

VĚDECKÉ SPISY VYSOKÉHO UČENÍ TECHNICKÉHO V BRNĚ

Edice PhD Thesis, sv. 736

ISSN 1213-4198

thesis
IS

Ing. Branislav Batora

**Analýza ferorezonančního přepětí
v elektrických sítích**

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
FAKULTA ELEKTROTECHNIKY
A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV ELEKTROENERGETIKY

Ing. Branislav Bátora

**ANALÝZA FEROREZONANČNÍHO PŘEPĚTÍ
V ELEKTRICKÝCH SÍTÍCH**

ANALYSIS OF THE FERRORESONANCE OVERVOLTAGE
IN ELECTRICAL NETWORK

Zkrácená verze Ph.D. Thesis

Obor: Silnoprúdová elektrotechnika a elektroenergetika
Školitel: doc. Ing. Petr Toman, Ph.D.
Oponenti: doc. Ing. Petr Krejčí, Ph.D.
doc. Ing. Žaneta Eleschová, Ph.D.
Datum obhajoby: 28. března 2014

Klíčová slova:

Přechodné jevy, přepětí, ferorezonance, ferorezonanční přepětí, saturace, hystereze, PSCAD, Matlab simulink.

Keywords

Transient phenomenon, overvoltage, ferroresonance, ferroresonance overvoltage, saturation, hysteresis, PSCAD, Matlab simulink.

Místo uložení:

Práce je k dispozici na Vědeckém oddělení děkanátu FEKT, VUT v Brně,
Technická 10, Brno, 61600.

© Branislav Bátora, 2014

ISBN 978-80-214-4941-1

ISSN 1213-4198

OBSAH

1 ÚVOD	5
2 SOUČASNÝ STAV ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY.....	5
2.1 Teorie dynamických systémů.....	6
2.2 Ferorezonanční jev a ferorezonanční přepětí	8
3 CÍLE PRÁCE	11
4 ŘEŠENÍ.....	12
4.1 Analýza ferorezonančního obvodu s využitím softwarového nástroje PSCAD	12
4.1.1 Model transformátoru v programu PSCAD.....	12
4.1.2 Vznik a průběh ferorezonance trojfázového transformátoru napájeného z jedné nebo dvou fází	13
4.2 Analýza ferorezonančního obvodu s využitím softwarového nástroje Matlab simulink...	17
4.2.1 Simulace s uvažováním hystereze transformátoru	18
4.2.2 Simulace bez uvažování hystereze transformátoru	19
4.3 Možnosti snížení pravděpodobnosti vzniku ferorezonančního jevu.....	21
4.3.1 Trojfázový výkonový transformátor napájený z jedné nebo ze dvou fází.....	21
5 ZÁVĚR.....	22
5.1 Cíle práce a jejich splnění	23
5.1.1 Nalezení vhodného softwaru	23
5.1.2 Vliv hystereze na výskyt a průběh ferorezonančního jevu	24
5.1.3 Vyšetření krizových scénářů v ES	25
5.1.4 Možnosti snížení pravděpodobnosti vzniku ferorezonance a nalezení limitních podmínek pro vznik ferorezonančního jevu	26
5.2 Přínosy disertační práce a shrnutí vědeckých poznatků.....	27
5.3 Doporučení.....	28
5.4 Možnost dalšího zaměření práce	28
POUŽITÁ LITERATURA	29
ŽIVOTOPIS AUTORA.....	30
ABSTRACT.....	31

1 ÚVOD

Energetický systém lze rozdělit na výrobu, přenos a rozvod a spotřebu elektrické energie. V každém článku zmíněného řetězce lze dosáhnout snížení ztrát. Samotná problematika a možnosti snižování ztrát elektrické energie v jednotlivých řetězcích energetického systému ale není předmětem této práce. Snaha o snižování ztrát v energetickém systému plynoucí z ekologických a ekonomických požadavků je právě důvodem stále častějšího výskytu různých náhodných dějů. Důležité je uvažovat celý systém jako celek, takže je nutné počítat s faktem, že při snížení ztrát dojde k snížení zatlumení systému. To má ale za následek zvýšení a prodloužení odezvy systému na jakoukoliv změnu a tedy i na charakter přechodných dějů. V elektrizační soustavě se většinou jedná o krátkodobé zvýšení či snížení napětí. Může nastat případ, že v důsledku změny v systému se trvale zvýší napětí co může mít destruktivní účinky na většinu zařízení.

Obzvlášť nebezpečný druh přepětí je přepětí vznikající v důsledku rezonance v části systému. Elektrizační soustavu můžeme považovat za elektrický obvod, který obsahuje ve velké míře nelineární indukčnosti a kapacity. Hlavní složku nelinearity indukčnosti představují zejména transformátory, reaktory a jiné prvky elektrizační soustavy. Dlouhá elektrická vedení a kompenzační kondenzátory zas vnášejí nelinearitu do kapacitního charakteru obvodu. V důsledku přítomnosti právě zmíněných nelinearit dochází při splnění určitých podmínek ke vzniku rezonance.

Rezonanci způsobenou nelineární indukčností, jako je například cívka se železným jádrem nazýváme ferorezonance. Přepětí, která jsou způsobená právě zmíněnou ferorezonancí, se nazývají ferorezonanční přepětí.

Ferorezonanci možno definovat jako jev, který způsobuje přechodné nebo ustálené přepětí a nadproudy a taky abnormální zkreslení harmonických průběhů napětí a proudů. Není nutné zdůrazňovat, jaké nebezpečí představuje ferorezonance pro veškerá elektrická zařízení. Jak už bylo naznačeno, ferorezonance může vzniknout v každém obvodu, který obsahuje nelineární indukčnosti, kapacity, zdroj napětí a malé ztráty. Vývoj transformátorů se obecně zaměřuje na dosažení co nejmenších ztrát pomocí zdokonalování magnetických materiálů jader transformátorů. Z možných důsledků tohoto jevu na prvky elektrizační soustavy, plyne požadavek nebo snaha jevu ferorezonance předejít a umět ho analyzovat.

2 SOUČASNÝ STAV ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY

Elektrizační soustava představuje složitý nelineární dynamický systém. Tento systém se skládá z různých prvků, které lze s určitou přesností matematicky popsat. Tento popis je nezbytný při analýze různých procesů a přechodných jevů v ES. V této kapitole bude podrobně popsána problematika řešení nelineárních systémů, přepětí v ES, ferorezonanční jev a jeho důsledky na energetické systémy, které jsou obzvlášť náchylné na jeho vznik.

2.1 TEORIE DYNAMICKÝCH SYSTÉMŮ

Jako dynamické systémy budeme označovat systémy, jejichž stav lze popsat konečnou množinou stavových proměnných, přičemž okamžitý stav systému plně určuje další hodnoty stavových proměnných v každém čase (přítomnost i minulost), tedy jeho vývoj.

Hodnoty všech stavových proměnných v daném čase popisují stav systému, který lze znázornit bodem v tzv. fázovém prostoru.

Je-li \mathbf{x} vektor stavových proměnných ve fázovém prostoru $R^n: \mathbf{x} = (x_1, x_2, \dots, x_n)$, nazveme modelem dynamického systému soustavu diferenciálních rovnic

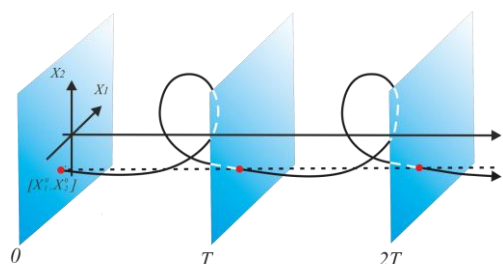
$$\dot{\mathbf{x}} = F(t, \mathbf{x}) \quad (2.1)$$

Kde t je čas a F je vektorová funkce. Uvedená soustava se často nazývá Cauchyho systém a lze ji vytvořit i ze soustavy diferenciálních rovnic vyšších řádů jednoduchými substitucemi. Řešením soustavy je vektor funkcí $\mathbf{x}(t) = (x_1(t), x_2(t), \dots, x_n(t))$. Vývoj systému lze pak znázornit parametrickou křivkou $\mathbf{x}(t)$ v n -rozměrném fázovém prostoru R^n , kterou nazýváme trajektorií systému. Soustava parametrických křivek (trajektorií) pro množinu počátečních podmínek tvoří tzv. fázový portrét systému. Každý bod ve fázovém prostoru náleží právě jedné trajektorii systému. Z toho ihned vyplývá, že trajektorie se nemohou nikde protínat, neboť v průsečíku by nebylo možné určit jednoznačně další vývoj systému a systém by již nebyl deterministický.

Pro vytvoření názorného fázového portréту u systémů vyšší dimenze nestačí prostředky, které jsme dosud používali. Jedinou možností, jak zachytit vlastnosti fázového portréту v prostoru nižší dimenze, je projekce nebo řez vícerozměrného útvaru obecnou plochou. Zjednodušeně lze *Poincarého mapu* chápat jako řez (podmnožinu) fázového portréту, v němž má jedna nebo více stavových proměnných konstantní hodnotu.

Toto zobrazení se ukázalo jako velmi vhodné pro studium stability i bifurkací periodických řešení. Místo zaznamenávání trajektorií pohybu bodů v časových okamžicích s krokem délky dt , v Poincarého zobrazení zaznamenáváme body při kroku délky $T = 2\pi/\omega$, tj. v časech $t = kT$, kde $k = 0, 1, 2, \dots$ (získaný bodový záznam se též nazývá Poincarého či stroboskopická mapa).

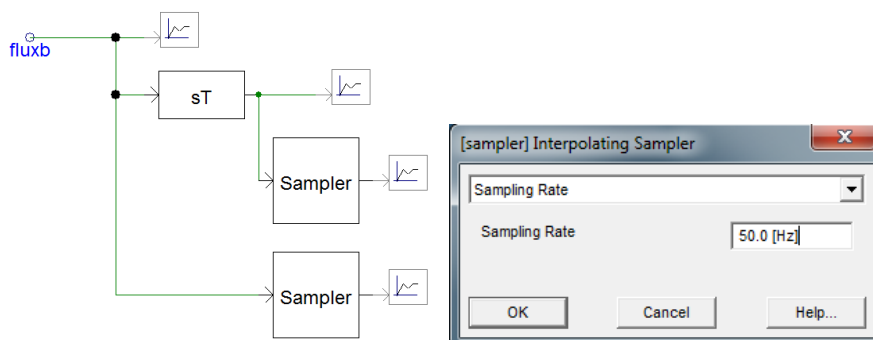
Poincarého mapu (“Poincaré plot“ nebo “Poincaré map“) lze zjednodušeně chápat jako řez podmnožinou fázového portréту, ve kterém je hodnota jedné či více stavových proměnných konstantní, viz Obr. 2.1.



Obr. 2.1. Poincarého mapy pro neautonomní systém

Bylo by velmi přínosné nalézt metodu pro konstrukci Poincarého mapy spojenou s obyčejnými diferenciálními rovnicemi. Neexistuje ale obecná metoda, jež by se dala použít na libovolné obyčejné diferenciální rovnice, jelikož konstrukce Poincarého mapy vyžaduje částečné znalosti geometrické struktury fázového prostoru obyčejné diferenciální rovnice.

V Programu PSCAD, lze získat zmíněnou Poincarého mapu ferorezonančních oscilací pomocí jednoduchého zpracování simulovaných signálů dle Obr. 2.2. Vytvoření Poincarého mapy, provedeme pomocí grafu xy , přičemž zobrazíme závislost vzorkovaných (sampořovaných) veličin. Nastavení vzorkovacího intervalu lze zadat pomocí frekvence vzorkování viz Obr. 2.2.



