = \Phi_{max}(t).cos(\omega t + \varphi(t)) \quad (5)$$

Toto řešení opět dosadíme do rovnice pro $\Phi(t)$ popisující ferorezonanční obvod a porovnáním koeficientů u členů $sinu$ a $cosinu$ základní harmonické vyjádříme první časové derivace $a'(t)=A(a,b)$, $b'(t)=B(a,b)$.

Dostáváme tak popis dynamického systému pro $a'(t)$, $b'(t)$. Položíme-li tyto první derivace rovny nule, dostáváme opět stacionární body řešení. Stabilitu eqvilibría i určíme z vyšetření chování systému v jeho blízkém okolí tak, že zde systém linearizujeme (provedeme Taylorův rozvoj do prvního řádu) a následně sestavíme Jakobiho matici (6) (matici stability).

$$J = \begin{bmatrix} \frac{\partial A(a_i, b_i)}{\partial a} & \frac{\partial A(a_i, b_i)}{\partial b} \\ \frac{\partial B(a_i, b_i)}{\partial a} & \frac{\partial B(a_i, b_i)}{\partial b} \end{bmatrix} \quad (6)$$

Stabilita vlastního eqvilibria i je pak určena polohou vlastních čísel Jakobiho matice v komplexní rovině. Obr. 7 ukazuje typy možných eqvilibríí pro případ Jakobiho matice velikosti 2×2 , která má dvě vlastní čísla $\lambda_1 = a_1 + ib_1$ a $\lambda_2 = a_2 + ib_2$.



Obr. 7 Typy stacionárních bodů (eqvilibríí) pro případ Jakobiho matice velikosti 2×2

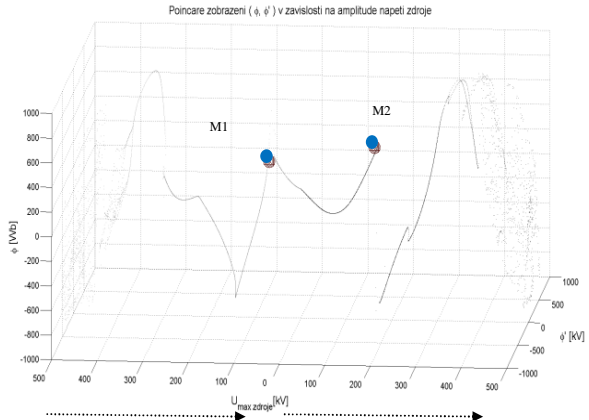
Cílem analýzy ferorezonančních obvodů je vymezení oblasti rizikových parametrů obvodu, kdy systém může přejít do ferorezonančního ustáleného stavu. Zobrazením limitních bodů $M1$ a $M2$ do roviny sledovaných parametrů (např. $[C, U_{max\ zdroj}]$) dostáváme křivky, které vymezují oblasti v závislosti na počtu a charakteru eqvilibríí a tím určují rizikovost dané oblasti. Při znalosti počáteční podmínky lze analýzu zpřesnit v té oblasti, kde je systém na ní citlivý. Uvedenou metodou lze efektivně dostat řešení pro základní, event. subharmonický ferorezonanční mód.

3.6 Využití numerických metod k analýze ferorezonančních obvodů

Numerické metody výpočtu v časové oblasti lze s výhodou využít pro analýzu ferorezonančních obvodů. Lze navíc takto získat oproti analytické metodě přesné časové průběhy veličin a také zkonstruovat bifurkační diagramy, které obsáhnou přechody systému i do jiných ferorezonančních módů jako jsou kvaziperiodický či chaotický. K interpretaci výsledků se zde používá např. Poincarého zobrazení, zobrazení ve stavovém prostoru, aj.

Přesnost výsledků zde závisí jednak na použité numerické metodě tak na stanovení tolerance chyby metody a délky časového kroku, což je nepřímou úměrnou době výpočtu.

K nalezení limitních bodů $M1$ a $M2$ lze použít výpočet s postupnou změnou

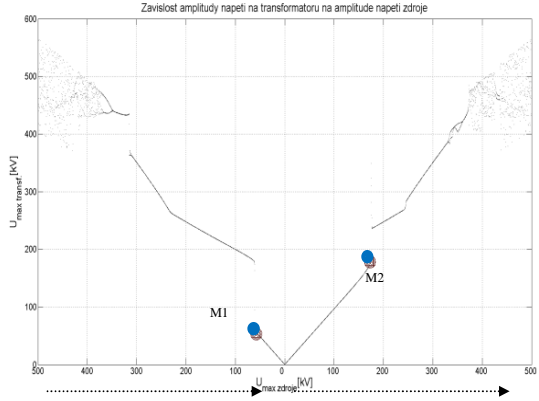


Obr. 8 Poincarého zobrazení $[\Phi, \Phi'] = f(U_{max\ zdroj})$

parametru obvodu a pro zobrazení využít Poincarého zobrazení, viz Obr. 8. Amplituda napětí zdroje je pomalu proměnná od 0 kV do maximální hodnoty a poté zpět k nule.

Z praktického pohledu je kromě limitních bodů také důležitá znalost maximální úrovně vzniklého přepětí na transformátoru, které tak vyjadřuje přímou

míru nebezpečnosti s ohledem na energetické zařízení. Proto práce přichází s novým zobrazením dle Obr. 9, kde se vynáší max. hodnota napětí na transformátoru v závislosti na parametru obvodu (zde $U_{max\ zdroj}$). S uvážením celkového sledovaného vektoru kapacit C lze stejně jako v předchozí metodě vymezit rizikové oblasti parametrů v rovině $[C, U_{max\ zdroj}]$ a pomocí Poincarého zobrazení definovat také vliv na počáteční podmínky.



Obr. 9 Zobrazení $U_{max\ transf} = f(U_{max\ zdroj})$

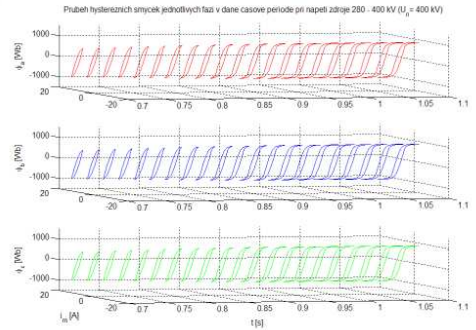
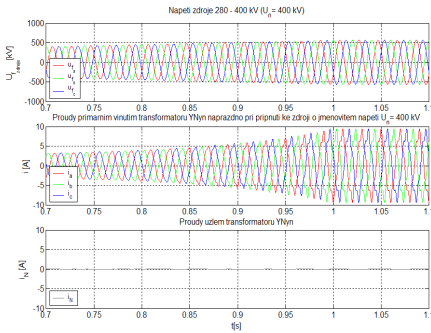
4. Výsledky práce

4.1 Aplikace nelineárních modelů transformátorů

Jedním z výsledků práce je nový model hysterezní smyčky spolu s metodikami na jeho zkonstruování uvedené v předchozí kapitole. S využitím tohoto modelu hysterezní smyčky byly dále vytvořeny modely jednofázových a třífázových transformátorů.

Modely jednofázových transformátorů jsou použity pro modelování přístrojových transformátorů napětí a proudů. Modely třífázových transformátorů jsou používány pro popis výkonových transformátorů. Obr. 10 ukazuje časové průběhy obvodových veličin a vývoj modelu hysterezní smyčky při připojení třífázového transformátoru jádrového typu YNy naprázdno ke zdroji napětí s lineárně rostoucí amplitudou do jmenovité hodnoty.

