VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

ÚSTAV ELEKTROENERGETIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

DEPARTMENT OF ELECTRICAL POWER ENGINEERING

ANALÝZA FEROREZONANČNÍHO PŘEPĚTÍ V ELEKTRICKÝCH SÍTÍCH

ANALYSIS OF THE FERRORESONANCE OVERVOLTAGE IN ELECTRICAL NETWORK

DIZERTAČNÍ PRÁCE

DOCTORAL THESIS

AUTOR PRÁCE Ing. BRANISLAV BÁTORA

AUTHOR

VEDOUCÍ PRÁCE doc. Ing. PETR TOMAN, Ph.D.

SUPERVISOR

BRNO 2013

Bibliografická citace práce:

BÁTORA, B. *Analýza ferorezonančního přepětí v elektrických sítích.* Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2013. 127 s. Vedoucí disertační práce doc. Ing. Petr Toman, Ph.D.

Čestné prohlášení

„Prohlašuji, že předložená práce je mým původním autorským dílem, které jsem vypracoval samostatně. Veškerou literaturu a další zdroje, z nichž jsem při zpracování čerpal, v práci řádně cituji a jsou uvedeny v seznamu použité literatury.“

Branislav Bátora

V Brně, 31. prosince 2013.

……………………………

Poděkování

„Děkuji svému školiteli doc. Ing. Petru Tomanovi, Ph.D. za cenné rady, připomínky a vedení při realizaci této disertační práce. Mnoho díků patří také všem mým kolegům z Ústavu elektroenergetiky, FEKT, VUT v Brně za vytvoření dobrých podmínek k vědecké práci.

A především děkuji mým rodičům, rodině, přátelům a zejména Bohu a mé drahé manželce Michaele Bátorové za jejich obětavost, trpělivost a podporu, kterou mi nejen během tvorby této práce věnovali.“

ABSTRAKT

Práce se zabývá problematikou ferorezonančního jevu a ferorezonančního přepětí v elektrických sítích. V úvodní části práce je vysvětlen teoretický základ ferorezonančního jevu a jeho důsledky na elektrizační soustavu. Dále se práce zaměřuje na elektrizační soustavu jako nelineární dynamický systém a popisuje různé analytické metody řešení těchto systémů. Tyto metody jsou dále uplatněny k diagnostice konkrétních systémů.

V minulosti byla identifikována celá řada různých elektroenergetických konfigurací potenciálně náchylných na vznik ferorezonance. Nejčastější z nich práce nejdříve teoreticky analyzuje a poté nabízí doporučení pro omezení ferorezonančního jevu.

Dále se práce zabývá výběrem vhodného softwaru pro tento výpočetně náročný úkol. Je posouzena řada různých nástrojů, ze kterých byly následně vybrány software Matlab Simulink a PSCAD. Matlab Simulink a jeho SimPowerSystem Toolbox, je využit pro analýzu vlivu hystereze magnetického jádra transformátoru na vznik a průběh ferorezonančního jevu. Pomocí nástroje PSCAD jsou posouzeny různé konfigurace energetického systému z hlediska možného vzniku a průběhu ferorezonance a také provedeno nalezení limitních podmínek, které zvyšuji pravděpodobnost výskytu tohoto jevu. Dále práce zmiňuje možnost použití umělých neuronových síti pro diagnostiku ferorezonančního jevu.

V závěrečné části práce je uvedena řada doporučení pro navrhování, projektování a provozování nových i stávajících elektroenergetických systémů.

KLÍČOVÁ SLOVA: Přechodné jevy, přepětí, ferorezonance, ferorezonanční přepětí, saturace, hystereze, PSCAD, Matlab simulink

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.

KEY WORDS: Transient phenomenon, overvoltage, ferroresonance, ferroresonance overvoltage, saturation, hysteresis, PSCAD, Matlab simulink