Obr. 2.2 Konstrukce Poincarého zobrazení v prostředí PSCAD a nastavení sampleru

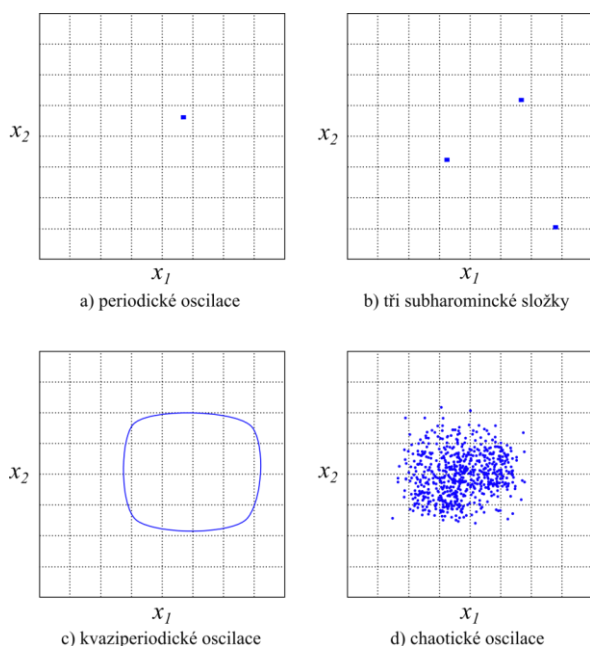
Poincarého mapa je tedy, zjednodušeně řečeno, sestavení fázové roviny při určitých vzorkovacích intervalech, kde vzorkovací frekvence je stejná jako frekvence budící veličiny (v tomto případě napětí zdroje, tedy 50 Hz). Pro:

- čistě periodické chování zkoumaného systému bude Poincarého mapa obsahovat samostatný bod, např. viz Obr. 2.3a);
- systém s k subharmonickými složkami bude Poincarého mapa obsahovat konečný počet bodů (k). Pro tři body viz Obr. 2.3b);
- kvaziperiodický systém nejsou frekvenční složky souměřitelné s řídicí frekvencí a Poincarého mapa se tedy vyvíjí jako uzavřená orbita, Obr. 2.3c);
- chaotické chování se Poincarého mapa vyvíjí jako náhodná množina bodů omezená na určitou oblast fázové roviny. Při tomto typu chování se Poincarého mapa vyvíjí ve složité útvary (např. viz Obr. 2.3d)), které v podstatě představují řez atraktorem.

V tomto případě je realizace Poincarého mapy časově náročná, protože k vyniknutí tvaru atraktoru je potřeba mnoho zobrazených bodů. Poincarého zobrazení může poskytovat užitečnou informaci o poměru frekvence budící funkce ke skutečné frekvenci systému. Např. jestliže je skutečná frekvence ferorezonanční vlny napětí 50/3 Hz (což jsou podmínky vztažené k ferorezonanci třetí subharmonické) a provádí-li se vzorkování každých 0,02s, pak Poincarého mapa obsahuje tři body, viz Obr. 2.3b.

Z uvedeného stručného popisu Poincarého zobrazení lze vidět, že studium dynamiky nelineárních systémů bylo možno rozvinout až s použitím výkonných počítačů. Teprve grafický výstup ve tvaru Poincarého zobrazení totiž ukázal na velkou složitost dynamiky nelineárních

systemů. Jak grafický, tak numerický výstup z počítače je však nutno považovat za experimentální výstup, který je třeba dále analyzovat [8].



Obr. 2.3 Poincarého zobrazení v ustáleném stavu pro různé odezvy systému

2.2 FEROREZONANČNÍ JEV A FEROREZONANČNÍ PŘEPĚTÍ

Jak již bylo naznačeno v úvodu, ferorezonance je speciální název pro rezonanci v obvodech, které obsahují cívku se železným jádrem, přičemž její indukčnost se mění v důsledku nelinearity magnetizační charakteristiky a závisí na okamžitém magnetickém stavu cívky se železným jádrem.

Napětí na kondenzátoru nebo cívce se pak nemění s rostoucím kmitočtem napájecího napětí plynule, ale skokem, což způsobuje velké změny v daném obvodu. V elektroenergetických sítích se pak tento jev může objevit po provedení spínacích manipulací nebo jen po připojení měřicího transformátoru napětí, či jiného zařízení.

Vznik ferorezonance tedy může být zapříčiněn nějakou změnou v konfiguraci sítě, či nárůstem napájecího napětí. Ferorezonance pak může způsobit vysoká přepětí, jejichž amplituda může být až několikanásobkem normálních napěťových poměrů. Navíc může dát vznik nebezpečně vysokým proudům, jež dalece převyšují normální pracovní poměry spínacího zařízení. Může při ní navíc docházet ke změnám fázového napětí, které se projevují nepravidelnou změnou fázových napětí.

Přítomnost ferorezonance v distribučním systému obvykle způsobuje jednu či více abnormalit, jež mohou být změřeny či pozorovány:

- Vysoké sdružené napětí anebo fázové napětí s vrcholovými hodnotami, jež mohou dosahovat až pěti či více násobku normální vrcholové hodnoty napětí systému.

- Extrémně zkreslené a nepravidelné tvary vln napětí a proudu.
- Abnormální hluk v transformátoru způsobený hlavně díky magnetostrickci při vysokých hodnotách magnetické indukce.

Přesněji řečeno, termín ferorezonance se vztahuje na rezonanční jevy, které vzniknou, jestliže se pracovní bod nasycené části hysterezní křivky transformátoru (bod odpovídající určité okamžité hodnotě indukčnosti) dostane do rezonance s kapacitou obvodu a následné rezonanční oscilace udrží pracovní bod v nasycené oblasti, i když napětí zdroje v obvodu samo nedostačuje k trvalé práci v této nasycené oblasti.

Katastrofické poruchy zařízení díky ferorezonanci se stále objevují i dnes, v době, kdy už je tento jev studován po dobu více jak 90 let. Poprvé se termín ferorezonance objevil v literatuře v roce 1920 a vztahoval se k oscilačním jevům objevujícím se v elektrickém obvodu obsahujícím alespoň nelineární indukčnost (feromagnetickou s možností nasycení), kapacitu, napěťový zdroj (obecně sinusový) a nízké ztráty.

Uvažujme, podle [9], že budící cívka magnetického obvodu se železem, která má N závitů, se připojí na zdroj harmonického napětí

$$u(t) = U_m \sin \omega t \quad (2.2)$$

Magnetický tok, který vznikne v magnetickém obvodu, indukuje v budícím vinutí stejně velké harmonické napětí:

$$u_i(t) = N \frac{d\phi(i)}{dt} = U_m \sin \omega t \quad (2.3)$$

Okamžitá hodnota magnetického toku je:

$$\phi(i) = \int \frac{U_m}{N} \sin(\omega t) dt = -\frac{U_m}{\omega N} \cos \omega t = \frac{U_m}{\omega N} \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right) \quad (2.4)$$

Průběh magnetického toku je harmonický a zpožděný za napětím o 90° , tedy o jednu čtvrtinu doby kmitu. Harmonickému magnetickému toku v železném jádru s nelineární magnetizační charakteristikou však odpovídá neharmonický magnetizační proud, jehož průběh lze odvodit ze závislosti okamžitých hodnot magnetického toku $\phi = \phi(i)$. Z tohoto průběhu je zřejmé, že magnetizační proud obsahuje výraznou třetí harmonickou. Převážné vlivy na nelinearitu v železném jádru, např. transformátoru, ukazuje schéma naznačené na Obr. 2.4.



Obr. 2.4 Převážné vlivy na nelinearitu v železném jádru

Saturace má z těchto tři vlivů největší účinek na to, co Swift [12] nazývá „patologická odezva“, když má na mysli chování, které se u lineárních systémů nevyskytuje. Znakem, který odlišuje účinek saturace (sycení) od jiných vlivů je to, že ztráty energie jsou zahrnuty v těchto jiných vlivech, tj. energie je rozptýlena jako ztráty teplem v případě hystereze a vířivých proudů. Saturace sama nepředstavuje žádné ztráty. Více o saturaci např. [2].

Vířivé proudy vznikají v magnetickém obvodu při střídavém magnetování. Střídavé magnetické pole indukuje v magnetickém obvodu podle Faradayova indukčního zákona napětí u_i , které způsobí vířivé proudy i_d . Jejich velikost je závislá na průřezu S , rezistanci R materiálu magnetického obvodu a na rychlosti časové změny magnetické indukce. Se zvyšováním frekvence tak rostou i ztráty za jeden cyklus, viz [13]. Vířivé proudy pak způsobují nerovnoměrné rozložení indukce v materiálu, což je příčinou přesycování vnějších vrstev a zmenšení pole ve vnitřních vrstvách materiálu.

Hystereze se v magnetických obvodech projevuje hysterezními ztrátami. Ty jsou způsobeny zahříváním jádra cívky průchodem střídavého proudu a jsou úměrné ploše hysterezní smyčky. Proto se pro střídavé magnetování používá materiálů s úzkou hysterezní smyčkou, které se snadno přemagnetovávají.

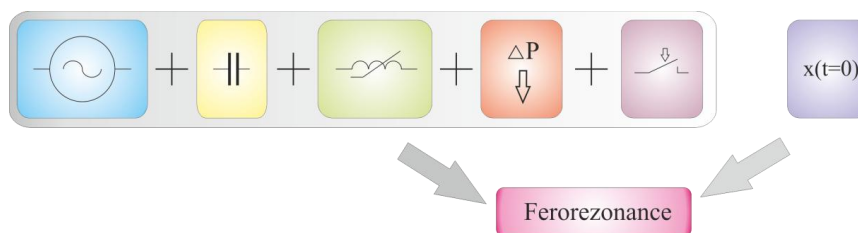
Hystereze má vliv na průběh ferorezonančního jevu. Hraje důležitou roli při deformaci průběhů napětí a proudu. Z toho důvodu je pro přesnost simulací a výsledků vhodné jev uplatnit v matematickém modelu při analýze ferorezonančních dějů. Důsledky hystereze, kapacity vinutí transformátoru, kapacity vedení a jiných počátečních podmínek jsou velmi aktuálním předmětem diskusí na vědeckých konferencích. [11], [4], [3], [10].

Modelováním cívky se železným jádrem se zabývá několik autorů. Někteří uvažují jen saturaci, jiní jen saturaci a hysterezi a další jen saturaci a vířivé proudy. Rovněž existují i modely, které uvažují všechny tři vlivy, ale jen pro speciální okolnosti či podmínky. Různé druhy modelů a přístupů k nim lze najít např. v [2], [5], [8], [14] či [15].

Ferorezonance se v elektrizační soustavě vyskytuje při určité konfiguraci sítě v provozním či mimoprovozním stavu. Veškeré metody analýzy pak vedou ke zjišťování podmínek, které vznik ferorezonance umožňují. Jak už bylo uvedeno, může ferorezonance nastat po provedení spínacích manipulací (např. připojení vedení, přípojnic, provádění opětovného zapínání) nebo po připojení měřicího transformátoru napětí. Aby se ferorezonance mohla v elektrizační soustavě objevit, musí v ní podle [7] existovat zdroj napětí, kapacita, transformátor nebo indukčnost se syceným feromagnetickým jádrem a nízké ztráty.

Elektroenergetické systémy sestávají z velkého počtu nelineárních induktorů se železným jádrem (výkonové transformátory, měřicí transformátory, reaktory) stejně jako kondenzátorů (kabely, dlouhá vedení, kapacitní měřicí transformátory napětí, sériové nebo paralelní kompenzační kondenzátory, kapacity pro rozložení napětí na komorách vypínačů, aj.), což v sobě představuje nespočet scénářů, za kterých může ferorezonance vzniknout.

Existence všech uvedených podmínek však ještě neznamená, že se ferorezonance musí v elektrizační soustavě nutně objevit. Oproti tomu, není-li v elektrizační soustavě jeden z nich, lze pak tvrdit, že ferorezonance nevznikne.



Obr. 2.5 Podmínky pro vznik ferorezonance

Důležitými počátečními podmínkami při zapínání a vypínání nezatíženého nebo jen málo zatíženého prvku s nelineární indukčností (např. transformátoru) jsou:

- počáteční hodnota přechodového proudu
- nasycení jádra transformátoru
- počáteční náboj kondenzátoru
- okamžik zapnutí
- doba mezi vypnutím a znovu zapnutím transformátoru
- napětí zdroje (sítě)
- indukčnost a kapacita sítě

Na počátečních podmínkách a na okolnostech vyskytujících se při vzniku přechodného děje pak závisí typ chování daného obvodu. V něm pak může existovat i několik nestabilních řešení. Ferorezonance tak může nastat náhle a někdy i nepravidelně.

V některých případech tento jev sám zmizí, v jiných případech však zůstává prakticky trvale. Ferorezonance se může objevit např. při změně v konfiguraci sítě, nebo při zavádění nového technologického zařízení do provozu sítě. Podmínky pro vznik ferorezonance shrnuje např. Obr. 2.5 [6].