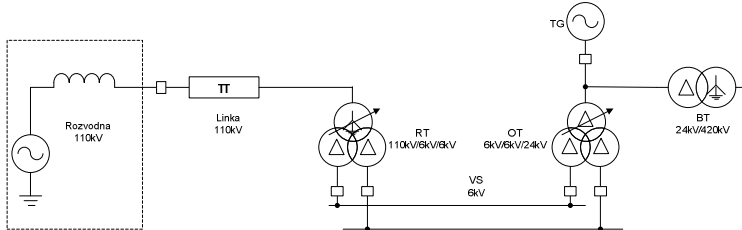
Modely byly použity při zpracovávání studie, která analyzovala přechodný děj připnutí nezatíženého blokového transformátoru (BT) v elektrárně. Důvodem zpracování studie bylo, že v praxi docházelo k nežádoucímu působení rozdílové ochrany transformátoru. Napájení BT bylo realizováno z rozvodny 110 kV přes rezervní transformátor 110kV/6kV (RT), vlastní spotřebu 6 kV (VS) a odbočkový transformátor 6kV/24kV (OT). Spínání se uskutečnilo vypínačem na VS 6 kV, jednopólové schéma je ukázáno na Obr. 11.



Obr. 10 Časové průběhy obvodových veličin (vlevo) a vývoj modelu hysterézní smyčky (vpravo) – třífázový transformátor jádrového typu YNyn naprázdno

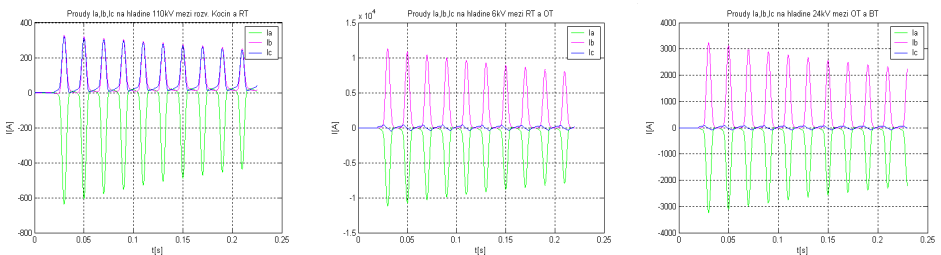
V rámci analýzy přechodného děje bylo řešeno:

1. Charakter a velikost zapínacího proudu v obvodu při připínání BT.
2. Vliv remanentního toku BT a vliv okamžiku sepnutí na velikost zapínacího proudu.
3. Přenos zapínacího proudu přes přístrojové transformátory proudu (PTP) vzhledem k rozdílovým ochranám RT a OT.



Obr. 11 Jednopolové schéma napájecí cesty BT v elektrárně

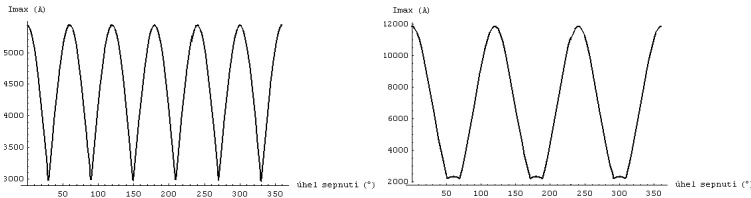
Ad 1) Obr. 12 ukazuje detaily zapínacích proudů na jednotlivých napěťových hladinách 110 kV, 6 kV a 24 kV.



Obr. 12 Detail zapínacích proudů na napěťových hladinách 110 kV, 6 kV, 24 kV

Ad 2) Velikost zapínacího proudu je závislá jednak na okamžiku sepnutí (třípólové spínání) a na existenci zbytkového (remanentního) toku.

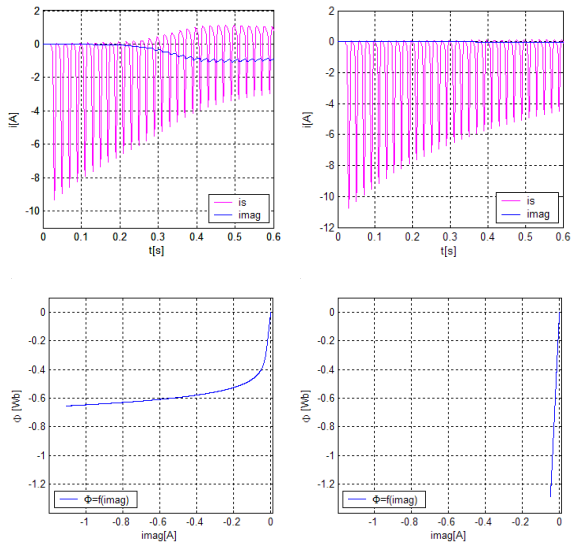
Celková závislost maximální hodnoty proudu na úhlu (okamžiku) sepnutí bez uvažování remanence a s uvažováním remanence +200 Wb je na Obr. 13. Bez uvažování remanence je závislost periodická po 60° avšak maximální dosažená hodnota proudu je přibližně poloviční oproti maximální hodnotě při uvažování remanence, kde se však maximum vyskytuje až po 120° .



Obr. 13 Závislost maximální hodnoty proudu na úhlu sepnutí, bez uvažování remanence (vlevo), s uvažováním remanence +200 Wb (vpravo)

Ad 3) Zapínací proud blokového transformátoru je charakteristický vysokou stejnosměrnou složkou a vysokými amplitudami. To může způsobit přesycení PTP a zkreslení sekundárního proudu vyhodnocovaného ochranou. Pomocí zkonstruovaných modelů PTP byl nasimulován přenos zapínacího proudu přes PTP. Přepočtený

proud na sekundární stranu a magnetizační proud PTP na hladině 6 kV VS je na Obr. 14 vlevo a na hladině 24 kV je na Obr. 14 vpravo. Obr. 14 dole ukazuje průběh magnetizačních charakteristik, z kterého vidíme, že v případě PTP na 6 kV došlo k přesycení jádra na rozdíl od PTP na hladině 24 kV, kde k přesycení jádra nedošlo.



Obr. 14 Proudů přepočtené na sekundární stranu PTP (nahore), i_s – sekundární proud, i_{mag} – magnetizační proud a průběh mag. charakteristiky PTP (dole), na hladině 6 kV (vlevo), na hladině 24 kV (vpravo)

4.2 Analýza ferorezonančních obvodů

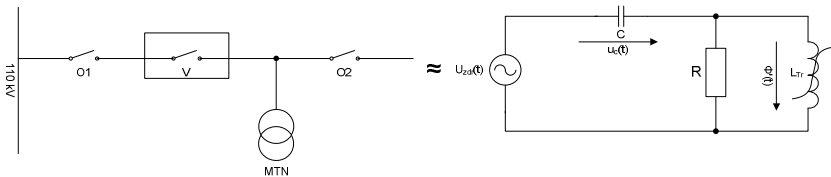
Popsané metody pro analýzu ferorezonančních obvodů uvedených v předchozí kapitole byly aplikovány na dva typické energetické systémy náchylné na vznik ferorezonance:

1. Vypínač s řídicí kapacitou vypíná nezatížený vývod rozvodny s MTN
2. Z měkkého zdroje je přes kapacitní systém napájen nezatížený výkonový transformátor

Cílem analýzy je určení nebezpečných oblastí parametrů systému.

4.3 Vypínač s řídicí kapacitou vypíná nezatížený vývod rozvodny s měřícím transformátorem napětí (MTN)

Na Obr. 15 je uspořádání pole vedení v rozvodně 110 kV s MTN a zjednodušené náhradní elektrické schéma při sepnutém odpojovači O1 a vypnutém odpojovači O2 a vypínači V.



Obr. 15 Pole vedení v rozvodně 110 kV s MTN a zjednodušené náhradní schéma

Hlavní prvky sériového ferorezonančního obvodu zde tvoří nezatížený napěťový transformátor a řídicí kapacita vypínače.