OBSAH

1 ÚVOD 1

2 SOUČASNÝ STAV ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY 3

2.1 TEORIE DYNAMICKÝCH SYSTÉMŮ 3

2.1.1 NELINEÁRNÍ DYNAMICKÉ SYSTÉMY A JEJICH ANALÝZA 4

2.2 PŘEPĚTÍ V ES 18

2.3 FEROREZONANČNÍ JEV 19

2.3.1 PROCES DEFORMACE PRŮBĚHU PROUDU A NAPĚTÍ V OBVODECH SE ŽELEZEM 21

2.3.2 JEVY A PARAMETRY OVLIVŇUJÍCÍ VZNIK A PRŮBĚH FEROREZONANCE 24

2.3.3 FEROREZONANČNÍ PŘEPĚTÍ 26

2.4 ANALÝZA FEROREZONANČNÍHO OBVODU 26

2.4.1 SÉRIOVÝ FEROREZONANČNÍ OBVOD (SFO) 26

2.4.2 PARALELNÍ FEROREZONANČNÍ OBVOD (PFO) 34

2.4.3 ANALYTICKÁ METODA 36

2.4.4 TEORIE KATASTROF 38

3 CÍLE PRÁCE 40

4 ŘEŠENÍ 41

4.1 KONFIGURACE ENERGETICKÝCH SYSTÉMŮ MAJÍCÍ SKLON K VZNIKU FEROREZONANCE 41

4.1.1 PŘÍSTROJOVÝ TRANSFORMÁTOR NAPĚTÍ V BLÍZKOSTI JEDNOHO NEBO VÍCE ROZEPNUTÝCH VYPÍNAČŮ 41

4.1.2 PŘÍSTROJOVÝ TRANSFORMÁTOR NAPĚTÍ PŘIPOJENÝ K IZOLOVANÉMU SYSTÉMU 42

4.1.3 PŘÍSTROJOVÝ TRANSFORMÁTOR NAPĚTÍ NAPÁJENÝ PŘES KAPACITNÍ VAZBU SE SOUSEDNÍM VEDENÍM 43

4.1.4 TROJFÁZOVÝ TRANSFORMÁTOR NAPÁJENÝ PŘES KAPACITNÍ VAZBU SE SOUBĚŽNÝM VEDENÍM 44

4.1.5 PŘÍSTROJOVÝ TRANSFORMÁTOR NAPĚTÍ NAPÁJENÝ PŘES KAPACITNÍ VAZBU S OSTATNÍMI FÁZEMI 45

4.1.6 TROJFÁZOVÝ TRANSFORMÁTOR NAPÁJENÝ Z JEDNÉ ČI ZE DVOU FÁZÍ 45

4.1.7 PŘÍSTROJOVÉ TRANSFORMÁTORY NAPĚTÍ A VÝKONOVÉ TRANSFORMÁTORY VVN/VN S IZOLOVANÝM UZLEM 48

4.1.8 VÝKONOVÝ TRANSFORMÁTOR NAPÁJENÝ PŘES ELEKTROENERGETICKÝ SYSTÉM S VELKOU KAPACITOU A S NÍZKÝM ZKRATOVÝM VÝKONEM 49

4.1.9 ELEKTROENERGETICKÝ SYSTÉM UZEMNĚNÝ PŘES REAKTOR 49

4.1.10 KOMPENZAČNÍ SEKCE V OBVODU S TLUMIVKOU SE ŽELEZNÝM JÁDREM 50

4.1.11 OBVOD S KAPACITNÍM PŘÍSTROJOVÝM TRANSFORMÁTOREM NAPĚTÍ 51

4.2 SOFTWAROVÉ NÁSTROJE PRO SIMULACI, VIZUALIZACI A ŘEŠENÍ FEROREZONANČNÍCH JEVŮ 53

4.2.1 PS CAD 53

4.2.2 MATLAB / SIMULINK....54
4.2.3 ATP EMTP....55
4.2.4 DYNAST....56
4.2.5 DYMOLA – DYNAMIC MODELING LABORATORY....57
4.2.6 ETAP....57
4.2.7 EASYPOWER....59
4.2.8 POWERCAD....59
4.2.9 MATPOWER....60
4.2.10 OCTAVE....60
4.2.11 SROVNÁNÍ SOFTWAROVÝCH NÁSTROJŮ....61
4.3 ANALÝZA FEROREZONANČNÍHO OBVODU S VYUŽITÍM SOFTWAROVÉHO NÁSTROJE PSCAD....63
4.3.1 MODEL TRANSFORMÁTORU V PROGRAMU PSCAD....63
4.3.2 VZNIK A PRŮBĚH FEROREZONANCE TROJFÁZOVÉHO TRANSFORMÁTORU NAPÁJENÉHO Z JEDNÉ NEBO DVOU FÁZÍ....64
4.4 ANALÝZA FEROREZONANČNÍHO OBVODU S VYUŽITÍM SOFTWAROVÉHO NÁSTROJE MATLAB SIMULINK....95
4.4.1 SIMULACE S UVAŽOVÁNÍM HYSTEREZE TRANSFORMÁTORU....96
4.4.2 SIMULACE BEZ UVAŽOVÁNÍ HYSTEREZE TRANSFORMÁTORU....101
4.5 MOŽNOSTI VYUŽITÍ UMĚLÝCH NEURONOVÝCH SÍTÍ PRO VYHODNOCENÍ FEROREZONANČNÍHO JEVU....104
4.5.1 UMĚLÉ NEURONOVÉ SÍTĚ (UNS)....104
4.5.2 DETEKCE FEROREZONANCE ZALOŽENÁ NA UNS....105
4.6 MOŽNOSTI SNÍŽENÍ PRAVDĚPODOBNOSTI VZNIKU FEROREZONANČNÍHO JEVU....107
4.6.1 TROJFÁZOVÝ VÝKONOVÝ TRANSFORMÁTOR NAPÁJENÝ Z JEDNÉ NEBO ZE DVOU FÁZÍ....108
4.6.2 TRANSFORMÁTOR NAPÁJENÝ DÍKY KAPACITNÍ VAZBĚ SE SOUBĚŽNÝM VEDENÍM....109
4.6.3 TRANSFORMÁTOR V SYSTÉMU S IZOLOVANÝM UZLEM....109
4.6.4 TRANSFORMÁTOR V SYSTÉMU S NEPŘÍMO UZEMNĚNÝM UZLEM....110
4.6.5 TRANSFORMÁTOR NAPÁJENÝ PŘES ENERGETICKÝ SYSTÉM S VYSOKOU KAPACITOU....110
4.6.6 OMEZOVAČE PŘEPĚTÍ....111
4.6.7 PŘÍSTROJOVÉ TRANSFORMÁTORY NAPĚTÍ....111
4.6.8 ELEKTRONICKÉ PŘÍSTROJOVÉ TRANSFORMÁTORY....112
5 ZÁVĚR....116
5.1 CÍLE PRÁCE A JEJICH SPLNĚNÍ....117
5.1.1 NALEZENÍ VHODNÉHO SOFTWARU....117
5.1.2 VLIV HYSTEREZE NA VÝSKYT A PRŮBĚH FEROREZONANČNÍHO JEVU....118
5.1.3 VYŠETŘENÍ KRIZOVÝCH SCÉNÁŘŮ V ES....119
5.1.4 MOŽNOSTI SNÍŽENÍ PRAVDĚPODOBNOSTI VZNIKU FEROREZONANCE A NALEZENÍ LIMITNÍCH PODMÍNEK PRO VZNIK FEROREZONANČNÍHO JEVU....119