3 CÍLE PRÁCE

Tato práce si klade za cíl přinést na problematiku jevu ferorezonance v elektroenergetických systémech bližší, komplexnější a přesnější pohled, tedy provést analýzu různých situací v konkrétních konfiguracích elektroenergetických systémů, u kterých může vzniknout ferorezonance.

Hlavním cílem disertační práce je analyzovat příčiny vzniku ferorezonance a vytvořit nástroj pro identifikaci oblastí náchylných na vznik ferorezonance a stanovit doporučení pro bezpečný provoz těchto systémů.

K dosažení hlavního cíle práce byla stanovena strategie sestávající s řešení následujících dílčích cílů:

- Vyšetření situací a konfigurací (tzv. krizových scénářů) v elektrických sítích, ve kterých by s vyšší pravděpodobností mohl vzniknout jev ferorezonance
- Nalezení vhodného softwaru, pro simulaci a analýzu

- Analýza různých simulačních nástrojů pro řešení přechodných jevů v elektrizační soustavě a jejich vzájemné srovnání a to z hlediska rychlosti simulace, efektivity a stability výpočtu simulačních kroků
 - Podrobné srovnání vybraných simulačních nástrojů.
 - Analýza možností využití umělých neuronových sítí pro detekci ferorezonančního přepětí.
- Simulace a analýza různých možností snížení pravděpodobnosti vzniku ferorezonančního přepětí a na základě zmíněné analýzy sestavení doporučení pro provoz části elektrické sítě.
 - Nalezení limitních podmínek pro vznik ferorezonančního jevu ve vybraných částech ES a posouzení vlivu hystereze na výskyt a průběh tohoto jevu.

4 ŘEŠENÍ

Tato kapitola hledá řešení a odpovědi na problémy a cíle definované v předchozí kapitole. V první části se věnuje různým situacím a konfiguracím energetických systémů mající sklon k vzniku ferorezonance. Dále se věnuje různým softwarovým nástrojům, které lze využít pro řešení ferorezonančních jevů. Různé softwarové nástroje srovnává a vyhodnocuje dle různých kritérií a hledá odpověď na otázku, který simulační nástroj je pro řešení uvedených transienčních jevů nejefektivnější. Pomocí těchto nástrojů pak budou řešeny a analyzovány procesy v konkrétním ferorezonančním obvodu. V další části práce předkládá různé řešení pro minimalizaci pravděpodobnosti vzniku ferorezonančního přepětí.

4.1 ANALÝZA FEROREZONANČNÍHO OBVODU S VYUŽITÍM SOFTWARE PSCAD

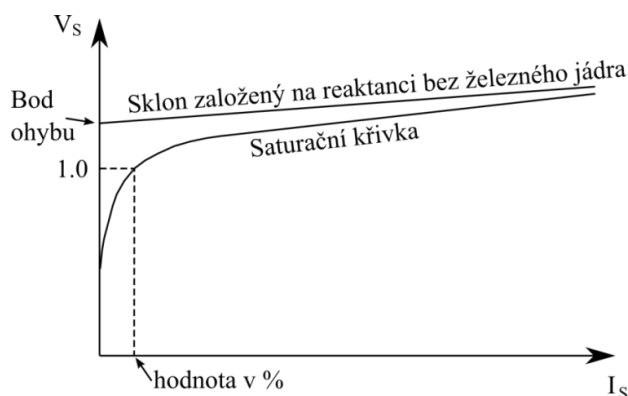
Následující kapitola obsahuje popis použití softwarového nástroje PSCAD a řadu různých řešení ferorezonančního obvodu v konkrétních situacích.

4.1.1 Model transformátoru v programu PSCAD

Softwarový nástroj PSCAD nabízí ve svých knihovnách celou řadu modelů, prvků a matematických funkcí určených pro elektroenergetiku a výkonovou elektroniku. Z pohledu studie ferorezonance nás zajímá, jak tento software definuje parametry transformátoru z hlediska jeho nelinearity. Standardní model transformátoru nalezneme v knihovně transformátorů.

Základní konfigurace modelu obsahuje parametry: výkon, frekvence, zapojení primárního a sekundárního vinutí, rozptylovou reaktanci, ztráty naprázdno, ztráty činné, odbočky na vinutí,

napětí na primárním a sekundárním vinutí (jejich RMS hodnota). Pokud nezvolíme volbu ideálního transformátoru, máme možnost nastavit parametry saturace.

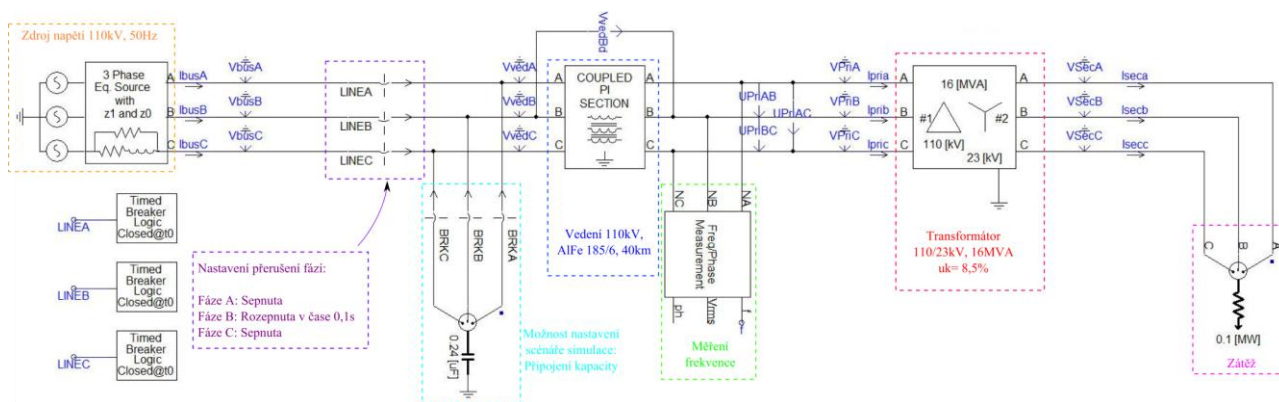


Obr. 4.1 Nastavení vlastnosti saturace

Dle Obr. 4.1 je potřeba nadefinovat parametry pro saturaci transformátoru v parametrizačním dialogovém okně. Změnou hodnoty reaktance bez železného jádra (air core reactance), upravujeme sklon asymptotické linie a hodnotou bodu ohybu (knee voltage) posouváme její průsečík s osou napětí na výše uvedeném obrázku. Nastavení hodnoty magnetizačního proudu určuje vodorovnou vzdálenost saturační křivky od napětí $U_s = 1p_j$ síťového napětí. To znamená, že zvětšující se hodnota magnetizačního proudu vede k méně ostrému kolenu saturační křivky.

4.1.2 Vznik a průběh ferorezonance trojfázového transformátoru napájeného z jedné nebo dvou fází

Teoreticky byla tato situace podrobně popsána v dříve. Pro praktickou simulaci využijeme softwarový nástroj PSCAD. Na Obr. 4.2 je znázorněno schéma experimentální sítě, pro kterou bude provedena podrobná analýza ferorezonančního jevu. Jak již bylo zmíněno, pokud je nezatížený distribuční transformátor napájen z jedné nebo ze dvou fází, je síť náchylná na vznik ferorezonance.



Obr. 4.2 Schéma částí elektrické sítě v programu PSCAD pro simulaci ferorezonančního jevu

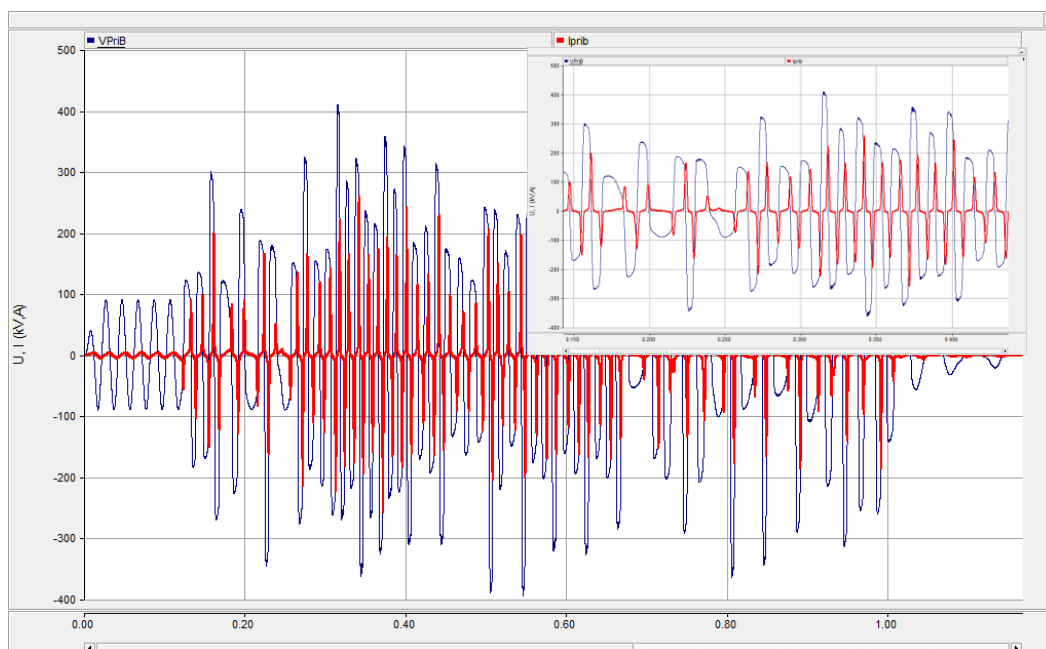
Experimentální síť je tvořena z modelů reálných síťových prvků. Zdroj představuje model tvrdé sítě s napětím 110 kV. Model vedení nahrazuje reálné vzdušné 110 kV vedení, o délce 40 km s lanem AlFe 185/6. Transformátor s převodem 110/23 kV o výkonu 16 MVA v zapojení Dyn je reprezentován modelem s možností definovat saturační křivky, jak již bylo uvedeno výše v textu. Síť obsahuje programovatelný prvek *Time Breaker Logic*, pomocí kterého můžeme naprogramovat scénář pro rozpojení jedné nebo dvou fází. Základní nastavení umožní rozpojit fázi B v čase 0,1 s od začátku simulace.

Standardní nastavení prostředí a prvků v programu PSCAD označuje jednotlivé fáze písmeny A, B a C namísto L1, L2 a L3. I když grafiku a popis každého prvku v programu PSCAD lze editovat, bylo pro tento případ zejména z důvodu přehlednosti ponecháno původní nastavení programu.

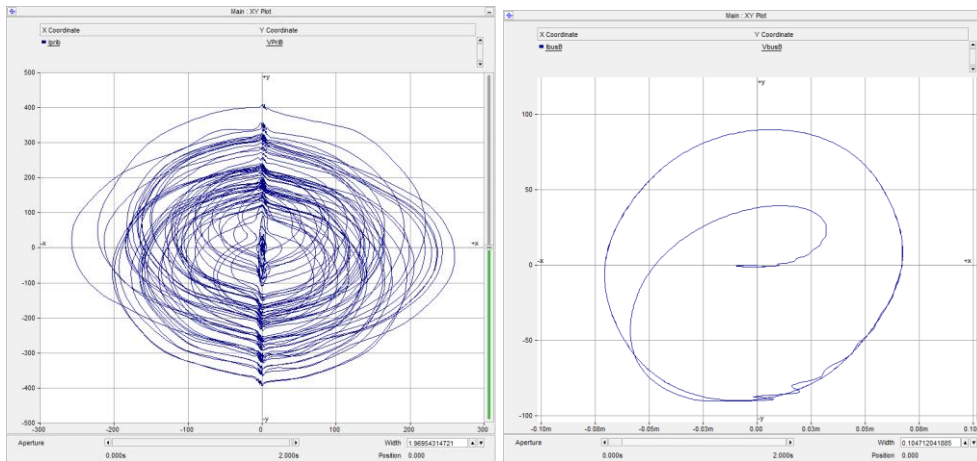
V prvním kroku bude provedena analýza výchozí konfigurace a nastavení zmíněné experimentální sítě. Nastavení parametrů je voleno tak, aby došlo k naplnění podmínek pro vznik ferorezonančního jevu, tj. systém obsahuje zdroj napětí, kapacitu, indukčnost s feromagnetickým jádrem a také nízké ztráty minimalizují útlum vzniklých oscilací.