MTN $145000/\sqrt{3}\text{V}/100/\sqrt{3}\text{V}$ modelujeme:

- a) Jednoznačnou magnetizační křivkou s paralelním odporem R_{Fe} :

$$i(\Phi) = 1.3x10^{-8} \Phi + 3.9x10^{-33} \Phi^{11}, R_{Fe} = 12x10^6 \Omega$$

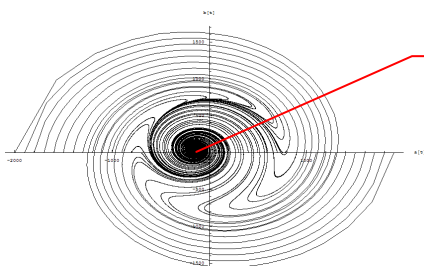
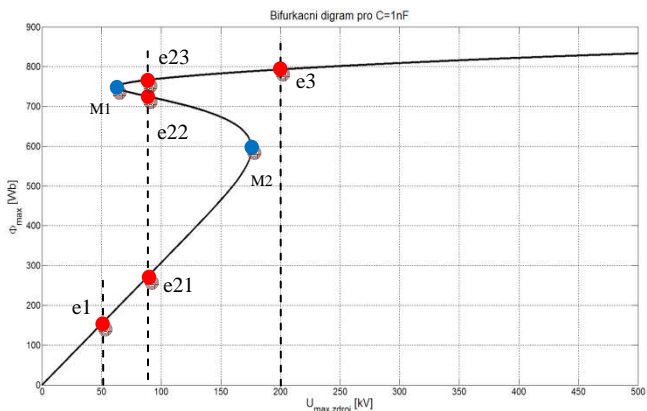
- b) Diferenciálním popisem hysterezní smyčky ve tvaru:

$$\Phi'(t) = p_1 \cdot \Phi(t) + \frac{p_2 \cdot i(t) + p_3 \cdot i'(t) + p_4 \cdot \Phi(t)}{1 - p_5 \cdot \left((p_6 + \Phi(t))^2 \right)^{p7} - p_8 \cdot \left((p_9 + \Phi(t))^2 \right)^{p10}}$$

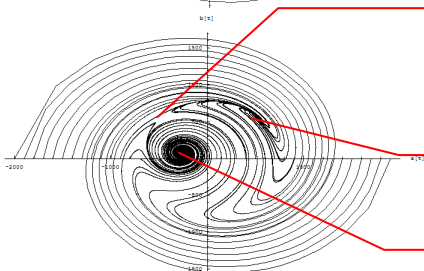
Rozsah řídicích kapacit vypínače uvažujeme $C=100 - 5000 \text{ pF}$.

Analýza obvodu s použitím analytické metody

Předpokládáním řešení ve tvaru $\Phi(t)=a \cdot \cos(\omega t)+b \cdot \sin(\omega t)$ pro základní harmonickou byly stanoveny hodnoty eqvilibríí v závislosti na proměnné amplitudě napětí zdroje a sestrojen bifurkační diagram s limitními body $M1$ a $M2$ viz Obr. 16 (zde pro hodnotu řídicí kapacity $C=1nF$). Dále bylo vyšetřeno chování v okolí eqvilibríí sestavením Jakobioho matice a určení vlastních čísel. Obr. 16 ukazuje fázovou rovinu $[a(t), b(t)]$ s polohou eqvilibríí ve třech charakteristických oblastech vymezených limitními body $M1$ a $M2$.

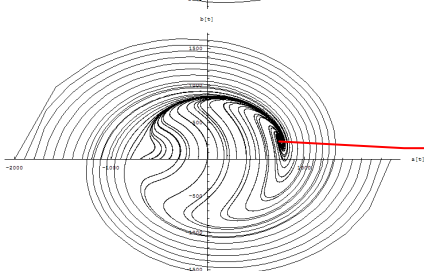


stabilní bod – “normální” stav
 $e1 = [a, b] = [-148.5, 39.7]$
 $\lambda_{1e1} = [-20.642 \pm 159.82i]$



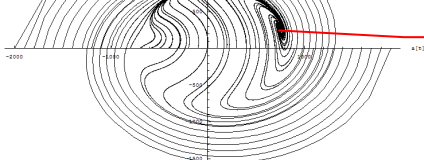
sedlový bod

$e22 = [a, b] = [-533.55, 489.845]$
 $\lambda_{1e22} = [-349.199]$, $\mathbf{v1} = (-0.86, -0.51)$
 $\lambda_{2e22} = [132.437]$, $\mathbf{v2} = (-0.55, -0.83)$



stabilní bod – ferorezonanční stav
 $e23 = [a, b] = [535.313, 549.645]$
 $\lambda_{3e23} = [-176.721 \pm 227.464i]$

stabilní bod – “normální” stav
 $e21 = [a, b] = [-148.5, 39.7]$
 $\lambda_{1e21} = [-20.642 \pm 159.82i]$



stabilní bod – ferorezonanční stav
 $e3 = [a, b] = [767.4, 271.5]$
 $\lambda_{3e3} = [-238.175 \pm 530.216i]$

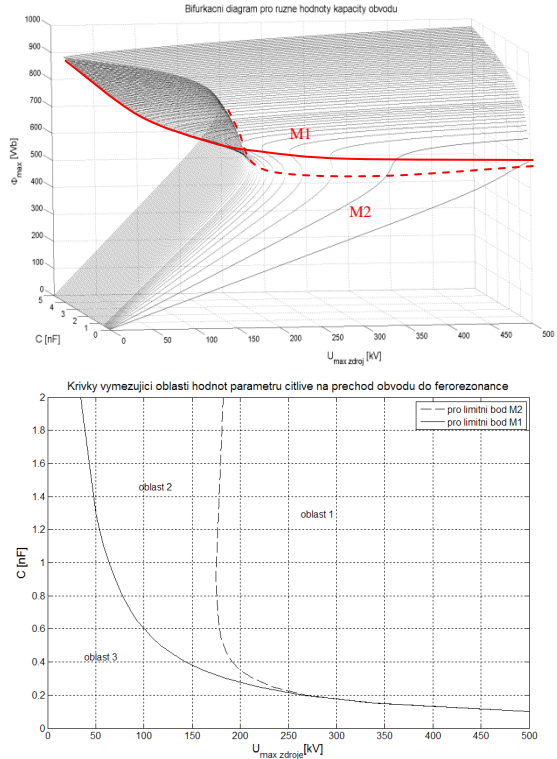
Obr. 16 Bifurkační digram (nahore), fázové roviny s polohou eqvilibrií vyznačených v bifurkačním digramu (dole)

Bifurkační diagramy pro celý námi uvažovaný vektor kapacit C a limitní body jsou znázorněny na Obr. 17 - nahoře. Vynesením limitních bodů do roviny $[C, U_{max\ zdroj}]$ dostáváme tři charakteristické oblasti, viz Obr. 17 - dole.

Oblast 1 - existence jednoho stabilního eqvilibria odpovídající základnímu ferorezonančnímu stavu.

Oblast 2- existence dvou stabilních eqvilibrií. V jakém se systém ustálí je závislé na počáteční podmínce.

Oblast 3- jedno stabilní eqvilibrium odpovídající „normálnímu“ lineárnímu stavu.