5.2 Přínosy disertační práce a shrnutí vědeckých poznatků 121
5.3 Doporučení 121
5.4 Možnost dalšího zaměření práce 122

POUŽITÁ LITERATURA 123

PŘÍLOHA 1 PRŮBĚHY FEROREZONANČNÍHO PŘEPĚTÍ 1

PŘÍLOHA 2 DESTRUKČNÍ ÚČINKY FEROREZONANČNÍHO PŘEPĚTÍ................................13

PŘÍLOHA 3 MODEL HYSTEREZNÍ SMYČKY V SIMULINKU 14

PŘÍLOHA 4 ANALÝZA FEROREZONANČNÍHO JEVU V PROSTŘEDÍ PSCAD 15

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 2.1 Příklady fázových portrétů systémů se dvěma stavovými proměnnými [47] 4

Obr. 2.2 Příklad fázového portrétu nelineárního systému s nestabilním a sedlovým kritickým bodem a stabilním ohniskem. 6

Obr. 2.3 Srovnání fázových portrétů nelineárního systému: $\dot{x}1 = x1\,, 2\dot{x}2 = x2$ *a jeho linearizace v okolí kritického bodu (0,0)* $\dot{x}1 = 0, \dot{x}2 = x2$ *kde osa x_1 tvoří množinu pevných bodů.* 7

Obr. 2.4.Poincerého mapy pro neautonomní systém 9

Obr. 2.5 Časový vývoj Poincerého zobrazení – přechodný děj konvergující k ustálenému stavu ...9

Obr. 2.6 Průnik trajektorie plochou 10

Obr. 2.7 Geometrie Poincarého mapy pro periodickou orbitu 10

Obr. 2.8 Konstrukce Poincarého zobrazení v prostředí PSCAD a nastavení sampleru 11

Obr. 2.9 Poincarého zobrazení v ustáleném stavu pro různé odezvy systému 12

Obr. 2.10 Časový vývoj fázového prostoru a časový vývoj s využitím Poincarého zobrazení 13

Obr. 2.11 Bifurkace sedlo - uzel 15

Obr. 2.12 Hopfova bifurkace 16

Obr. 2.13 Bifukace zdvojování periody 17

Obr. 2.14 Bifurkační diagram pro veličinu y s proměnným parametrem omega 17

Obr. 2.15 Rozdělení přepětí dle příčiny vzniku 19

Obr. 2.16 Časový průběh magnetizačního proudu pro harmonický magnetický tok [28] 22

Obr. 2.17 Převážné vlivy na nelinearitu v železném jádru 22

Obr. 2.18 Časový průběh magnetizačního proudu pro harmonický magnetický tok při uvažování hystereze [28] 23

Obr. 2.19 Podmínky pro vznik ferorezonance 25

Obr. 2.20 Schéma jednoduchého SFO [28] 27

Obr. 2.21 Grafické řešení SFO 28

Obr. 2.22 Řešení SFO s nelineárním induktorem [28] 29

Obr. 2.23 VA charakteristiky použitých pasivních prvků 30

Obr. 2.24 Fázorový diagram sériového RLC obvodu 30

Obr. 2.25 VA charakteristika SFO 31

Obr. 2.26 VA charakteristika SFO 31

Obr. 2.27 Další grafické řešení SFO [28] 33

Obr. 2.28 Oblasti bezpečných hodnot pro potlačení vzniku ferorezonance [28] 34

Obr. 2.29 Závislosti proudů na jednotlivých prvcích na napětí 35

Obr. 2.30 Fázorový diagram PFO 35

Obr. 2.31 AV Charakteristika PFO [28] 35

Obr. 2.32 AV charakteristika PFO 36

Obr. 2.33 Schéma jednoduchého ferorezonančního obvodu 36

Obr. 2.34 Závislost amplitudy magnetického toku na proměnné hodnotě amplitudy napětí (koeficienty α_1=1,33.10^{-8}, α_{11}=3,87.10^{-33}, n=11, U_v=90kV, R=8MΩ a C=1,1nF) 38

Obr. 2.35 Ampérvoltová charakteristika sériového ferorezonančního obvodu 39

Obr. 4.1 Konfigurace zapojení složená z PTN zapojeného v sérii s rozepnutým vypínačem 41

Obr. 4.2 Konfigurace zapojení PTN v systému s izolovaným uzlem 42

Obr. 4.3 Konfigurace zapojení potencionálně izolovaného systému s napěťovými transformátory 43

Obr. 4.4 Konfigurace zapojení PTN s kapacitní vazbou mezi sousedními vedeními na stejném stožáru 43

Obr. 4.5 Konfigurace zapojení transformátoru přes kapacitní vazbu souběžného vedení 44

Obr. 4.6 Schématické zobrazení konfigurace zapojení transformátoru přes kapacitní vazbu souběžného vedení 44

Obr. 4.7 Konfigurace zapojení PTN s kapacitní vazbou mezi sousedními fázemi při postupném rozpojování vodičů 45

Obr. 4.8 Trojfázový transformátor při sepnutí jedné fáze 45

Obr. 4.9 Příklady kritických soustav u trojfázového transformátoru z pohledu ferorezonance 46

Obr. 4.10 Zapojení vinutí transformátoru mající sklon k ferorezonanci 47

Obr. 4.11 Ferorezonanční obvod tvořený PTN zapojenými mezi fáze a zem a transformátorem s izolovaným uzlem 48