Na Obr. 4.3 je zobrazen průběh napětí na primární straně transformátoru při ferorezonančním jevu, včetně detailního zobrazení průběhu. Odepnutí jedné fáze je scénářem nastaveno na čas 0,1 s. Při dané konfiguraci dojde k útlumu ferorezonance po době 0,9 s trvání jevu. Špičky napětí dosahují hodnot přes 400 kV, což je více než 4,5 násobek jmenovitého napětí.

Následující obrázky jsou generovány z programu PSCAD. Ten umožňuje exportovat vybraný obrázek, pouze jako bitmapu, kterou dále nelze editovat. Z toho důvodu se může stát, že legenda obrázků nebude dobře čitelná, proto bude každý obrázek, nebo série obrázků průběžně komentována.

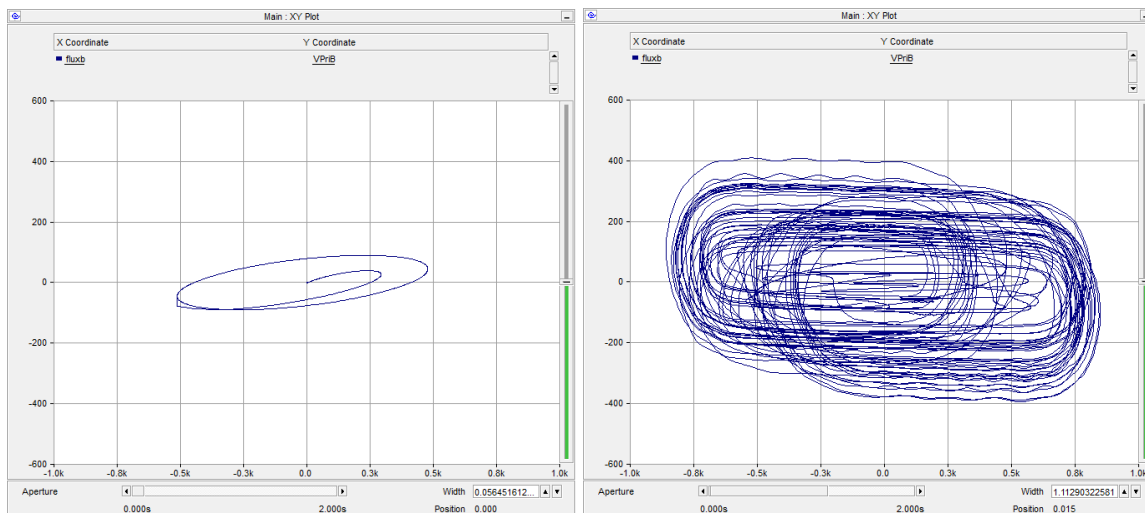


Obr. 4.3 Průběh napětí (modrá) a proudu (červená) při ferorezonančním jevu a jeho srovnání s harmonickým průběhem



Obr. 4.4 Srovnání vývoje fázového prostoru při ferorezonančním jevu (vlevo) a bez ferorezonance (vpravo)

Deformace průběhu proudu je způsobena značnou nelinearitou v obvodu. Maximální hodnoty proudu při jevu ferorezonance mohou dosáhnout až 65 násobku maximálních hodnot proudu při normálním stavu. Z důvodu deformace průběhu proudu nelze tvrdit, že o stejnou hodnotu se zvýší i energie neboli účinek tohoto proudu. Pro kvalitativní posouzení dynamického systému lze použít mimo jiné i zobrazení fázového prostoru (Obr. 4.4). Na pravé části obrázku je znázorněn fázový prostor pro normální bezporuchový průběh. V ideálním případě je fázový prostor pro sinusový průběh ve tvaru kruhu. V případě uzavřených elypsoidů lze považovat systém za stabilní. V levé části Obr. 4.4 je zobrazen fázový prostor při ferorezonančním jevu. Simulovaný případ ferorezonance je stabilní, pouze dochází k zvětšení fázového prostoru a jeho deformaci.

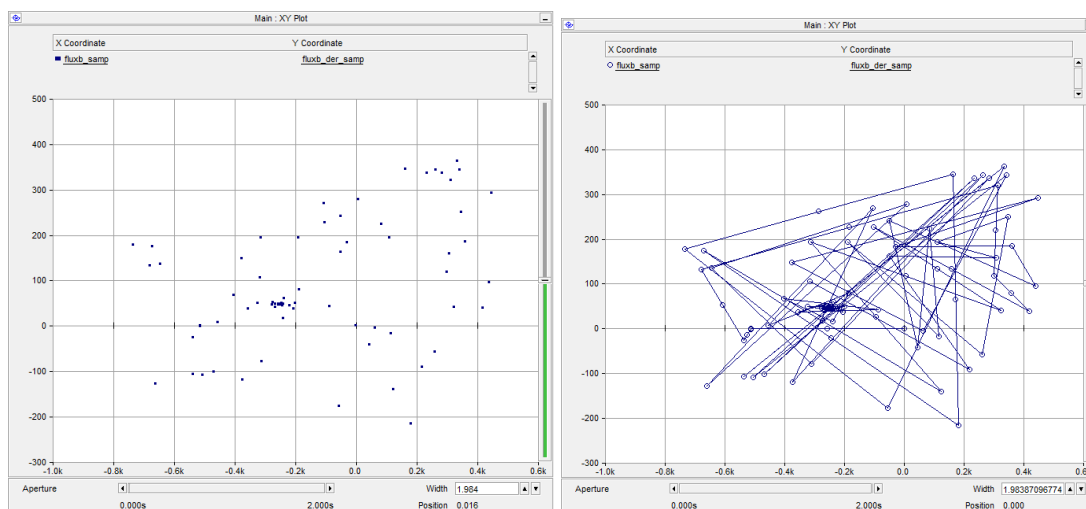


Obr. 4.5 Zobrazení vývoje fázového prostoru bez ferorezonance (vlevo) a s ferorezonancí (vpravo)

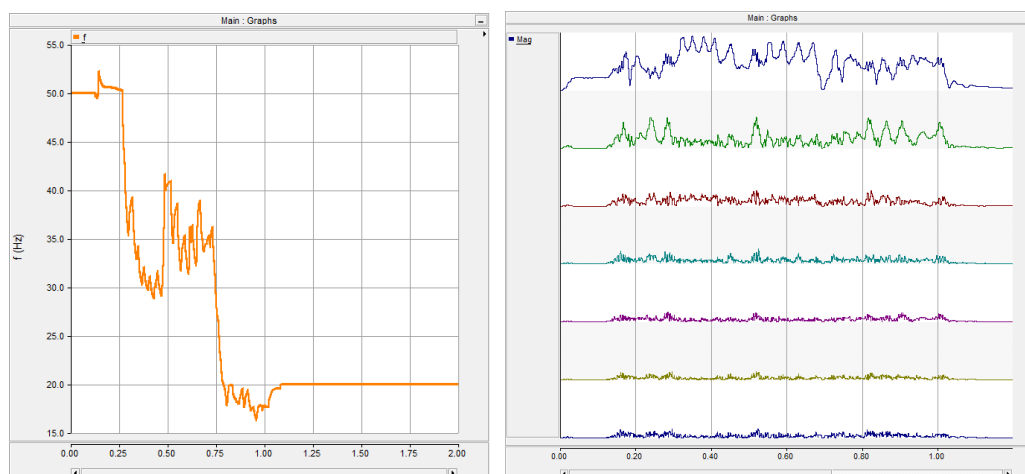
Podobně jako u fázového prostoru (závislost napětí a proudu) lze znázornit i závislost magnetického toku na napětí (Obr. 4.5). Pro sinusový průběh magnetického toku má fázový prostor tvar elipsy, jak je vidět na obrázku vlevo. Ferorezonance fázový prostor deformuje a po odeznění ferorezonančních oscilací se vrací do ustáleného stavu. Nejvhodnější způsob popisu dynamického systému je poincarého zobrazení. Podrobně byla tato metoda popsána v kapitole 2.1. Poincaré zobrazení simulovaného případu lze vidět na Obr. 4.6. První obrázek vlevo nahoře

znázorňuje celkové zobrazení průběhu simulace (od 0 do 2 s). Následně obrázek vpravo znázorňuje jeho postupný vývoj. Z poincarého zobrazení lze usoudit, že se jedná o kvaziperiodické až chaotické oscilace následně utlumené do nového stabilního stavu. Jejich rozkmit má strmý nárůst (do 2 period) a útlum je pozvolnější (8 period).

Vzhledem k přítomnosti subharmonických a kvaziperiodických oscilací, je vhodné zobrazit i vývoj frekvence ferorezonančního přepětí (Obr. 4.7). Časový vývoj frekvence je znázorněn na obrázku vlevo. Frekvence v průběhu ferorezonance klesne a osciluje kolem 35 Hz a následně klesne pod 20 Hz. Přípustné krátkodobé změny frekvence napětí nesmí překročit interval od 47 Hz do 52 Hz. Obr. 4.7 vlevo znázorňuje průběh prvních 7 harmonických samostatně (seřazené postupně se zhora směrem dolů).



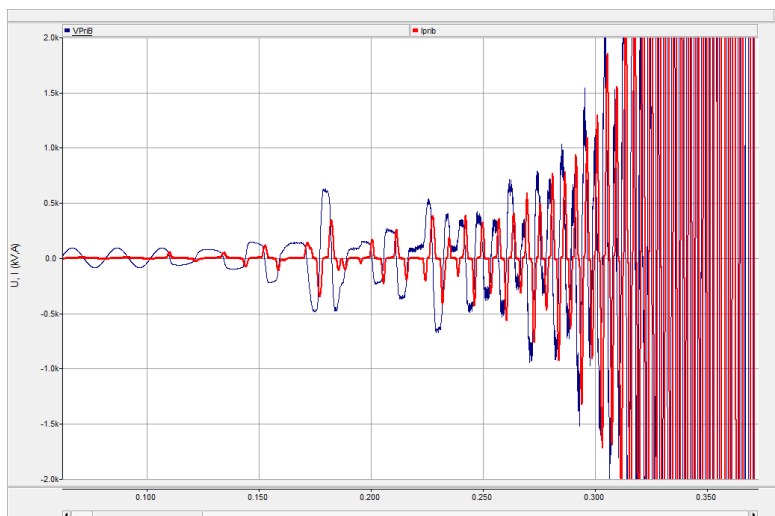
Obr. 4.6 Poincaré zobrazení



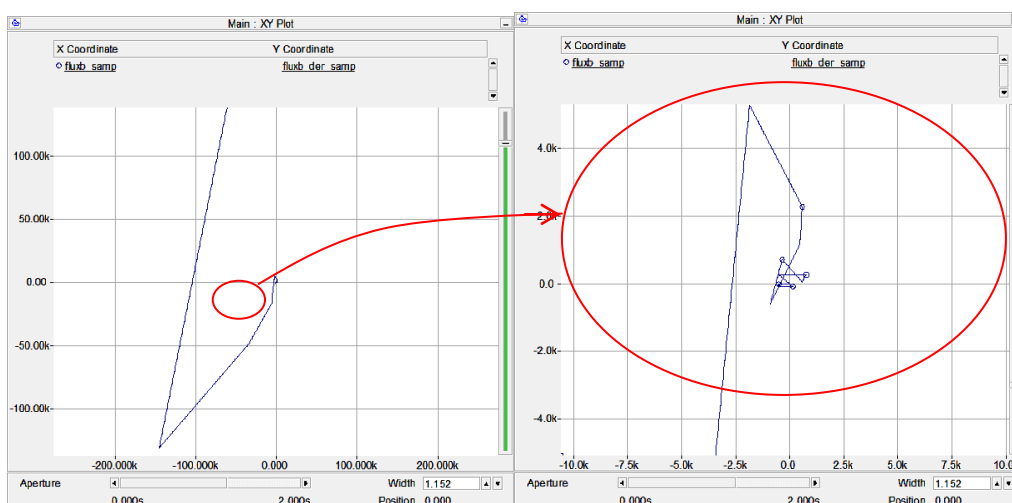
Obr. 4.7 Vývoj frekvence napětí při ferorezonanci a harmonických složek

V případě současného odpojení dvou fází může být situace daleko kritičtější. Následná série obrázků některých průběhů je účelná pro vyobrazení pohledu na ferorezonanci, kterou samotná elektrická síť není schopna utlumit, přičemž proudy a napětí dosahují až destruktivních hodnot.