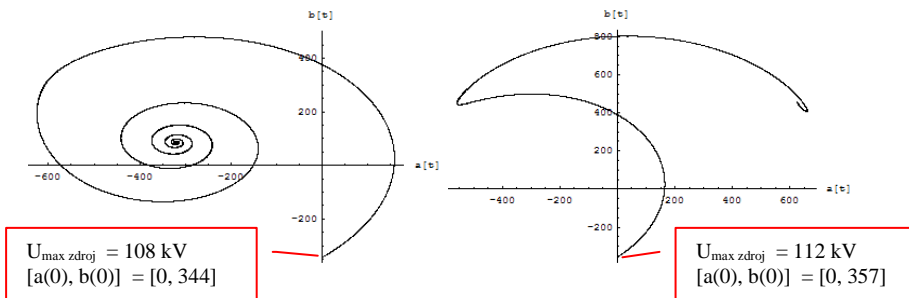


**Obr. 17 Bifurkační diagramy a limitní body $M1$ a $M2$ pro vektor kapacit C (nahore),
Křivky vymezující oblasti dané charakterem eqvilibrií (dole)**

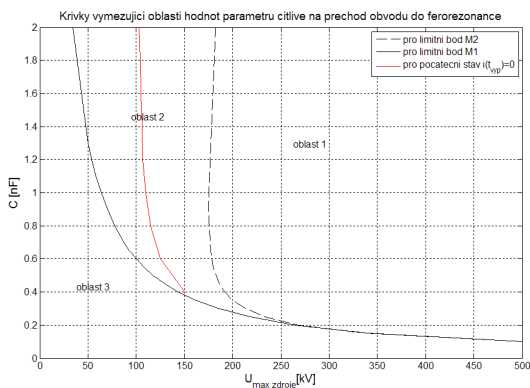
Detailní analýza v oblasti 2 – citlivost na počáteční podmínky

Počáteční podmínka je definována vypnutím vypínače v nule proudu $i(t_{vyp}) = 0$. S uvažováním této podmínky lze nalézt limitní hodnotu parametru amplitudy napětí zdroje, kdy se systém nachází na hranici počátečních podmínek, z které konverguje buď do jednoho, nebo do druhého ustáleného stavu. Obr. 18 ukazuje příklad vývoje systému ze dvou počátečních podmínek v těsné blízkosti hranice. Pro první případ se systém ustálí v „normálním“ stavu, ale již při mírné změně páteční podmínky se systém ustálí ve stabilním ferorezonančním stavu.

Určením těchto limitních počátečních stavů pro vektor kapacit C , lze vymezit hranici v oblasti 2, viz Obr. 19 - červená křivka, čímž dojde k zpřesnění analýzy kritických parametrů.



Obr. 18 Vývoj systému ve fázové rovině ze dvou blízkých počátečních podmínek, systém se ustálí v „normálním“ stavu (vlevo), systém se ustálí ve ferorezonančním stavu (vpravo)

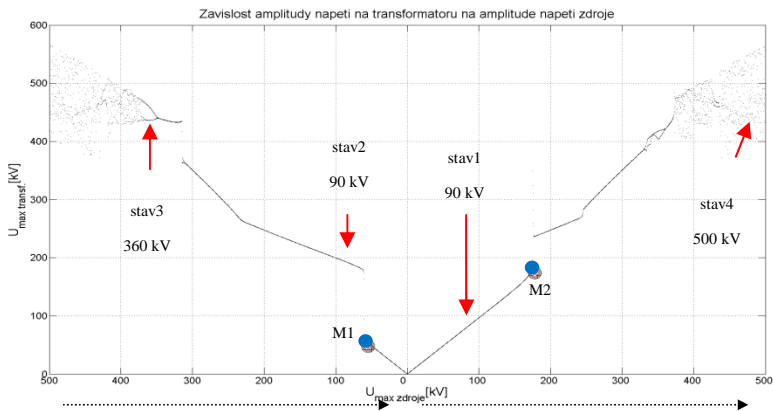


Obr. 19 Vymezení hranice v oblasti 2 při definování počáteční podmínky

Analýza obvodu s použitím numerických metod

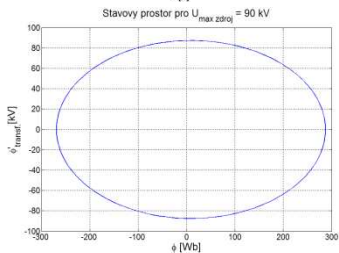
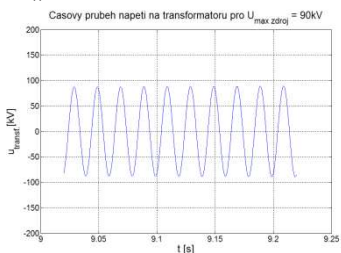
Stejný obvod byl analyzován s využitím numerických metod řešení diferenciálních rovnic. Výsledkem je zobrazení max. hodnoty napětí na transformátoru při změně amplitudy napětí zdroje (bráno jednou za 2π), viz Obr. 20 (pro hodnotu řídicí kapacity $C=1nF$). Z tohoto zobrazení lze odečíst limitní body *M1* a *M2* a dále změny kvalitativní povahy chování systému (bifurkace). Vidíme zde „normální“ lineární stav (stav 1), dále základní ferorezonanční mód (stav 2), subharmonický ferorezonanční mód $s=f_0/2$ (stav 3) i chaotický ferorezonanční mód (stav 4). Vidíme také, že se systém může vyskytovat ve více ustálených stavech při stejných parametrech obvodu, např. pro $U_{\max \text{ zdroj}}=90 \text{ kV}$ se systém může nacházet v „normálním“ lineárním stavu (stav1) nebo v základním ferorezonančním módu (stav 2).

Díky numerickému řešení získáváme také časové průběhy veličin, zobrazení ve fázové rovině, frekvenční spektra aj. Obr. 21 ukazuje čas. průběhy napětí na transformátoru a fázovou rovinu pro stavy vyznačené v Obr. 20.

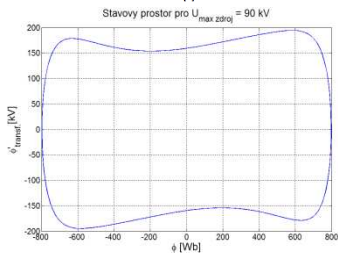
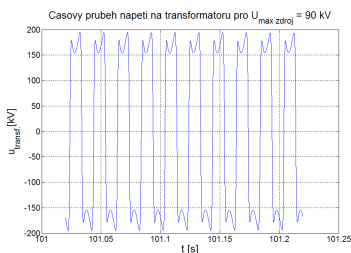


Obr. 20 Závislost max. hodnoty napětí na transformátoru na amplitudě zdroje

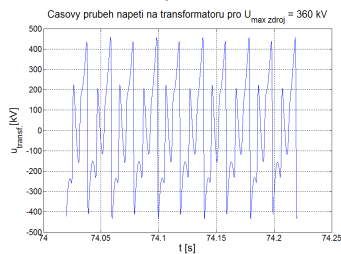
Stav 1 – „normální“ lineární stav



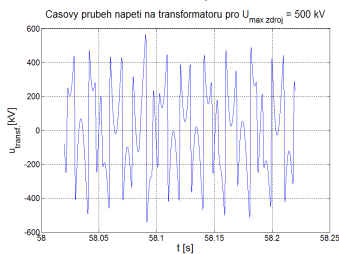
Stav 2 – základní ferorezonanční mód

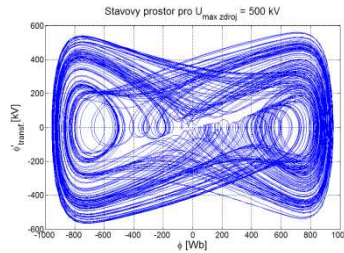
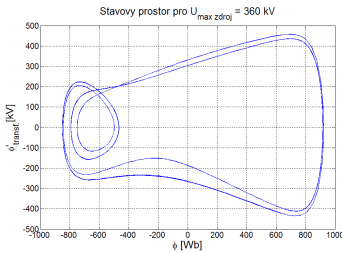


Stav 3 – subharmonický feror. mód (f=f_0/2)