Obr. 4.12 Zjednodušené náhradní schéma nezatíženého výkonového transformátoru napájeného přes systém s velkou kapacitou 49

Obr. 4.13 Ferorezonanční obvod v případě uzemnění uzlu transformátoru přes vnitřní indukčnost hlídače izolačního stavu nebo reaktor 49

Obr. 4.14 Nechráněná a chráněná kompenzační sekce 50

Obr. 4.15 Použití sériové kompenzace mezi usměrňovací stanicí a ES 51

Obr. 4.16 Zjednodušené schéma zapojení kapacitního přístrojového transformátoru napětí C2VT určeného pro rozvodné sítě VVN 52

Obr. 4.17 Schematické znázornění modelu dvouvinuťového transformátoru v programu PSCAD 63

Obr. 4.18 Nastavení vlastnosti saturace 63

Obr. 4.19 Nastavení vlastnosti saturace 64

Obr. 4.20 Průběh saturační křivky 64

Obr. 4.21 Schéma částí elektrické sítě v programu PSCAD pro simulaci ferorezonančního jevu 65

Obr. 4.22 Definice výstupných proměnných v PSCADu 66

Obr. 4.23 Průběh napětí při ferorezonančním jevu (červená křivka) a jeho srovnání s harmonickým průběhem napětí (modrá křivka)......67

Obr. 4.24 Průběh proudu (červená křivka) a napětí (modrá křivka) na primární straně transformátoru......67

Obr. 4.25 Deformace průběhu proudu způsobená nelinearitou indukčnosti. 68

Obr. 4.26 Průběh proudů ve všech fázích na VVN straně(L1 – modrá,L2 – zelená, L3 – červená křivka)......68

Obr. 4.27 Průběh sdružených napětí na primární straně (UPriBC – modrá, UPriAB – zelená, UpriAC – červená) a fázových napětí na sekundární straně transformátrou (VSecA – modrá, VSecB – zelená, VSecC – modrá) a jejích detailní zobrazení. 69

Obr. 4.28 Průběh proudů na VN straně a jejích detailní zobrazení (Iseca – modrá, Isecb – zelená, Isecc – červená)......70

Obr. 4.29 Úbytek napětí na vedení 110 kV fáze B (L2)......70

Obr. 4.30 Srovnání napětí zdroje(modrá) a napětí na začátku vedení(zelená) 71

Obr. 4.31 Srovnání vývoje fázového prostoru při ferorezonančním jevu (vlevo) a bez ferorezonance (vpravo) 71

Obr. 4.32 Magnetizační charakteristika transformátoru......72

Obr. 4.33 Průběh magnetizačního proudu transformátoru 72

Obr. 4.34 Průběh magnetického toku vztaženého k primárnímu vinutí......73

Obr. 4.35 Zobrazení vývoje fázového prostoru bez ferorezonance (vlevo) a s ferorezonancí (vpravo) 73

Obr. 4.36 Poincaré zobrazení 74

Obr. 4.37 Vývoj frekvence napětí při ferorezonanci 75

Obr. 4.38 Průběh prvních 7 harmonických při ferorezonanci 75

Obr. 4.39 Časový vývoj napětí a proudu při ferorezoanci......76

Obr. 4.40 Vývoj fázového prostoru při netlumené ferorezonanci 76

Obr. 4.41 Časový vývoj poincerého zobrazení......77

Obr. 4.42 Frekvenční charakteristika napětí a vivin rezonančních oscilací v závislosti na frekvenci 77

Obr. 4.43 Délka vedení 10 km......78

Obr. 4.44 Délka vedení 20 km......78

Obr. 4.45 Délka vedení 30 km......79

Obr. 4.46 Délka vedení 35 km......79

Obr. 4.47 Délka vedení 40 km......80

Obr. 4.48 Délka vedení 50 km 80
Obr. 4.49 Délka vedení 60 km 81
Obr. 4.50 Zatížení transformátoru 0,25 MW 82
Obr. 4.51 Zatížení transformátoru 0,2 MW 82
Obr. 4.52 Zatížení transformátoru 0,15 MW 83
Obr. 4.53 Zatížení transformátoru 0,1 MW 83
Obr. 4.54 Zatížení transformátoru 0,05 MW 84
Obr. 4.55 Výkon transformátoru 25 MVA 85
Obr. 4.56 Výkon transformátoru 20 MVA 85
Obr. 4.57 Výkon transformátoru 18 MVA 86
Obr. 4.58 Výkon transformátoru 16 MVA 86
Obr. 4.59 Výkon transformátoru 14 MVA 87
Obr. 4.60 Výkon transformátoru 12 MVA 87
Obr. 4.61 Výkon transformátoru 10 MVA 88
Obr. 4.62 Zapojení vinutí transformátoru Y_N/y_N 89
Obr. 4.63 Zapojení vinutí transformátoru Y_N/y 89
Obr. 4.64 Zapojení vinutí transformátoru D/y_N 90
Obr. 4.65 Zapojení vinutí transformátoru D/y 90
Obr. 4.66 Zapojení vinutí transformátoru D/d 91
Obr. 4.67 Vývoj při napětí zdroje -10 % U_N 91
Obr. 4.68 Vývoj při napětí zdroje -5 % U_N 92
Obr. 4.69 Vývoj při jmenovitém napětí zdroje U_N *=110 kV* 92
Obr. 4.70 Vývoj při napětí zdroje +5 % U_N 93
Obr. 4.71 Vývoj při napětí zdroje +10% U_N 94
Obr. 4.72 Příklad zobrazení fázovéhoprostoru v závislosti na velikosti napětí [10] 94
Obr. 4.73 Bifurkační diagram: Napětí na transformátoru v závislosti na napětí zdroje [66] 95
Obr. 4.74 Simulovaný energetický systém – Výkonový nezatížený (příp. minimálně zatížený) trojfázový transformátor napájený přes dvě fáze 95
Obr. 4.75 Schéma v programu matlab simulink s definovanými výstupy 96
Obr. 4.76 Parametrizační okno nástroje „powergui“ v SIMULINKu - nastavení hystereze 97
Obr. 4.77 Průběh napětí u_b*, při ferorezonanci* 97
Obr. 4.78 Průběh napětí u_b*, při ferorezonanci - detail* 98
Obr. 4.79 Průběh proudu i_b*, při ferorezonanci* 98
Obr. 4.80 Vývoj magnetického toku Φ_b*, při ferorezonanci* 99