Parametry sítě zůstávají stejné. Pouze v čase 0,1 s trvání simulace dojde k rozpojení fází A a B (L1 a L2). Dle průběhů napětí a proudu (Obr. 4.8) lze usoudit, že nárůst amplitud je exponenciální po uplynutí 0,15 s od rozepnutí fází. Zobrazení na Obr. 4.9 nejlépe znázorňuje vývoj ferorezonance.



Obr. 4.8 Časový vývoj napětí (modrá) a proudu (červená) při ferorezonanci

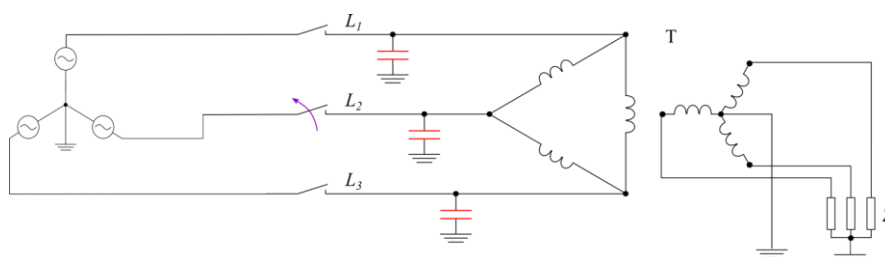


Obr. 4.9 Časový vývoj poincerého zobrazení

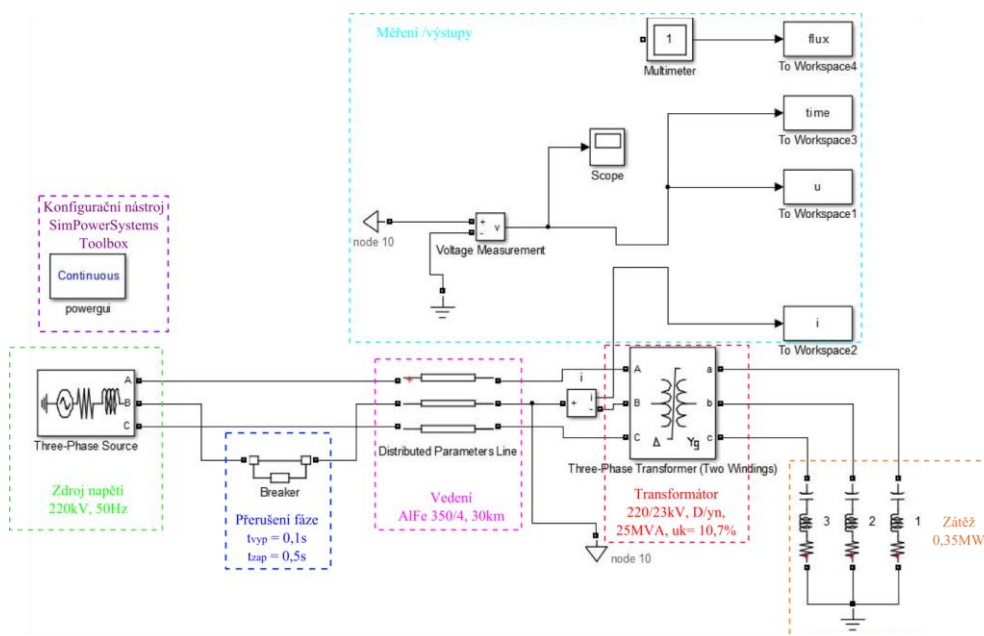
4.2 ANALÝZA FEROREZONANČNÍHO OBVODU S VYUŽITÍM SOFTWAREMATLAB SIMULINK

Jak již bylo uvedeno, program MATLAB simulink představuje velice účinný nástroj a celou řadu možností pro simulování různých jevů v energetických systémech. Cílem této kapitoly je posoudit možnosti softwarového nástroje simulink a možnost využití pro posouzení vlivu hystereze na vznik a průběh ferorezonančního jevu. Výchozí situace představuje výkonový transformátor napájený přes dvě fáze.

Obr. 4.11 zobrazuje simulační schéma v programu matlab simulink. Ve fázi B (L2) je zařazen programovatelný prvek, určený pro nadefinování scénáře simulace. Konkrétně dojde k rozepnutí fáze B (L2) v čase 0,1 s. V případě potřeby lze vytvořit i větší počet zásahů.



Obr. 4.10 Simulovaný energetický systém – Výkonový nezatížený (příp. minimálně zatížený) trojfázový transformátor napájený přes dvě fáze



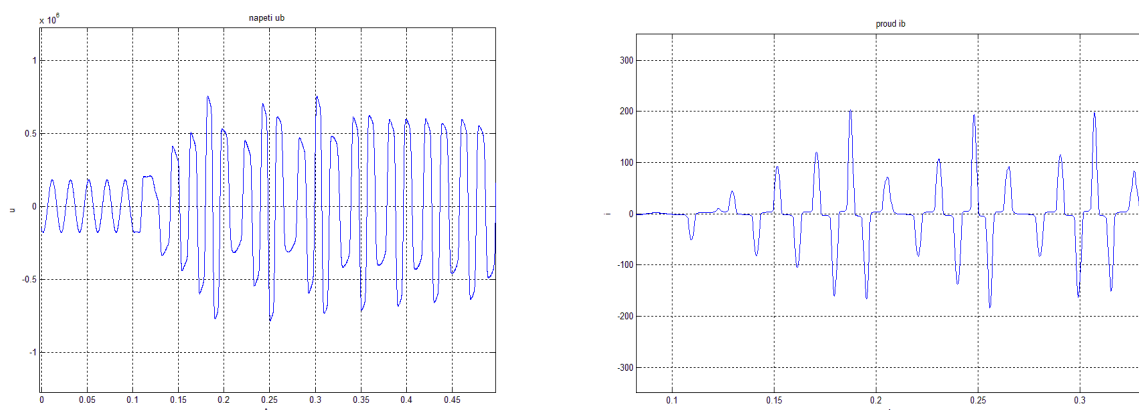
Obr. 4.11 Schéma v programu matlab simulink s definovanými výstupy

4.2.1 Simulace s uvažováním hystereze transformátoru

V základu jsou programy PSCAD a Matlab simulink velice podobné. Hlavní rozdíl je v modelech síťových prvků, které jsou součástí knihoven programů. Nástroj určený na konfiguraci parametrů simulace se nazývá „powergui“. Jednou z mnoha položek je nástroj „Powergui Hysteresis Design Tool“, který umožňuje nastavení tvaru hysterezní smyčky. Pro simulaci je pak možné nastavit počet elementárních segmentů určených pro výpočet, v závislosti na přesnosti výpočtu, remanentní magnetický tok, a dále je možné definovat oblast nasycení a další parametry. Případně lze načíst model hystereze z „m-file“. Simulovaná soustava má následovné parametry:

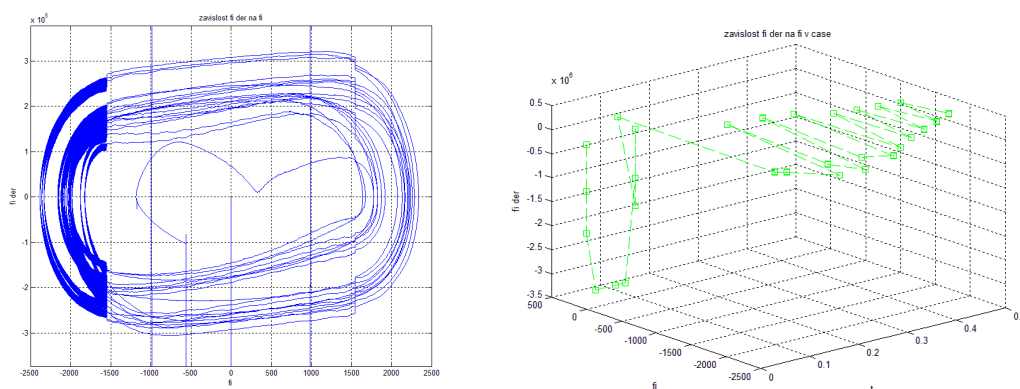
Transformátor 220/23 kV, D/y_N, 25 MVA, $u_k = 10,7 \%$, vedení AlFe 350/4, 30 km, zatížení transformátoru je 0,35 MW.

Průběh napětí při simulaci ferorezonance je znázorněn na Obr. 4.12. Fáze B (L2) je v čase 0,1 s rozpojena a spojena v čase 0,5 s. V maximálních hodnotách napětí při ferorezonančních oscilacích dosahuje přes 700 kV. Průběh je kvaziperiodický až chaotický. Obr. 4.12 vpravo znázorňuje časový průběh proudu. V detailnějším zobrazení je možno pozorovat deformace proudu, způsobené saturací a hysterezí. V maximálních hodnotách dosahují až 200 A.



Obr. 4.12 Průběh napětí u_b , a proudu i_b při ferorezonanci

V Obr. 4.13, kde je znázorněn detailní pohled včetně poincarého zobrazení. Na základě tohoto zobrazení a jeho vývoje v čase (obr. vpravo), lze usoudit, že kvaziperiodická oscilace je ustálená a nejeví náznak nekontrolovatelného růstu, spíše postupného útlumu. Třírozměrné znázornění vývoje poincarého zobrazení nám nabízí přehlednější pohled na průběh ferorezonančního jevu.



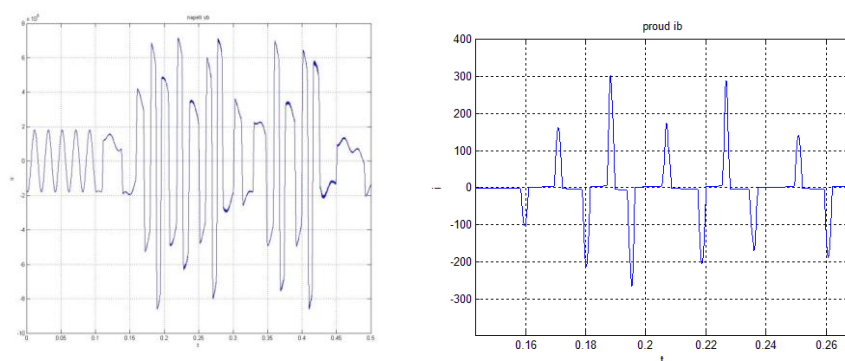
Obr. 4.13 Fázový prostor Φ'_b , Φ_b při ferorezonanci a vývoj poincarého zobrazení

4.2.2 Simulace bez uvažování hystereze transformátoru

Dalším plánovaným krokem analýzy systémů, náchylných na vznik ferorezonance, je posoudit vliv hystereze na průběh ferorezonančního jevu. Pro tuto potřebu již model transformátoru

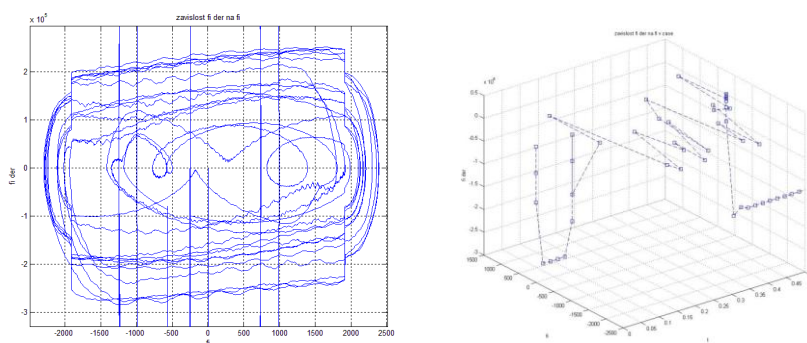
neuvažuje hysterezi, ale pouze saturaci. Saturace, jak již bylo uvedeno, má nejvýraznější vliv na nelinearitu indukčnosti transformátoru. Vzhledem k tomu, že použití modelu transformátoru s hysterezí výrazně prodlužuje čas nutný na výpočet simulace, vyvstává otázka, jestli je nutné hysterezi v modelu transformátoru uvažovat pro posouzení výskytu ferorezonančního jevu. Touto otázkou se zabývá více autorů (např. [12], [16], [17]), kteří se shodují na vhodnosti využití modelu transformátoru bez uvažování hystereze pro praktické simulace.