Stav 4 – chaotický feror. mód

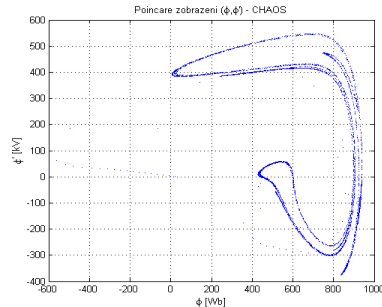




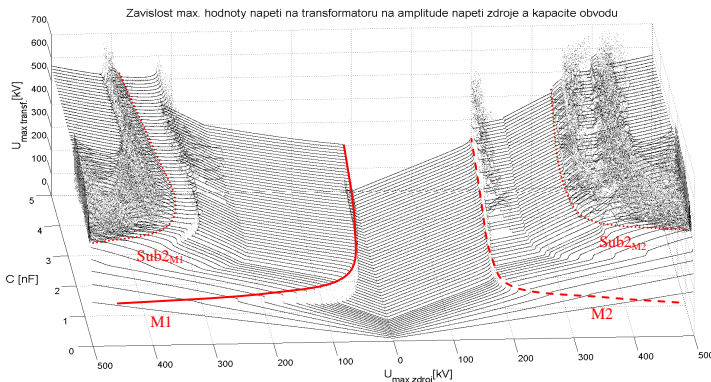
Obr. 21 Časové průběhy a vývoj systému ve fázové rovině pro stavy systému z Obr. 20

Zajímavé je chaotické chování systému ve stavu 4. V Poincarého zobrazení na Obr. 22 vidíme přesně určenou křivku, po které nám hodnoty „skáčou“ vždy jednou za 2π . Vzhledem k této určitosti chování se chaos nazývá deterministický.

Stanovením limitních bodů $M1$ a $M2$ pro celý uvažovaný vektor kapacit C (viz Obr. 23) znázorníme limitní křivky v rovině $[C, U_{max\ zdroj}]$ vymezující oblasti kritických parametrů pro základní ferorezonanční mód (obdobně jako v analytické metodě). Na Obr. 24 jsou tyto křivky vykresleny v porovnání s výsledky analytické metody. Vidíme velmi dobrou shodu výsledků obou metod.

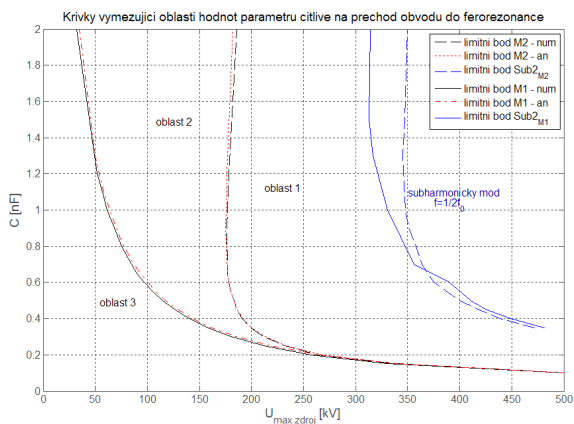


Obr. 22 Poincarého zobrazení pro chaotický ferorezonanční mód – stav 4



Obr. 23 Zobrazení maximální hodnoty napětí na transformátoru v závislosti na amplitudě zdroje a uvažovaném vektoru kapacit systému – bifurkační diagramy

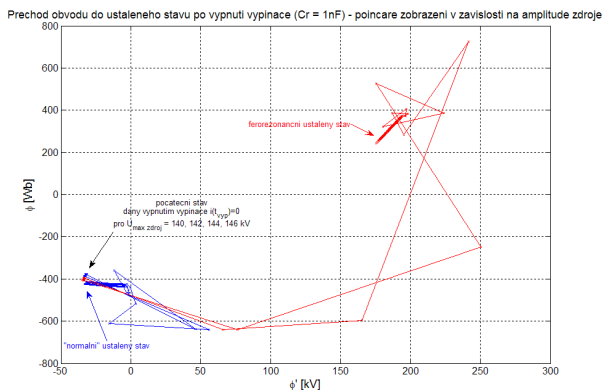
Zde můžeme však definovat také mezní křivky i pro jiné ferorezonanční módy. Na Obr. 24 vymezují modré křivky oblasti pro subharmonický mód s $f=f_0/2$ dle limitních bodů *Sub2M1* a *Sub2M2* v Obr. 23.



Obr. 24 Porovnání výsledků limitních křivek analytické (červeně) a numerické metody (černě)

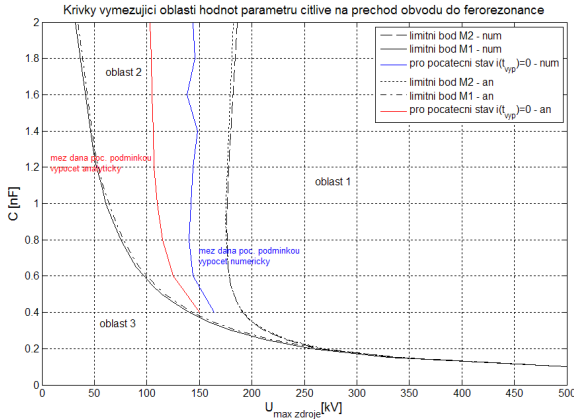
Detailní analýza v oblasti 2 – citlivost na počáteční podmínky

Podobně jako v analytické metodě vyšetříme chování v oblasti 2. Místo fázových portrétů využijeme Poincarého zobrazení. Na Obr. 25 vidíme vývoj systému při blízkých počátečních podmínkách definovaných hodnotou amplitudy a fáze napětí zdroje. V Poincarého zobrazení vidíme trajektorii přechodu do ustáleného „normálního“ lineárního stavu nebo do ustáleného ferorezonančního stavu právě v závislosti na počátečním stavu.



Obr. 25 Poincarého zobrazení s vývojem systému při blízkých počátečních podmínkách

Určením těchto limitních počátečních podmínek pro vektor kapacit C zpřesníme vymezení limitních parametrů v oblasti 2, viz Obr. 26 - modrá křivka. V porovnání s analytickým výpočtem je zde odlišnost, která je způsobená přesností numerické metody.



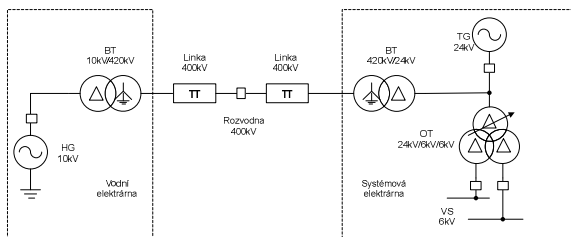
Obr. 26 Vymezení limitních parametrů v oblasti 2 při respektování počáteční podmínky

4.4 Napájení nezatíženého výkonového transformátoru z měkkého zdroje přes kapacitní systém

Následující kapitola analyzuje případ napájení nezatíženého blokového transformátoru elektrárny přes kapacitní systém reprezentovaný vedením vvn z měkkého zdroje (vodní elektrárnou). Pro výpočty zde byly využity diferenciální modely hysterezních smyček získané nepřímou metodou popsanou výše a numerické metody pro analýzu obvodu. Tento případ reprezentuje najíždění systémové elektrárny z nezávislého zdroje.

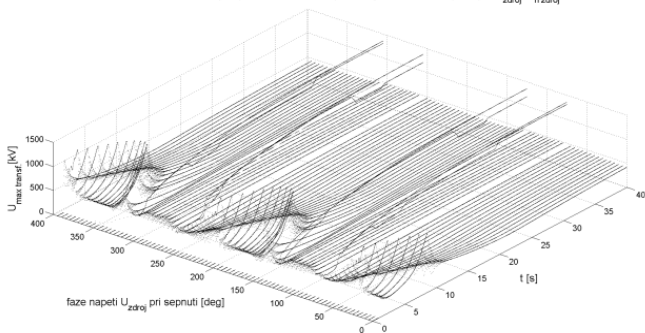
Schéma trasy napájení vlastní spotřeby systémové elektrárny je na Obr. 27. Trasu tvoří napájecí generátor vodní elektrárny, přenosový systém 400 kV, blokový transformátor (BT) a odbočkový transformátor (OT) systémové elektrárny. V této konfiguraci hrozí nebezpečí vzniku paralelní ferorezonance mezi kapacitou vedení a málo zatíženým BT elektrárny.