Obr. 4.81 Vývoj fázového prostoru magnetického toku Φ'_b, Φ_b. 99

Obr. 4.82 Fázový prostor Φ'_b, Φ_b při ferorezonanci a poincarého zobrazení 99

Obr. 4.83 Vývoj poincarého zobrazení Φ'_b, Φ_b v čase 100

Obr. 4.84 Fázový prostor u a i, jeho vývoj v čase a poincarého zobrazení 100

Obr. 4.85 Průběh napětí u_b, při ferorezonanci bez uvažování hystereze 101

Obr. 4.86 Průběh proudu i_b, při ferorezonanci bez uvažování hystereze 101

Obr. 4.87 Vývoj magnetického toku Φ_b, při ferorezonanci bez uvažování hystereze 102

Obr. 4.88 Vývoj fázového prostoru magnetického toku Φ'_b, Φ_b. bez uvažování hystereze 102

Obr. 4.89 Fázový prostor Φ'_b, Φ_b při ferorezonanci a poincarého zobrazení bez uvažování hystereze 103

Obr. 4.90 Vývoj poincarého zobrazení Φ'_b, Φ_b v čase bez uvažování hystereze 103

Obr. 4.91 Fázový prostor u a i, jeho vývoj v čase bez uvažování hystereze 103

Obr. 4.92 Fázový prostor zobrazen v poincarého zobrazení a jeho vývoj v čase bez uvažování hystereze 104

Obr. 4.93 Model umělého neuronu [80] 105

Obr. 4.94 Princip detekce ferorezonance [80] 106

Obr. 4.95 Odezva UNS při ferorezonančním jevu [80] 107

Obr. 4.96 Zapojení vinutí transformátoru, která jsou méně náchylná na vznik ferorezonance 109

Obr. 4.97 Příslušenství pro stále monitory izolace 110

Obr. 4.98 Kombinované elektronické transformátory KEVCD od firmy ABB [F1] 113

Obr. 4.99 proudový a napěťový senzor [F1] 113

Obr. 4.100 Porovnání klasických PTN a senzoru z hlediska VA charakteristiky 114

Obr. 4.101 Schéma kombinovaného senzoru [F1] 114

Obr. 5.1 Průběh ferorezonančního přepětí a) bez uvažování hystereze, b) s uvažováním hystereze 118

Obr. 5.2 Průběh proudu a) bez uvažování hystereze, b) s uvažováním hystereze 118

Obr. 5.3 Fázový prostor (Φ'_b, Φ_b) - Poincarého zobrazení; a) bez uvažování hystereze, b)s uvažováním hystereze 119

Obr. 5.4 Průběh napětí při délkách vedení 10, 20, 30, 35, 40, 50, 60km 120

Obr. 5.5 Průběh napětí při zatížení transformátoru 0,25; 0,2; 0,15; 0,1; 0,05 MW 120

Obr. 5.6 Průběh napětí na primární straně transformátoru při změnách napětí sítě (zdroje): -10%Un, -5%Un, Un, +5%Un, +10%Un 120

SEZNAM TABULEK

Tab. 2.1 Vlastní kapacity venkovních vedení 34
Tab. 2.2 Vlastní kapacity kabelových vedení pro 22kV...34
Tab. 4.1 Srovnání softwarových nástrojů..62
Tab. 4.2 Srovnání přístrojových transformátorů a senzorů..116

SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

Při používání symbolů a zkratek jsou v této práci použity jednotné zásady. Zkratky či symboly označující prvky v elektrickém schématu jsou psány velkými písmeny, symboly vztahující se k určité veličině jsou psány kurzívou. V uvedeném seznamu budou veličinám s harmonickým průběhem přiřazeny názvy jen u jejich efektivních hodnot. Okamžité a maximální hodnoty jsou v této práci značeny podle následujícího:

• Okamžitá hodnota veličiny je psána malým písmenem, např. u_l.

• Efektivní hodnota veličiny je psána velkým písmenem, např. U_l.

• Maximální hodnota veličiny je psána velkým písmenem s indexem *m,* např. U_{lm}.

U koeficientů polynomu, jež mají různé pouze číselné indexy, bude v uvedeném seznamu uveden příslušný koeficient s indexem, který tímto zastupuje všechny použité číselné indexy; např. *a*.. Jednotky pro jednotlivé koeficienty se mohou lišit a nebudou zde proto uváděny.