Pro možnost srovnání byly simulace provedeny se stejnou konfigurací a parametry prvků soustavy jako v předchozí kapitole. Průběh napětí je znázorněn na Obr. 4.14. Amplituda napětí dosahuje hodnot téměř 700 kV. K utlumení oscilací dojde přibližně po 0,4 s. Průběh proudu vykazuje typické deformace, jak je vidět v Obr. 4.85 vpravo. Maximální hodnoty proudu dosahují při největších oscilacích přibližně 300 A.



Obr. 4.14 Průběh napětí u_b , při ferorezonanci bez uvažování hystereze

Znázorněný detail na Obr. 4.89 představuje fázový prostor při ferorezonančním jevu. Dle poincarého zobrazení (Obr. 4.15) lze usoudit, že ferorezonanční oscilace jsou poměrně ustálené a vývoj nenaznačuje jejich výrazné zvýšení. Dle časového vývoje poincarého zobrazení lze konstatovat, že ferorezonanční jev se časem utlumuje.



Obr. 4.15 Fázový prostor Φ'_b , Φ_b při ferorezonanci a vývoj poincarého zobrazení bez uvažování hystereze

4.3 MOŽNOSTI SNÍŽENÍ PRAVDĚPODOBNOSTI VZNIKU FEROREZONANČNÍHO JEVU

Snížení rizika vzniku ferorezonančních oscilací s sebou nese předpoklad, provést měření pro množství různých typů konfigurací elektroenergetických systémů a jednotlivých parametrů. Teplotní a dielektrické namáhání, nebezpečná pro elektrická zařízení, jsou pak důsledkem ferorezonance, resp. přepětí a nadproudů při ní vznikajících. U elektrických zařízení tak může docházet např. k poruchám, snížení životnosti izolace a izolačních schopností.

Možnému vzniku ferorezonančních oscilací můžeme předcházet dodržováním následujících principů, vedoucích k praktickým řešením:

- Vyhnout se při návrhu konfigurací elektroenergetického systému a/nebo spínacím operacím, které jsou náchylné ke vzniku ferorezonancí, což vede k zákazu určitých konfigurací systému a/nebo spínacích operací případně určitých spínacích přístrojů.
- Přesvědčit se o hodnotách parametrů systému, že se v žádném časovém úseku vůbec nenachází v rizikových oblastech, popř. zabezpečit určité bezpečnostní pásmo, kdy jsou hodnoty parametrů od rizikových oblastí vzdálené.
- Přesvědčit se o velikosti zdrojem dodávané energie, že nedostačuje k udržení ferorezonance. Cílem je zamezit vzniku ferorezonance utlumením, neboli přivedením ztrát, a to vložením rezistoru či zvětšením zátěže.

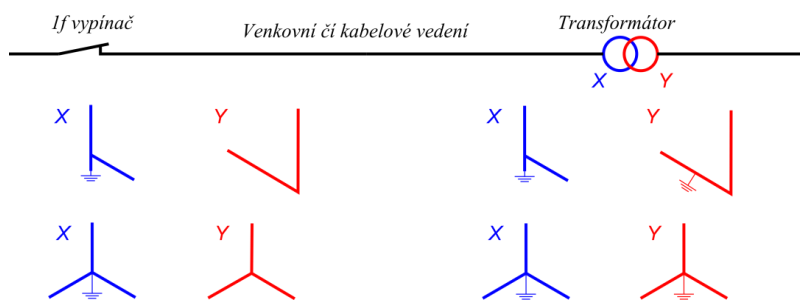
V této kapitole je jedno z nich popsáno. Další doporučení jsou uvedena v hlavním dokumentu dizertační práce.

4.3.1 Trojfázový výkonový transformátor napájený z jedné nebo ze dvou fází

Možnému vzniku ferorezonančních oscilací objevujících se při napájení trojfázového výkonového transformátoru z jedné nebo dvou fází, můžeme předcházet dodržováním následujících principů, které vedou k praktickým řešením:

- Nezapínat transformátor bez zatížení.
- Udržovat velikost hodnoty kapacity mezi transformátorem a vypínačem pod kritickou hodnotou (příkladem je umístění vypínače blíže k transformátoru).
- Vyhnout se, při dodávce činného výkonu transformátoru menší než 10% jeho jmenovitého zdánlivého výkonu, provozu transformátoru.
- Jednofázové operace nebo ochranu pojistkami zakázat. Jejich zapůsobení pouze v jedné fázi by vedlo k jednofázovému vypnutí.
- Na zapojení „kabel-transformátor“ neprovádět práce pod napětím, v případě kdy délka kabelu přesahuje určitou kritickou mez.
- Nulový bod transformátoru, s primárním vinutím zapojeným do hvězdy (nulový bod je přístupný) uzemnit přímo nebo přes rezistor (nastálo/po dobu nabíjecích a vybíjecích operací).
- Pokud se nelze vyhnout nepříznivým podmínkám, je vhodné použití svodičů přepětí (jinými slovy bleskojistek) za použití předřazeného tlumicího rezistoru.

Na Obr. 4.16 je zobrazeno spojení dvou transformátorů, jež budou bránit vzniku ferorezonance za určitých podmínek. Větší měrou se tímto zabývá [N1].



Obr. 4.16 Zapojení vinutí transformátoru, která jsou méně náchylná na vznik ferorezonance

5 ZÁVĚR

Elektrizační soustava je vzhledem k velkému počtu prvků v systému, jako jsou transformátory, vzdušné a kabelové vedení, různé ochranné a měřicí prvky a různé typy zátěží, velmi složitý systém. Každý prvek více nebo méně ovlivňuje chování systému a z globálního pohledu, např. ENSO-E, se tento systém jeví po lidském mozku jako ten nejsložitější na světě přičemž modelování celého systému v detailech prakticky není v současné době možné. Z tohoto důvodu je nutné při vyšetřování některých jevů nahlížet na elektrizační soustavu lokálně, tj. uvažovat v detailech konkrétní část (oblast), ve které se projeví sledovaný jev a pro zbytek soustavy použít vhodnou náhradu.

V poslední době je kladen stále větší důraz na ekonomickou stránku provozu a návrhu elektrické soustavy. Levnější provoz má za cíl zejména minimalizovat ztráty a celkově optimalizovat přenos elektrické energie. Snižováním ztrát dosáhneme nižších provozních nákladů a je pravděpodobné a současně i žádoucí, že bude tento trend pokračovat i do budoucna. Každý rok jsou vyvíjeny nové technologie a materiály, které umožňují tento cíl naplňovat. Současně s ohledem na trvale udržitelný rozvoj společnosti rostou nároky na minimalizaci materiálové náročnosti zařízení, což obecně vede k trendu provozovat zařízení na hranici technických limitů.

Z hlediska různých přechodných jevů v elektrizační soustavě není trend snižování ztrát tak pozitivní. Snižováním ztrát energetický systém ztrácí schopnost účinně tlumit různé přechodné jevy, mezi které patří i ferorezonanční jev. Většina prvků elektrizační soustavy má lineární případně kvazilineární charakteristiku, ale v případě prvků se železným jádrem (transformátory a reaktory) je charakteristika feromagnetického materiálu vysoce nelineární. Další prvky způsobující nelinearitu jsou kabelové vedení, dlouhé vedení, řídicí kapacita vypínačů, kapacitní transformátory napětí a sériové či paralelní kondenzátorové baterie. Tyto prvky mohou způsobovat vznik ferorezonance v systému, což vede k deformaci průběhů a nebezpečně vysokým hodnotám napětí a proudu v systému.

Ferorezonance vzniká při přesycení feromagnetického jádra transformátoru, kdy se projeví jeho nelinearita. Z toho důvodu je tento jev podmíněn nízkým zatížením transformátorů, při kterém snadněji dochází k jeho saturaci. V normálním provozu této podmínce vyhovují měřicí

transformátory napětí. Ve speciálních situacích mohou být zatíženy malým výkonem i výkonové (přenosové) transformátory. Množství možných konfigurací náchylných k ferorezonanci je celá řada. V kapitole 4.1 byly popsány a analyzovány některé z nich.

Nelinearita indukčnosti není jediná podmínka vzniku ferorezonančního jevu. Ferorezonance může obecně vzniknout v systémech kde je přítomen zdroj napětí, kapacity, nelineární indukčnosti a již zmíněné malé ztráty. Dle obr. 2.19 musí nastat určitá „rovnováha“ parametrů systému, na kterou mají výrazný vliv počáteční podmínky uvedené v kapitole 2.3.2. Samotné ferorezonanční oscilace jsou většinou vyvolány různými přechodnými jevy v soustavě jako jsou například spínací operace nezatížených transformátorů a vedení, atmosférická přepětí a poruchy izolace.

Chování nelineárního dynamického systému lze řešit pomocí různých zjednodušených analytických a numerických metod. Rozlišujeme čtyři základní ferorezonanční oscilace: harmonickou, subharmonickou, kvaziperiodickou a chaotickou. Pro každou z nich je charakteristický tvar poincarého zobrazení. Poincarého zobrazení nám umožňuje posoudit konkrétní ferorezonanční jev. Jedna z důležitých otázek je, pokud ferorezonance nastane, jestli systém po nějaké době trvání dokáže ferorezonanci účinně utlumit nebo budou amplitudy oscilací nekontrolovatelně narůstat. V takovém případě může dojít k nebezpečnému tepelnému i dynamickému namáhání. Vzhledem k tomu, že zařízení nejsou na vzniklé situace dimenzovány, může dojít k jejich poškození (viz příloha 2). S ohledem na tyto skutečnosti je zřejmé, že je nutné se jevem ferorezonance v elektrických sítích zabývat a možná rizika vzniku tohoto jevu minimalizovat.

5.1 CÍLE PRÁCE A JEJÍCH SPLNĚNÍ

5.1.1 Nalezení vhodného softwaru

Pro analýzu ferorezonančního jevu, lze použít celou řadu softwarových simulačních nástrojů. Práce popisuje vlastnosti několika vybraných nástrojů. Konkrétně byly prozkoumány možnosti softwarů PSCAD, Matlab/simulink, ATP EMTP, Dynast, Dymola, ETAP, EasyPower, PowerCAD, MathPower a Octave. Všechny uvedené nástroje umožňují simulovat nelineární dynamický systém a až na Matlab/simulink a Octave jsou všechny zaměřeny výhradně na elektrotechniku. Matlab a Octave, jsou univerzálními nástroji, pro matematické modelování a simulace.

Volba softwaru vycházela z kritérií popsaných v kapitole 4.2.11. Jedním z hlavních kritérií byla komplexnost a dostatečná nabídka matematických modelů prvků elektrizační soustavy. V tomto ohledu je nutné, aby byly modely rozumně přesné a reprezentovaly reálné chování prvků. Z pohledu modelování ferorezonančního jevu se klade největší nárok na model transformátoru, jako nelineárního prvku. U programu MATLAB/Simulink SimPowerSystems Toolbox, lze definovat hysterezi pomocí 32 až 512 menších lineárních segmentů, což umožní velmi přesný popis této charakteristiky. Nevýhodou je ale prodloužení strojového času simulace. Saturace je popsána stejným způsobem, ale nevyžaduje tak komplikovaný matematický model. Strojový čas, potřebný na simulaci s uvažováním hystereze je prakticky více jak dvojnásobný ve srovnání s

matematickým modelem s uvažováním saturace bez hystereze. To představuje velkou časovou úsporu.

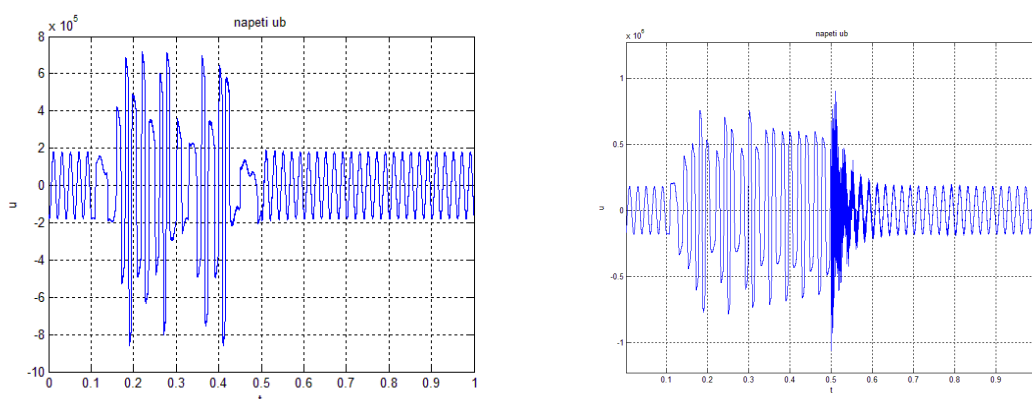
Nevýhodou modelu transformátoru simulačního nástroje MATLAB simulink – SimPowerSystems toolbox je, že pro výpočet vyžaduje krátký krok výpočtu. Simulink, umožňuje automatické nastavení kroku, co v oblasti lineární části charakteristiky výpočet značně zrychlí, ale ne dostatečně. V případě nastavení fixního simulačního kroku, dochází často k nestabilitě simulace.