Po zjednodušení na jednofázový případ paralelního ferorezonančního obvodu byla provedena analýza děje při připnutí blokového transformátoru k lince 420 kV napájené jmenovitým napětím. Průběh děje je velmi závislý na okamžiku sepnutí (počáteční podmínka), a proto byla provedena analýza pro různé hodnoty fáze napětí v okamžiku sepnutí vypínače. Volíme nulové počáteční podmínky pro stavové proměnné. Výsledek je znázorněn na grafu maximální hodnoty napětí na transformátoru v závislosti na okamžiku sepnutí, viz Obr. 28.

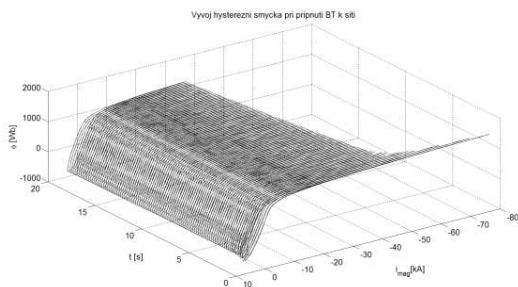


Obr. 27 Schéma trasy napájení vlastní spotřeby systémové elektrárny

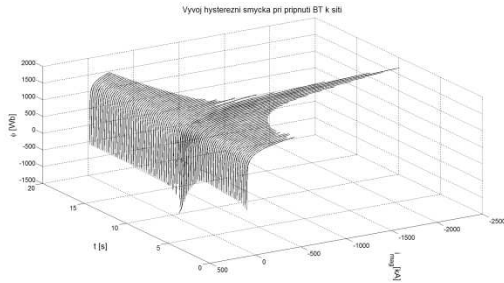
Zavislost max. hodnoty napětí na BT na fazi napětí zdroje v okamžiku sepnutí pro $U_{zdroj} = U_{n,zdroj}$



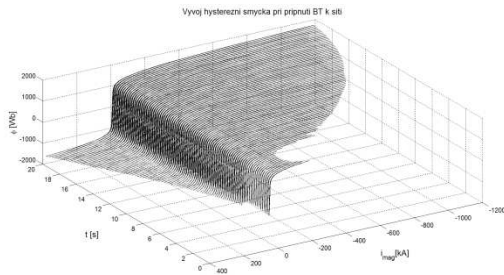
Obr. 28 Čas. průběh max. hodnoty napětí (za 2π) na BT v závislosti na okamžiku připnutí
 Zapnutí kolem fáze napětí 90° (tzn. v maximu napětí) je dle očekávání nej-
 příznivější a vzniklé přepětí je zde minimální. Při sepnutí kolem 0° (tzn.
 v nule napětí) je vybuzen přechodný ferorezonanční děj s velmi značným
 přepětím na transformátoru. Zajímavá je situace při sepnutí kolem 75° a
 125° , kdy dochází k trvalému ferorezonančnímu stavu s velkým přepětím.
 Ukázkou vývoje hysterezních smyček modelu pro jednotlivé fáze sepnutí
 ukazují Obr. 29, Obr. 30, Obr. 31.



Obr. 29 Vývoj modelu hysterezní smyčky při přechodném ději připnutí BT v 90° fáze napětí

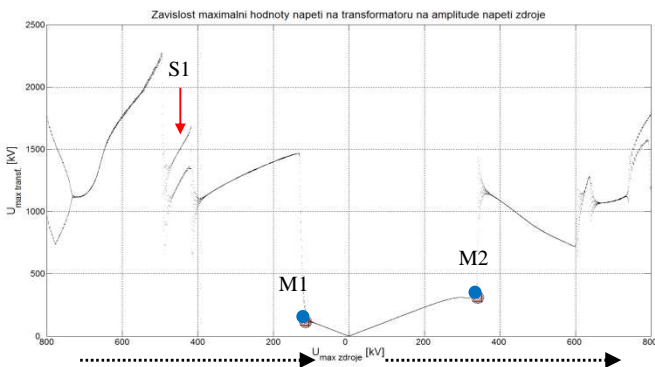


Obr. 30 Vývoj modelu hysterezní smyčky při přechodném ději připnutí BT v 0° fáze napětí



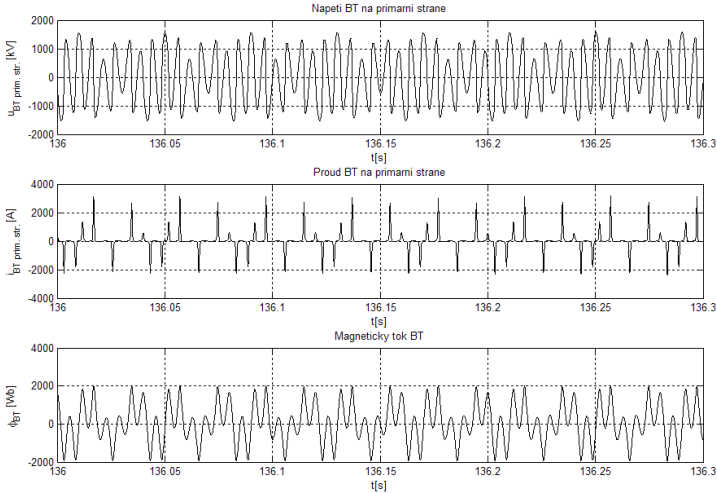
Obr. 31 Vývoj modelu hysterezní smyčky při přechodném ději připnutí BT v 75° fáze napětí

V dalším kroku byla provedena analýza v závislosti na změně parametru obvodu - na velikosti amplitudy napětí zdroje. V obvodu byla postupně zvyšována amplituda napětí zdroje od 0 kV do 800 kV a zpět k nule. Změnu maximální hodnoty napětí na BT v závislosti na velikosti amplitudy zdroje pro kapacitu $C = 0.74 \mu\text{F}$ vidíme na Obr. 32.

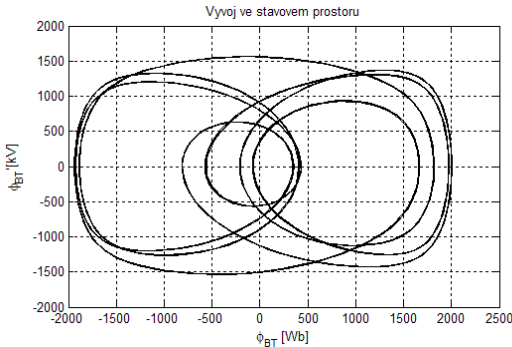


Obr. 32 Zobrazení maximální hodnoty napětí na BT v závislosti na amplitudě zdroje pro $C=0.74 \mu\text{F}$

V obr. 32 vidíme také limitní body $M1$ a $M2$, které představují skokový přechod obvodu do ferorezonance a nebo zpět do „normálního“ (lineárního) stavu. Na Obr. 33 a Obr. 34 uvádím příklad chování systému ve stavu $S1$ (časové průběhy, fázová rovina), kde došlo ke změně ferorezonančního módu na subharmonický s frekvencí $f=f_0/2$.