$\boldsymbol{A}$	Matice nelinearizovaného systému	[-]
A	Označení fáze (L1)	
a	Koeficient lineární funkce	[-]
B	Označení fáze (L2)	
b	Koeficient lineární funkce	[-]
B_1, B_2, B_3, B_4	Body	
B_U	Uzemňovací svorka	
C	Kapacita	[F]
C	Označení fáze (L3)	
C_0	Kapacita netočivé složky	[F]
C_1	Kapacita kapacitního děliče na VVN straně	[F]
C_2	Kapacita kapacitního děliče na NN straně	[F]
C_S	Sériová kompenzace	
C_V	Kapacita vypínače	[F]
c	Koeficient lineární funkce	[-]
D,d	Zapojení vinutí transformátoru do trojúhelníka	
DLS	Algoritmus Damped least-squares	
DS	Distribuční síť	
d	Koeficient lineární funkce	[-]
E	Napětí zdroje (napájecí napětí)	[V]
ES	Elektrizační soustava	
E_0	Napětí netočivé složky na VVN straně	[V]
e_{li}	Pomocná funkce	[-]
F,f	Frekvence	[Hz]
F	Vektorová funkce	
F_A	Antiferorezonanční RLC filtr	
fluxb, fib	Magnetický tok ve fázi B (L2)	
G	Vodivost	[S]
G	Generátor	
g_1, g_2	Koeficienty nelineární vektorové funkce	
$\boldsymbol{g}$	Nelineární vektorová funkce	
GUI	Grafické uživatelské rozhraní	
HIS	Hlídač izolačního stavu	

I,i	Proud	[A]
I_0	Proud procházející primárním vinutím nezatíženého transformátoru	[A]
I_1	Proud procházející primárním vinutím transformátoru	[A]
I_b	Proud procházející fází B (L2)	[A]
I_C	Proud tekoucí kondenzátorem	[A]
I_D	Spodní hranice proudu	[A]
I'_D	Limitní hodnota spodní hranice proudu	[A]
I_H	Horní hranice proudu	[A]
I'_H	Limitní hodnota horní hranice proudu	[A]
I_L	Proud tekoucí induktorem	[A]
I_{pria}, I_{prib}, I_{pric}	Proud tekoucí primárním vinutím transformátoru	[A]
I_R	Proud tekoucí rezistorem	[A]
I_{REZ}	Proud, při kterém dochází k rezonanci	[A]
I_s	Saturační proud	
I_{seca},I_{secb},I_{secc}	Proud tekoucí sekundárním vinutím transformátoru	[A]
J	Jiskřiště	
L	Indukčnost	[H]
L1, L2, L3	Značení jednotlivých fází trojfázového systému	
$L_{INEA}A$, $L_{INEA}B$, $L_{INEA}C$	Označení pro vypínač v programu PSCAD	
L_R	Indukčnost kompenzační tlumivky	[H]
L_S	Indukčnost odpovídající nasycenému stavu feromagnetického jádra	[H]
M	Okolí bodu	[-]
MPL	Vícevrstvý „MultiLayer“ perceptron	
N	Počet závitů	
N	Okolí bodu	[-]
NA, NB, NC	Výstup hodnoty fázového napětí v programu PSCAD	
n	Řád harmonické	[-]
NN	Nízké napětí	
O,O_1,O_2 ,O_n	Odpojovač	
$p_ř$	Převod transformátoru	[-]
P	Průsečík	
P_1	Výkon zařízení	[VA]

P_h	Výstup hodnoty fázového úhlu v programu PSCAD	
P_e	Jmenovité tepelné zatížení pomocného vinutí přístrojového transformátoru napětí	[VA]
P_M	Výkon PTN požadovaný pro měření	[VA]
P_0	Výkon naprázdno	[W]
P_R	Výkon tlumícího rezistoru	[W]
P_T	Jmenovitý výkon přístrojového transformátoru napětí	[VA]
PTN	Přístrojový transformátor napětí	
R	Rezistance	[Ω]
$\mathbf{R}$	Fázový prostor	
R^n	N-rozměrný fázový prostor	
r	Pomocná proměnná	[-]
r	Poloměr	[mm]
RLC	Obvod s rezistorem, cívkou a kondenzátorem	
S_0	Ochranné jiskřiště	
SFO	Sériový ferorezonanční obvod	
SF6	Fluorid sírový	
t	Čas	[s]
T	Perioda harmonického signálu	[s]
T, Tr, T_R	Transformátor	
U	Napětí	[V]
U_0,U_1, U_2	Napětí na kondenzátoru u SFO	[V]
U_1	Napětí primárního vinutí transformátoru	[V]
U_2	Napětí sekundárního vinutí transformátoru	[V]
U_C	Napětí na kondenzátoru	[V]
U_D,U'_D	Spodní hranice napětí	[V]
U_H,U'_H	Horní hranice napětí	[V]
U_b	Napětí fáze B (L2)	[V]
U_C	Napětí na kondenzátoru (kapacitě)	[V]
U_L	Napětí na cívce (indukčnosti)	[V]
U_n	Jmenovité napětí	[V]
UNS	Umělá neuronová síť	
$UP_{ri}AB$, $UP_{ri}AC$, $UP_{ri}BC$	Sdružené napětí na primárním vinutí transformátoru	[V]