Další možnost nabízí simulační software PSCAD. Způsob definování saturační křivky byl popsán v kapitole 4.3.1. I když metoda aproximace saturační křivky lineárními funkcemi se na první pohled jeví jako nepřesná, pro analýzu možnosti vzniku ferorezonančního jevu je postačující. Další vhodným krokem, navazující na poznatky popsané v této kapitole, by bylo ověřit tyto tvrzení měřením, které je, s ohledem na nebezpečné hodnoty měřených veličin, velmi náročné na přípravu.

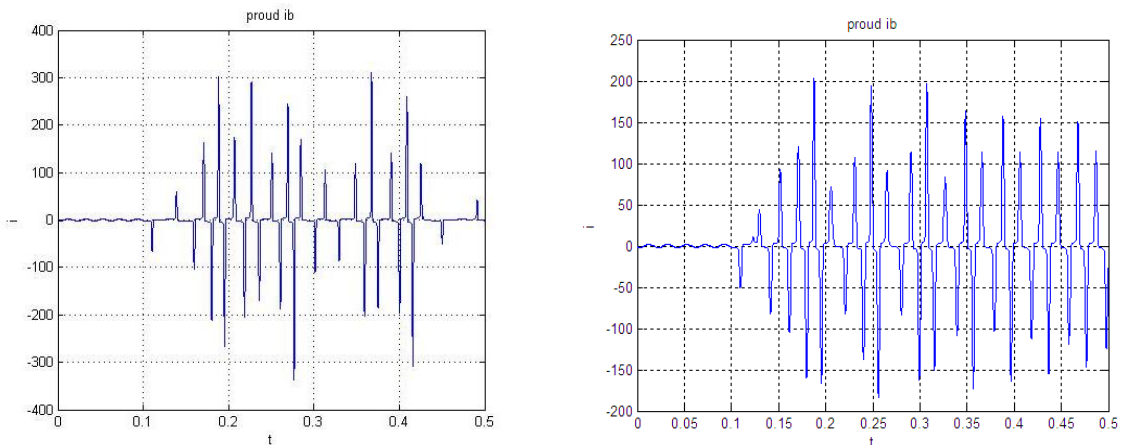
Významné využití v této problematice mají i neuronové sítě. V současné době existují nástroje založené na umělých neuronových sítích schopné s vysokou přesností detekovat ferorezonanční jev sítě a následně dát pokyn k vytvoření dalších opatření k utlumení ferorezonančních oscilací. Konkrétní popis metody detekce uvádí kapitola 4.5.2.

5.1.2 Vliv hystereze na výskyt a průběh ferorezonančního jevu

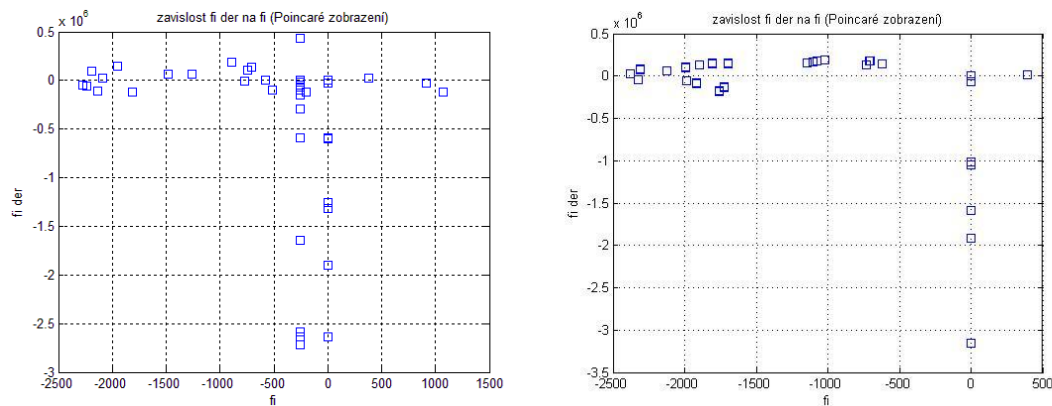
Kapitola 4.4 se zabývá srovnáním použitých modelů s hysterezí a bez hystereze. Z provedených simulací vyplývá, že uvažování hystereze nemá téměř vliv na posouzení, jestli ferorezonanční jev v energetickém systému nastane nebo nikoliv. Samozřejmě má vliv na časový průběh a amplitudu simulovaných veličin, jak již plyne z obr. 2.18. V konkrétním simulovaném případě byly maximální hodnoty proudu o 100A větší, při zanedbání hystereze. Maximální hodnoty napětí byli téměř stejné.



Obr. 5.1 Průběh ferorezonančního přepětí bez uvažování hystereze (vlevo), s uvažováním hystereze(vpravo)



Obr. 5.2 Průběh proudu bez uvažování hysterese (vlevo), s uvažováním hysterese (vpravo)



Obr. 5.3 Fázový prostor (Φ'_b, Φ_b) - Poincarého zobrazení; bez uvažování hysterese (vlevo), s uvažováním hysterese (vpravo)

Výsledky simulace s uvažováním hysterese a bez ní je vidět na obr. 5.1 a obr. 5.2. Podstatnější rozdíl je v délce trvání ferorezonančního jevu. Scénář modelové situace definoval opětovné sepnutí fáze B (L2) v čase 0.5 s. Z toho důvodu je u simulace s uvažováním hysterese přítomný přepětový ráz v čase 0.5 s. Na základě výrazně podobného poincarého zobrazení (obr. 5.3), lze konstatovat, že ferorezonanční jev hysterese ovlivňuje jen natolik, že pro účely diagnostiky přítomnosti ferorezonančního jevu lze hysterese v matematickém modelu zanedbat.

5.1.3 Vyšetření krizových scénářů v ES

V kapitole 4.3.2 byla pomocí nástroje PSCAD podrobně rozebrána situace s nezatíženým třífázovým transformátorem napájeným z jedné nebo dvou fází. U systému byly vyřešeny průběhy napětí a proudu na VVN a VN straně, dále úbytek napětí na vedení a velikost napětí na začátku vedení. Analýza obsahuje řadu zobrazení pro vyhodnocení chování jako například fázový prostor. Ten je pro sinusový průběh definován jako kruh, nebo elipsa. Ferorezonance tento tvar deformuje a po odeznění se vrací k ustálenému elipsovému tvaru. Průběh magnetického toku měl charakteristickou deformaci. Ze sinusového průběhu se vlivem ferorezonance stal průběh s ostrými maximálními hodnotami a vyšší strmostí.

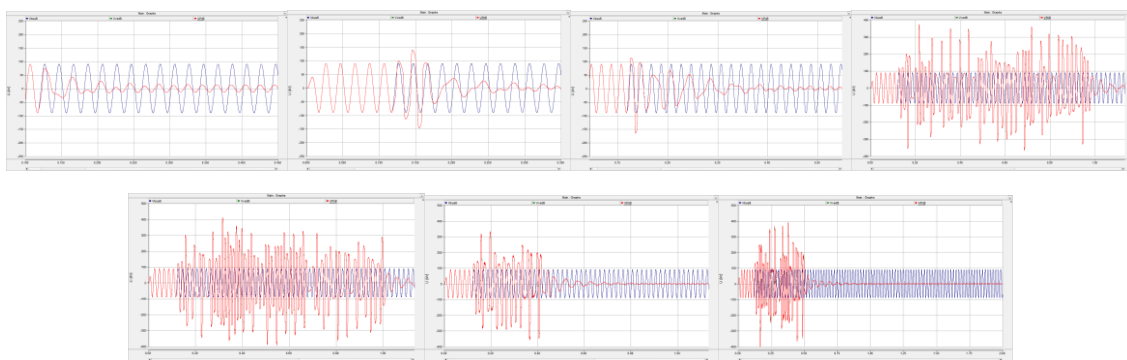
Typ ferorezonanční oscilace lze posoudit z poincarého zobrazení. Z toho důvodu je toto zobrazení základní diagnostický nástroj vývoje a chování ferorezonančního jevu. Ve většině případů se jednalo o subharmonickou oscilaci vykazující kvaziperiodické chování až chaotickou oscilaci. Další pohled na ferorezonanční oscilace nabízí harmonická analýza. Deformace proudu způsobuje výraznou třetí harmonickou složku.

5.1.4 Možnosti snížení pravděpodobnosti vzniku ferorezonance a nalezení limitních podmínek pro vznik ferorezonančního jevu

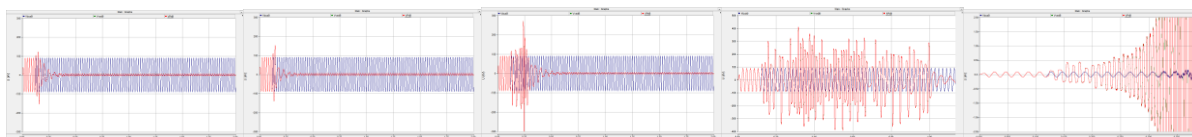
Po zmíněné analýze byl vyšetřen vliv různých parametrů na průběh ferorezonančního jevu. Pro danou konfiguraci bylo cílem najít takové parametry prvků systému, aby systém dokázal ferorezonanci účinně tlumit, nebo ještě lépe, aby k ní ani nemohlo dojít. Kompletní analýza tohoto problému je provedena v kapitole 4.3.2.

První měněný parametr byl délka vedení VVN. Nezatížené, nebo jen minimálně zatížené vedení představuje kapacitu, která se může dostat do rezonance s indukčností transformátoru. Byly provedeny simulace pro délky 10, 20, 30, 35, 40, 50, 60 km s lanem AlFe185/6. Výskyt delších vedení 110kV je ojedinělý a proto nebyly větší délky uvažovány. Kapacita narůstá s délkou vedení. Tlumící vlastnosti vedení se při nízkém zatížení prakticky neprojeví. Nejvýraznější oscilace vykazovala simulace při délkách vedení 35 a 40km (obr. 5.4). Na obrázku je průběh napětí na transformátoru znázorněn červeně a pro srovnání je průběh napětí zdroje znázorněn modře.

Další parametr, který výrazně ovlivnil průběh ferorezonančního jevu je zatížení transformátoru. Výraznější hodnoty přepětí se začali projevovat při hodnotách zátěže pod 0,15 MW. To představuje při transformátoru o výkonu 16MVA přibližně 1% jmenovitého výkonu (obr. 5.5).

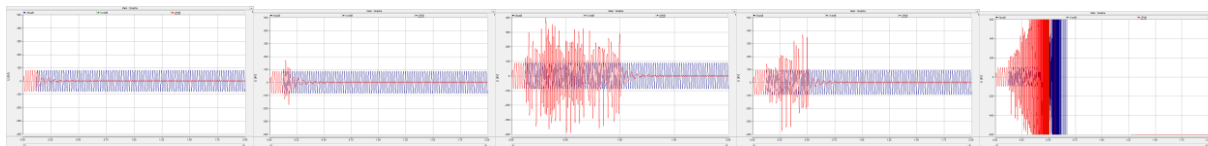


Obr. 5.4 Průběh napětí při délkách vedení 10, 20, 30, 35, 40, 50, 60km



Obr. 5.5 Průběh napětí při zatížení transformátoru 0,25; 0,2; 0,15; 0,1; 0,05 MW

Výrazný vliv na průběh ferorezonančního jevu má i způsob zapojení vinutí transformátoru. Jako nejodolnější se jeví zapojení transformátoru s uzemněnou hvězdou na primárním vinutí ($Y_N/y_N, Y_N/y$). Další výrazný faktor je napětí obvodu (obr. 5.6). S případným nadpětím roste riziko vzniku ferorezonance. Tato závislost není lineární. Při hodnotách napětí zdroje (nebo napájecího uzlu) kolem 10% a víc, výrazně vzroste riziko vzniku ferorezonance.