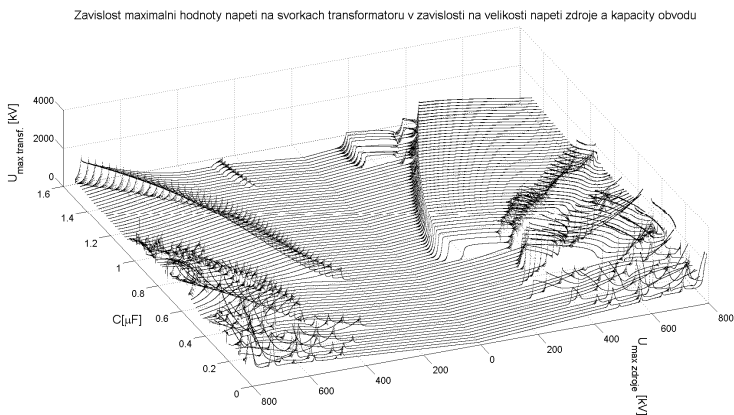


Obr. 33 Časové průběhy $u(t)$, $i(t)$, $\Phi(t)$ na primární straně BT pro stav $S1$ dle Obr. 32

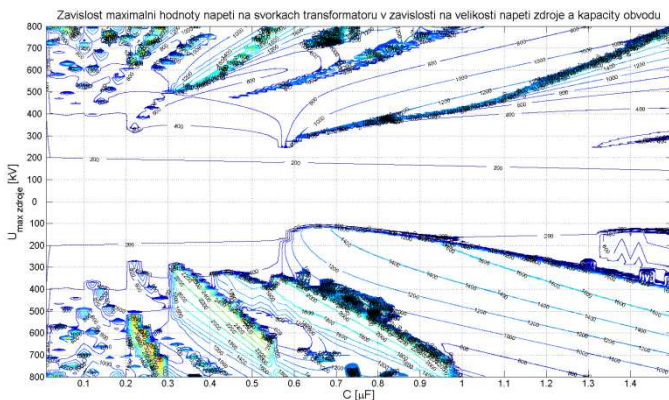


Obr. 34 Fázová rovina chování systému pro stav $S1$ dle Obr. 32

Využitím třetího rozměru lze sestavit 3D graf maximální hodnoty napětí na BT v závislosti na amplitudě napětí zdroje a sledovaném vektoru kapacit, viz Obr. 35. Z tohoto grafu lze pak vykreslit křivky o stejné úrovni napětí, jejichž zvýšená hustota vymezuje stavy s rostoucí hodnotou napětí a vznikem ferorezonančního stavu, viz Obr. 36.



Obr. 35 Závislost max. hodnoty napětí na BT na velikosti amplitudy napětí zdroje a kapacity obvodu



Obr. 36 Závislost max. hodnoty napětí na BT na velikosti amplitudy napětí zdroje a kapacity obvodu – křivky stejného napětí vymežující nebezpečné oblasti parametrů

5. Závěr

Různé SW pro obvodové výpočty v elektroenergetice nabízejí různě propracované modely transformátorů s různě propracovanými modely magnetizačních charakteristik. Tato práce v první části přináší nové přístupy k modelování transformátorů pro nf oblast, zejména se zaměřením na matematický popis magnetizační charakteristiky. Tento popis se snaží splňovat náležitosti pro širší praktické využití, mezi které patří rozumná složitost modelu, exist-

tence metodik jeho sestavení, přiměřená náročnost na výpočet a dostatečná přesnost modelu.

Zkonstruované modely jsou dále použity pro analýzu některých dynamických elektromagnetických nelineárních dějů vznikajících v elektrizační síti. Jedná se zejména o spínací děje nezatížených transformátorů a ferorezonanční děje. Tyto jevy mohou být nebezpečné pro energetická zařízení nebo jejich provoz, jelikož se projevují zvýšenými hodnotami napětí a proudů a značným zkreslením jejich průběhů. Je proto důležité umět předpovídat vznik a průběh těchto dějů a předem vyhodnotit jejich vliv na energetická zařízení a na přenos elektrické energie v soustavě.

Pomocí simulačních výpočtů je provedena analýza případu připínání nezatíženého blokového transformátoru v elektrárně. Zde je studován průběh vlastního zapínacího proudu při různých počátečních podmínkách a také přenos tohoto proudu přes PTP na stranu ochran.

V další části se práce zabývá rozбором a modifikací metodik pro analýzu ferorezonančních obvodů v energetických systémech s využitím nových modelů transformátorů. Metodiky jsou založeny jednak na analytickém přístupu nebo na využití numerického řešení diferenciálních rovnic. Jsou srovnány jejich výhody a nevýhody a aplikovány na konkrétních dvou případech.

Jedná se o analýzu sériového ferorezonančního obvodu, jakožto případu vypínání nezatíženého vývodu linky v rozvodně 110 kV s měřícím transformátorem napětí a analýzu případu napájení nezatíženého blokového transformátoru elektrárny z měkkého zdroje (generátor vodní elektrárny) přes linku 400 kV, což vede na paralelní ferorezonanční obvod. Tento případ reprezentuje stav při najíždění systémové elektrárny z nezávislého zdroje např. po kolapsu sítě (tzv. Blackoutu).

Cílem analýzy ferorezonančních obvodů bylo vymezení oblastí rizikových parametrů, při kterých může dojít k přechodu obvodu do ferorezonance, event. určení průběhu vlastního děje pro různé počáteční podmínky.

Uvedené analýzy by bez použití počítačových prostředků a numerických metod řešení nebyly možné. Pro výpočty a algoritmy byly využity *SW Matlab*, *SW Mathematica* a *SW QuickField*.

Je předpoklad, že práce bude sloužit k upozornění a zdůraznění problematiky ferorezonance a jevů v nelineárních obvodech elektroenergetických systémů. Důležitost této práce vystupuje do popředí díky potřebě určení nebezpečných stavů soustavy v mimořádných stavech, kdy je systém náchylný ke vzniku ferorezonančních jevů a následných kolapsových stavů vedoucích k Blackoutům. Výsledky v této práci mohou dále přispět ke zvýšení spolehlivosti a bezpečnosti při návrzích energetických systémů a při jejich provozování.

6. Literatura

6.1 Použitá literatura

- [1] Dohnálek P.: Ochrany pro průmysl a energetiku, SNTL, 1991
- [2] Hampl J.: Materiály pro elektrotechniku, Vydavatelství ČVUT, 1996
- [3] Reintboth H.: Vlastnosti a použití magnetických materiálů, Nakladatelství technické literatury, 1975
- [4] Jacobson D.: Investigation of Station Service Transformer Ferroresonance in Manitoba Hydro's 230-kV Dorsey Converter Station, IPST '2001(Rio de Janeiro), 2001
- [5] Draxler K.: Magnetické prvky a měření, Vydavatelství ČVUT, 1999
- [6] Ferracci P.: Ferroresonance, Groupe Schneider: Cahier Technique n° 190, 1998
- [7] Kyncl J., Tlustý J.: A model of hysteresis Loop in Transformers and Induction Heating, RUPEC'2002
- [8] Kouřil F.: Teorie nelineárních a parametrických obvodů, Nakladatelství technické literatury, 1981
- [9] Novotný K.: Teorie elektromagnetického pole 1, Vydavatelství ČVUT, 1998
- [10] Měřička J.: Elektrické stroje, Vydavatelství ČVUT, 1997
- [11] Jacobson D.: Examples of ferroresonance in a High Voltage Power System, Member, IEEE
- [12] Martinez-Velasco J., Mork B.: Transformer modeling for simulation of low frequency transients in power system, CIRED, 17th International Conference on Electricity Distribution, (Barcelona), 2003
- [13] Kulhánek P.: Teoretická mechanika, studijní text pro doktorské studium, FEL ČVUT, Praha, 2001