$UP_{ri}A$, $UP_{ri}B$, $UP_{ri}C$	Fázové napětí na primárním vinutí transformátoru	[V]
U_R	Napětí na rezistoru	[V]
U_{REZ}	Napětí, při kterém dochází k rezonanci	[V]
U_S	Napětí zdroje	[V]
U_v	Vztažná hodnota napětí	[V]
u_k	Napětí nakrátko transformátoru	[%]
V	Zobrazení	
V, V_X	Vypínač	
VA	Voltampérová charakteristika	
VvedBd	Hodnota úbytku napětí na vedení (fáze B (L2))	[V]
VvedA, VvedB, VvedC	Hodnota napětí na začátku vedení	[V]
VN	Vysoké napětí	
VVN	Velmi vysoké napětí	
$VS_{ec}A$, $VS_{ec}B$, $VS_{ec}C$	Výstup hodnoty napětí na sekundárním vinutí transformátoru	[V]
$VP_{ri}A$, $VP_{ri}B$, $VP_{ri}C$	Výstup hodnoty napětí na primárním vinutí transformátoru	[V]
V_{rms}	Efektívní hodnota napětí	[V]
X	Obecné označení jednoho vinutí transformátoru	
X	Vstupní signál	[-]
x	Vektor stavových proměnných	
X_C	Kapacitní reaktance	[Ω]
X_L	Induktivní reaktance	[Ω]
Y	Obecné označení druhého vinutí transformátoru	
Y	Výstupní signál	[-]
Y, y	Zapojení vinutí transformátoru do hvězdy	
Z	Zátěž	
Z_nO	Oxid zinečnatý	
ZS	Uzemňovací spojka	
ω	Úhlová rychlost	[rad.s^{-1}]
ω_0	Vlastní úhlová rychlost oscilací obvodu pracujícího v lineární části magnetizační charakteristiky	[rad.s^{-1}]

ω_2	Vlastní úhlová rychlost oscilací obvodu pracujícího v nelineární části magnetizační charakteristiky	[rad.s^{-1}]
Φ	Celkový magnetický tok procházející feromagnetickým jádrem	[Wb]
Φ_b	Magnetický tok fáze B (L2)	[Wb]
λ	Ljapunovovy exponenty	[-]
δ	Feigenbaumova konstanta	[-]
Ψ	Spřažený magnetický tok	[Wb]
Ψ_{sat}	Saturační magnetický tok	[Wb]
θ	Úhlová trajektorie	[rad]
ϑ, φ	Úhel	[rad]

1 ÚVOD

Otázka ekologického a ekonomického provozu energetických celků je v dnešní době více než aktuální. Problematikou snižování ztrát v elektrických systémech se zabývá stále větší počet odborníků jak z energetické praxe, tak i z oblasti výzkumu a vývoje. Obecně můžeme tvrdit, že nejlevnější a ekologický nejčistší energie je ta, kterou ušetříme snižováním zmiňovaných ztrát, a proto ji nemusíme vyrobit.

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 muže 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 indukčnosti, 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 obvodě, 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 soustavu, plyne požadavek nebo snaha jevu ferorezonance předejít a umět ho analyzovat.

K analýze jevů ferorezonance je zapotřebí vytvořit matematický model elektrizační soustavy. Elektrizační soustava představuje velmi složitý systém, který lze v dostatečné přesnosti popsat pouze integro-diferenciálními rovnicemi. Výsledné hodnoty zmíněného modelu závisí na parametrech obvodu a zejména na nelinearitě indukčnosti v systému.

Jak už bylo zmíněno výše, ferorezonancí se nazývá rezonance v obvodech, které obsahuji vinutí se železnými jádry, jejichž indukčnost není stálá, ale v důsledku nelinearity magnetizační křivky (přesněji hysterezní smyčky) závisí na okamžitém magnetickém stavu (sycení) vinutí se železným jádrem. Napětí na kondenzátoru nebo cívce se pak nemění s rostoucím kmitočtem na-

pájecího napětí plynule, ale skokem, což způsobuje velké změny a přechodné děje v daném obvodu.

V elektroenergetických sítích se pak tento děj může objevit po provedení spínacích manipulací, jako jsou například připojení vedení, přípojnic, provádění opětovného zapínání, nebo jen po připojení měřícího transformátoru napětí. Její vznik tedy může být zapříčiněn nějakou změnou konfigurace sítě. Ferorezonance tak může způsobit vysoká přepětí, jejichž amplituda může být až několikanásobkem normálních napěťových poměrů. Navíc může způsobit nebezpečně vysoké proudy, které výrazně převyšuji jmenovité hodnoty spínacího zařízení.

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. Dynamické systémy se vyskytují jak v biologii, chemii a hydrodynamice, tak v meteorologii, a jejich zkoumání má tedy mezioborový význam.