Obr. 5.6 Průběh napětí na primární straně transformátoru při změnách napětí sítě (zdroje):
 $10\%U_n, -5\%U_n, U_n, +5\%U_n, +10\%U_n$

5.2 PŘÍNOSY DISERTAČNÍ PRÁCE A SHRUTÍ VĚDECKÝCH POZNATKŮ

Při řešení dané problematiky byla provedena řada různých simulací ve více variantách obdobných scénářů konfigurací částí elektrické sítě náchylných na vznik ferorezonance.

Prvním krokem k naplnění cílů bylo najít účinný a efektivní nástroj pro modelování ferorezonančního jevu. Pro tento účel se ze zkoumaných nástrojů jako nejvhodnější software jeví PSCAD. Samozřejmě se jedná o řešení s určitou tolerancí přesnosti. Avšak, pro potřeby projektantů VN a VVN systémů představuje PSCAD efektivní nástroj pro analýzu pravděpodobného vzniku ferorezonance v navrhovaných systémech, případně pro návrh opatření proti vzniku ferorezonance u provozovaných systémů.

Zmíněné opatření pro omezení ferorezonančních jevů jsou dalším přínosem této práce. Kapitola 4.6 podrobně popisuje možnosti snížení pravděpodobnosti vzniku ferorezonance pro různé konfigurace. Praktické simulace a limitní podmínky byly vyšetřeny pro energetický systém s třífázovým výkonovým transformátorem napájeným z jedné nebo dvou fází. Doporučení pro tento systém jsou uvedena v kapitole 4.6.1. Tyto i další doporučení jsou podloženy simulacemi a výpočty.

V soustavách VVN se pro eliminaci přechodných poruch používají automatiky OZ (opětovného zapnutí). Je možné že, působení jednofázových automatik OZ (odpojení jedné nebo dvou fází) vyvolá v uvedené konfiguraci ferorezonanční jev. Z toho důvodu je nutné v konfiguracích náchylných k ferorezonanci použít třífázové OZ (a to i s vědomím většího vlivu třífázového OZ na stabilitu elektrizační soustavy). Z hlediska ferorezonance je snaha čas opětovného zapnutí snížit na minimum. Při kratší době působení časů OZ vzniká pravděpodobnost znovu zapálení elektrického oblouku v místě poruchy. Z toho důvodů je nutné najít optimální čas (obvykle v intervalu od 0,1 s po 0,3s), při kterém nedojde k znovu zapálení oblouku a také nedojde k rozvinutí ferorezonančního jevu. K těmto účelům lze využít výstupy této práce.

Práce bude sloužit k poukázání na problematiku ferorezonance v energetických systémech. Velký význam a opodstatnění ji dodává potřeba určení nebezpečných stavů soustavy v situacích kdy je systém náchylný ke vzniku ferorezonančních jevů a kolapsů systému vedoucích k přerušení dodávky elektrické energie.

Výsledky této práce mají přispět ke zvýšení bezpečnosti a spolehlivosti energetických systémů jak ve fázi návrhu, tak ve fázi provozování.

5.3 DOPORUČENÍ

Riziko vzniku ferorezonance v projektovaných i stávajících částech elektrizační soustavy se s ohledem na fakta uvedená v úvodu práce a v předchozích částech kapitoly 5 zvyšuje. Kontrola na vznik ferorezonance se ale v současné době provádí spíše ojediněle a to většinou při přípravě postupů najíždění vybraných částí elektrizační soustavy po blackoutu. Systematické doporučení pro kontrolu projektovaných i stávajících částí přenosové soustavy na možnost vzniku ferorezonance prakticky chybí (v roce 2014 by snad měla být dokončena technická brožura CIGRE zpracovávaná v rámci „WG C4.307 Resonance and Ferroresonance in Power Networks and Transformer Energization Studies“, která by měla dát obecná praktická doporučení pro přenosové soustavy). V distribučních sítích se problematika ferorezonance neřeší vůbec, respektive je řešena až ex post, tedy v případě poškození zařízení. Vzhledem k ceně zařízení přenosové i distribuční soustavy a vzhledem ke vlivu ferorezonance na výpadky, tzn. na spolehlivost dodávky elektrické energie, je cena simulačního software a to i s uvažováním poměrně vysokých nároků na kvalifikaci „výpočtáře“ prakticky zanedbatelná.

Závěrečným doporučením této práce je zahrnutí kontroly projektovaných i stávajících částí elektrizační soustavy na možnost vzniku ferorezonance do standardně prováděných činností zajišťovaných ze strany provozovatele příslušné přenosové/distribuční soustavy. Kontrola by měla být prováděna vždy při výskytu některé z konfigurací uvedené v kapitole 4.1.

5.4 MOŽNOST DALŠÍHO ZAMĚŘENÍ PRÁCE

Ferorezonance je fenomén, který je v dnešní době aktuální víc než kdy jindy. I když nejnáchylnější články elektrizační soustavy, jako jsou přístrojové transformátory napětí, jsou postupně nahrazovány senzory, současný trend minimalizace materiálových nákladů na výrobu zařízení a minimalizace provozních nákladů na výrobu a přenos elektrické energie způsobuje, že se problematikou ferorezonance nelze přestat zabývat. Na základě dosud provedených výzkumných prací na pracovištích VUT v Brně a ČVUT v Praze v oblasti ferorezonance, na základě výsledků práce WG C4.307 CIGRE a na základě doplňujících výzkumů by měly následně být specifikovány standardy pro kontrolu projektovaných a stávajících energetických zařízení na možnost vzniku ferorezonančních přepětí pro provozovatele sítí v ČR.

POUŽITÁ LITERATURA

- [N1] ANSI/IEEE C57.105: 1992 IEEE Guide for Application of Transformer Connections in Three-Phase Distribution Systems.
- [2] DICK, E.P., WATSON, W. Transformer Models for Transient Studies Based on Field Measurements, IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems, 1981, Vol. PAS-100, No. 1, s. 409-419.
- [3] FERMANDES, D., NEVES, W.L.A., VASCONCELOS, J.C.A., Coupling capacitor voltage transformer: A model for electromagnetic transient studies, ELSEVIER SCIENCE SA, PO BOX 564, 1001 LAUSANNE, SWITZERLAND, 2007, vol. 77, p. 125-134, ISSN: 0378-7796
- [4] GUERRA, F.C.F., MOTA, W.S., Magnetic core model, INST ENGINEERING TECHNOLOGY-IET, MICHAEL FARADAY HOUSE SIX HILLS WAY STEVENAGE, HERTFORD SG1 2AY, ENGLAND, 2007, p. 145-151, ISSN: 1751-8822
- [5] HASMAN, T.: Přepětí v elektroenergetických soustavách, ČVUT Praha, 1997.
- [6] JAVORA, R. Analýza a simulace ferorezonančních jevů v elektroenergetických soustavách, Dizertační práce, VUT v Brně 2004
- [7] KIENY, C. Application of the Bifurcation Theory in Studying and Understanding the Global Behavior of a Ferroresonant Electric Power Circuit, IEEE Transactions on Power Delivery, 1991, Vol. 6, No. 2, s. 866-872.
- [8] MACUR, J.: Úvod do teorie dynamických systémů a jejich simulace, VUT Brno, 1995.
- [9] REINBOTH, H. Vlastnosti a použití magnetických materiálů. Praha, SNTL 1975
- [10] REZAEI-ZARE, A., MOHSENI, H., SANAYE/PASAND, M., FARHINGI, S., IRAVANI, R., Performance of various magnetic core models in comparison with the laboratory test results of a ferroresonance test on a 33 kV voltage transformer, IEEE, 345 E 47TH ST, NEW YORK, NY 10017 USA, 2006, p. 2636-2643, ISBN: 978-1-4244-0492-6
- [11] REZAEI-ZARE, A., SANAYE-PASAND, M., MOHSENI, H., FATHANGI, S., IRAVANI, R., Analysis of ferroresonance modes in power transformers using Preisach-type hysteretic magnetizing inductance. *IEEE inc, 445 hoos lane*, Piscataway, NJ USA, 2007, vol. 22, p. 919 – 929. ISSN 0885 - 8977.
- [12] SAKARUNG, P., CHATRATANA, S. Application of PSCAD/EMTDC and Chaos Theory to Power System Ferroresonance Analysis, International Conference on Power Systems Transients, Canada, 2005.
- [13] SWIFT, G.W. An Analytical Approach to Ferroresonance, IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems, 1969, Vol. PAS-88, No. 1, s. 42-46.
- [14] SWIFT, G.W. Power Transformer Core Behavior under Transient Conditions, IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems, 1971, Vol. PAS-90, No. 5, s. 2206-2210.
- [15] TARASIEWICZ, E. J., MORCHED, A. S., NARANG, A., DICK, E. P.: Frequency Dependent Eddy Current Models for Nonlinear Iron Cores, IEEE Transactions on Power Systems, 1993, Vol. 8, No. 2, s. 588-597.
- [16] TOMAN, P., Analýza nestandardních typů přepětí v elektroenergetických soustavách, Habilitační práce, Brno, 2004
- [17] VALVERDE, V., MAZON, A.J., ZAMORA, I., BUIGUES, G., Ferroresonance suppression in Voltage Transformers. *Electrical Review. in Power.* ISSN 0033-2097, R. 88 NR 1a/2012

Další použitá literatura je uvedena v dizertační práci.

ŽIVOTOPIS

Ing. Branislav Bátora

narozen: 14. října 1982 v Handlové (SVK)

email: batora@feec.vutbr.cz

Vzdělání:

- | | |
|-------------|--|
| 1997 – 2001 | SPŠ Handlová (SVK), zaměření: elektrická zařízení |
| 2001 – 2006 | FEKT, VUT v Brně. Magisterské studium, obor silnoproudá elektrotechnika a elektroenergetika, Téma diplomové práce – Inteligentní elektroinstalační prvky pro počítačové řízení |
| 2006 – 2014 | FEKT, VUT v Brně. Doktorské studium, obor silnoproudá elektrotechnika a elektroenergetika, prezenční a kombinované (od 2010) studium |

Odborná praxe, zaměstnání a zkušenosti:

- | | |
|------------|--|
| 2007 – ... | Vyhl.50/78 Sb. §10, Projektování silových a datových rozvodů, hromosvodů, rozvaděčů NN, EZS, EPS, Inteligentní elektroinstalace a systémová technika budov |
| 2007 - ... | Zaměstnanec VUT v Brně, technický pracovník |
| 2007 | EGÚ Brno (Kreslení CAD, Analýza spolehlivosti přenosových soustav) |

Pedagogická praxe:

- Vedení více než 20 bakalářských a diplomových prací
- Výuka počítačových, laboratorních a numerických cvičení (od roku 2006)
- Výuka předmětů: Projektování silových a datových rozvodů, Přechodné jevy v elektrických sítích, Světelná technika, Užití elektrické energie, Distribuce elektrické energie, Počítače a programování

Vědecko- výzkumná činnost:

- Přepětí v elektrických sítích, Analýza jevu ferorezonance a ferorezonančního přepětí,
- Simulace a modelování přechodných jevů v Elektrizací soustavě
- Přes 20 publikací (zahraniční i české konference, články v odborných časopisech)

Členství v organizacích: KNX partner

Jazyky: Angličtina, Slovenština

ABSTRACT

This thesis deals with the ferroresonance phenomenon and ferroresonance overvoltage in electric networks. That's why the introduction part explains the theoretical basis of ferroresonance and its consequences in the power system. The work then focuses on the power system as a non-linear dynamic system and describes various analytical methods for solving these systems. These methods are further applied to diagnose specific systems.

There are a number of various power system configurations susceptible to ferroresonance. The most frequent one is theoretically analyzed in this thesis and a number of recommendations are offered for reducing the ferroresonance phenomenon.

The thesis further deals with the selection of suitable software for this computationally challenging task. A number of different tools are considered and efficiently reduced to Matlab Simulink and PSCAD software. Matlab Simulink and its SimPowerSystem Toolbox are used to analyze the effect of hysteresis of the magnetic core of the transformer on the emergence and course of the ferroresonance phenomenon. Using PSCAD, various configurations of the power systems are compared in terms of possible emergence and course of ferroresonance and also to find the limiting conditions that increase the probability of this phenomenon. The possibility of using artificial neural networks for ferroresonance diagnosis is also mentioned in this thesis.

The final part provides a number of recommendations for design and operation of both new and existing power systems.