- [14] Miri A.M., Müller C.: Modeling of Inrush Currents in Power Transformers by a Detailed Magnetic Equivalent Circuit, IV. International Conference on Power Systems Transients, IPST'2001(Rio de Janeiro).
- [15] Cundeva S.: A Transformer Model Based on the Jiles–Atherton Theory of Ferromagnetic Hysteresis, SERBIAN JOURNAL OF ELECTRICAL ENGINEERING, Vol. 5, No. 1, May 2008, 21-30
- [16] Eslami A., Vakilian M.: Analytic Computation of Inrush Current and Finite Element Analysis of, PSC2009 24th International Power System Conference, 09-E-TRN-0122
- [17] Soudack A.C., Marti J.R.: Ferroresonance in power system: chaotic behaviour, IEE PROCEEDINGS-C, Vol. 140, No.3, MAY 1993
- [18] Buigues G. Zamora I.,: Ferroresonance in three-phase power distribution transformers, CIRED 19th International Conference on Electricity Distribution, Vienna, 21-24 May 2007, Paper 0197
- [19] Hasman T.: Přepětí v elektroenergetických soustavách, ČVUT Praha 1997
- [20] Trojánek Z.: Přechnodné jevy v elektrizačních soustavách, SNTL/ALFA, Praha 1987
- [21] Měřička J. Hamata, V., Voženílek P.: Elektrické stroje, Praha 1993, skripta ČVUT
- [22] Petrov G. N.: Elektrické stroje 2, Praha 1982, Academia
- [23] Měřička J., Zoubek Z. : Obecná teorie elektrického stroje, Praha 1973, SNTL
- [24] Modrlák O.: Teorie automatického řízení II - NELINEÁRNÍ SYSTÉMY, studijní materiály, TU Liberec, Fakulta mechatroniky a mezioborových inženýrských studií, Katedra řídicí techniky
- [25] Mikulec M., Havlíček V.: Základy teorie obvodů 1, Vydavatelství ČVUT, Praha 1997

- [26] Mikulec M., Havlíček V.: Základy teorie obvodů 2, Vydavatelství ČVUT, Praha 1998
- [27] Čížek V.: Diskrétní Fourierova transformace a její použití, SNTL Praha 1981
- [28] Wikipedia [online]. 2010: www.wikipedia.org
- [29] Angot A.: Užitá matematika pro elektroinženýry, SNTL Praha 1971
- [30] Hodinka M.: Vybrané problémy z elektrizačních soustav, VUT Brno 1988
- [31] Němeček F.: Přenos a rozvod elektrické energie, skriptum ČVUT FEL 1983
- [32] Anderson P. M.: Power System Protection, IEEE Press, 1999
- [33] Brettschneider, Z.: (supervisor Tlustý, J.): Nestandardní jevy v elektroenergetických soustavách. [Diplomová práce (Ing.)]. Praha: ČVUT FEL, Katedra elektroenergetiky, 2004, 106 s.

6.2 Použitý SW

- [S1] MathWorks, Inc., Matlab [SW]. Ver. 6.5., 2002
- [S2] MathWorks, Inc., Matlab [SW]. Ver. 7., 2005
- [S3] Wolfram, Stephen. Mathematica [SW]. Ver. 5.0. Oxfordshire UK, 2004
- [S4] Tera Analysis Ltd., Student's QuickField [SW]. Ver. 5.7.1.838, 2009

6.3 Publikace autora

Publikace autora vztahující se k tématu disertační práce

Publikace autora v impaktovaných časopisech

- [A1] Zajac J., Žáček F., Brettschneider Z., Lejsek V.: Short-term power sources for tokamaks and other physical experiments. Fusion Engineering and Design. Roč. 82, č. 4 (2007), s. 369-379. ISSN 0920-3796

Publikace v recenzovaných časopisech

Nejsou

Patenty

Nejsou

Publikace WOS

Nejsou

Ostatní publikace

- [A2] Kyncl, J. - Špetlík, J. - Brettschneider, Z.: Nová koncepce modelování transformátorů v provozních podmínkách. In ELEN 2004 [CD-ROM]. Praha: ČVUT, Fakulta elektrotechnická, 2004, ISBN 80-239-3565-8.

- [A3] Brettschneider, Z. - Kyncl, J.: The Model of Non-Linear Three-Phase Transformer with or without Hysteresis. In Sborník z 3. vědeckého sympózia elektroenergetika 2005 [CD-ROM]. Košice: Technická univerzita v Košiciach, 2005, s. 1-27. ISBN 80-8073-305-8.

- [A4] Brettschneider, Z. - Tlustý, J. - Kyncl, J.: Mathematic Model of Current Measurement Transformer. In Electric Power Engineering 2005 [CD-ROM]. Ostrava: VSB-TUO, 2005, s. 1-17. ISBN 80-248-0842-0.

- [A5] Brettschneider, Z. - Kyncl, J.: The Model of Non-Linear Three-Phase Transformer. In RUPEC 2005. Prague: CTU, 2005, s. 1-15. ISBN 80-239-5439-3.

- [A6] Procházká, R. - Brettschneider, Z.: Power Supply of Experimental Thermonuclear Reactor – Comparison of Matlab and ATP-EMTP Si-

mulations. In Proceedings of EEUG Meeting 2006. Dresden: Technische Universität Dresden, 2006, s. 87-93.

[A7] Kyncl, J. - Brettschneider, Z. - Kubín, P.: Nonlinear time domain transformer model assessment. In IVth International Scientific Symposium ELEKTROENERGETIKA 2007 - Proceedings [CD-ROM]. Košice: Technická univerzita v Košiciach, 2007, p. 95-98. ISBN 978-80-8073-844-0.

[A8] Brettschneider, Z. - Sýkora, T. - Švec, J. - Tlustý, J. - Valouch, V.: The Possibility of 3 Harmonic Filtration. In IVth International Scientific Symposium ELEKTROENERGETIKA 2007 - Proceedings [CD-ROM]. Košice: Technická univerzita v Košiciach, 2007, p. 492-498. ISBN 978-80-8073-844-0.

[A9] Brettschneider, Z. - Zajac, J.: Model napájecího systému pro tokamak COMPASS-D. In Sborník konference ELEN 2008 [CD-ROM]. Praha: ČVUT FEL, Katedra elektroenergetiky, 2008, s. 1-10. ISBN 978-80-254-2293-9.

[A10] Brettschneider, Z. - Tlustý, J. - Kyncl, J.: Analýza přechodného děje při připínání blokového a odbočkového transformátoru ze sítě 6kV RNVS v JE Temelín. [Výzkumná zpráva]. Praha: ČVUT, Fakulta elektrotechnická, 2005. 131154105067. 148 s.

Ostatní publikace autora

Publikace autora v impaktovaných časopisech

Nejsou

Publikace v recenzovaných časopisech

Nejsou

Patenty

Nejsou

Publikace WOS

Nejsou

Ostatní publikace

- [A11] Brettschneider, Z. - Taussig, T.: Perspective of Hydrogen Production. In Sborník z 3. vědeckého sympózia elektroenergetika 2005 [CD-ROM]. Košice: Technická univerzita v Košiciach, 2005, s. 1-24. ISBN 80-8073-305-8.
- [A12] Brettschneider, Z. - Máslo, K. - Witner, K. - Kasembe, A. - Škach, M.: Systémové stabilizátory - požadavky a jejich prověření. In IVth International Scientific Symposium ELEKTROENERGETIKA 2007 - Proceedings [CD-ROM]. Košice: Technická univerzita v Košiciach, 2007, s. 597-601. ISBN 978-80-8073-844-0.
- [A13] Grosiar, J. - Škach, M. - Brettschneider, Z.: Systém odlehčování zátěže v průmyslovém závodě. In IVth International Scientific Symposium ELEKTROENERGETIKA 2007 - Proceedings [CD-ROM]. Košice: Technická univerzita v Košiciach, 2007, s. 699-700. ISBN 978-80-8073-844-0.
- [A14] Brettschneider, Z.: Tuning and testing of PSS (235 MVA TG ETUII). In Sborník konference ELEN 2010 [CD-ROM]. Praha: ČVUT FEL, Kat. elektroenergetiky, 2010, s.8-9. ISBN 978-80-254-8089-2.
- [A15] Brettschneider, Z., Krula, A., Vybíralík, F., Mareček, P.: Integration of large photovoltaic power plants to distribution network. C I R E D 21th International Conference on Electricity Distribution Frankfurt, 6-9 June 2011, Paper 0933.

Podíl spoluautorství u všech uvedených publikací je dělen mezi jednotlivé autory vždy rovným dílem.

Na uvedené publikace nebyly registrovány žádné ohlasy ani recenze.