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

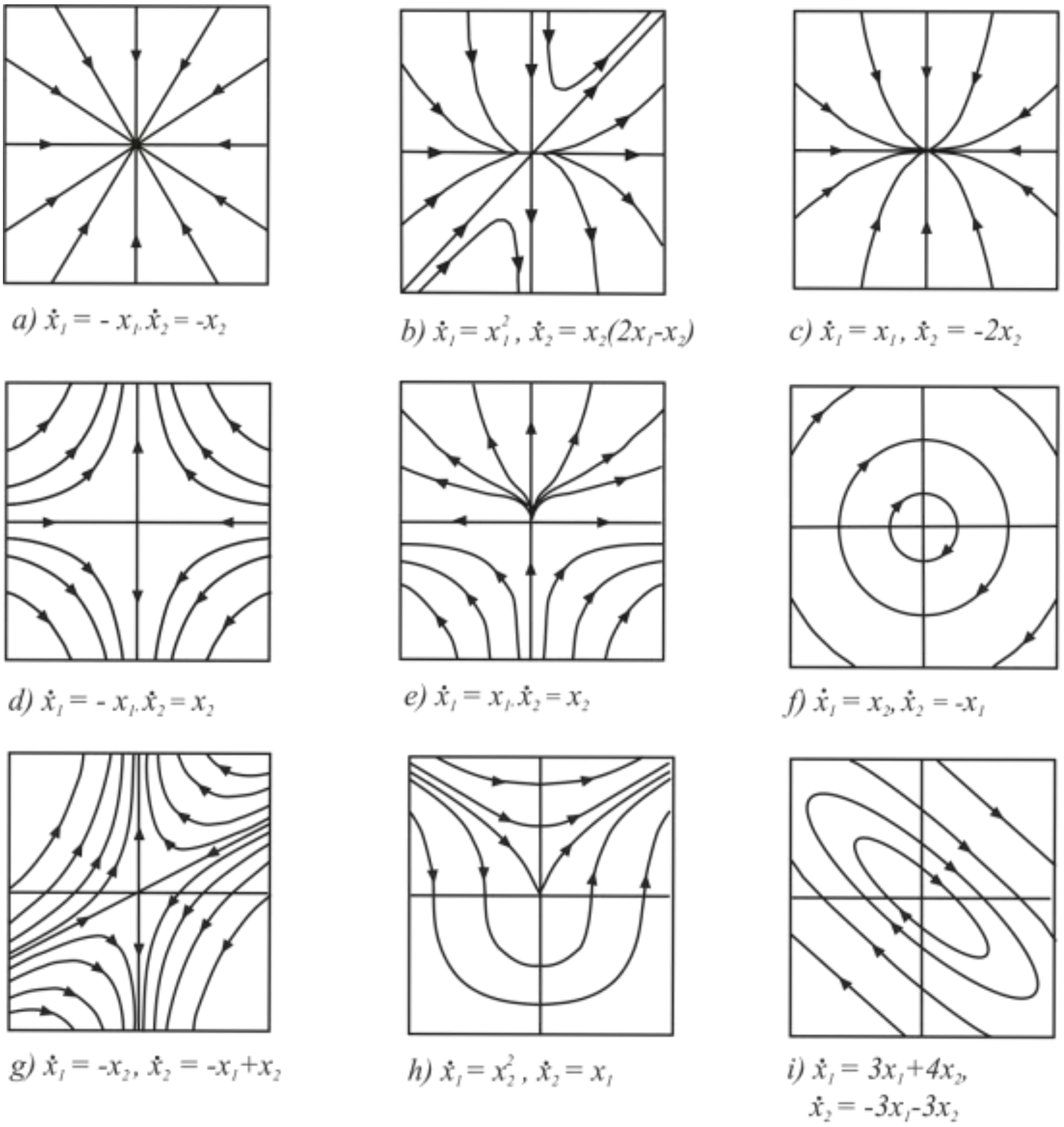
Je-li $\boldsymbol{x}$ vektor stavových proměnných ve fázovém prostoru R^n: $x = (x_1, x_2, \dots, x_n)$, nazveme modelem dynamického systému soustavu diferenciálních rovnic

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

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 $\boldsymbol{x}(t) = \big(x_1(t), x_2(t), \dots, x_n(t)\big)$. Vývoj systému lze pak znázornit parametrickou křivkou $\boldsymbol{x}(t)$ 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.

Některé trajektorie ve fázovém prostoru (viz obr. 2.1) mohou být uzavřené, pak se také nazývají orbity. Šipky u trajektorií ve fázovém portrétu naznačují, kterým směrem se systém vyvíjí s rostoucím časem. Některé stavy systému mohou být konstantní, tj. existuje řešení $\boldsymbol{x}(t)$ takové, že $\boldsymbol{x}(t) = \boldsymbol{x}_0$ pro každé t. Odpovídající body fázového prostoru se pak nazývají pevnými (také kritickými) body a hrají při vyšetřování dynamických systémů důležitou roli, jak dále uvidíme [47].



Obr. 2.1 Příklady fázových portrétů systémů se dvěma stavovými proměnnými [47]

2.1.1 Nelineární dynamické systémy a jejich analýza

Problematika nelineárních dynamických systémů je velmi aktuální v mnoha oborech a získání poznatků o objektivních zákonitostech a jejich vlastnostech a chování by významně mohlo pomoci k odstranění jejich nežádoucích účinků či k lepšímu využití nelineárních jevů. I přestože výpočetní technika v posledních letech výrazným způsobem pokročila, je stále tato problematika velmi komplikovaná a v praxi často obcházena naddimenzováním zařízení nebo tím, že se již předpokládá činnost zařízení v takovém režimu, ve kterém se zjevně nelineární struktura zařízení nemůže výrazně projevit.

Dynamické systémy se vyskytují jak v přírodě okolo nás, tak v technické praxi a všude tam, kde jsou vzájemně propojeny prvky nesoucí nebo tlumící energii. Za předpokladu, že lze zkoumané systémy popsat stejným matematickým modelem, můžeme poznatky o dynamických

systémech přenášet z jednoho oboru do druhého. Výsledky a závislosti můžeme využít jednak v elektrotechnice, mechanice, v regulaci, ekonomii, ale i v dalších oborech.

Matematickým modelem dynamických systémů jsou diferenciální obyčejné rovnice a to v případě, že je možné soustavu považovat za diskrétní, v opačném případě jsou tyto rovnice parciální. Takový matematický model lze řešit analyticky běžnými matematickými prostředky v případě, že se v systému, tedy i v jeho modelu, nevyskytují nelineární členy, které nelze zanedbat. U nelineárních dynamických systémů se řešení komplikuje tím, že zde neplatí princip superpozice.

Vzhledem k tomu, že obecný postup analytického řešení soustav tohoto typu není dosud k dispozici, je nutné volit různé pomocné postupy zjednodušující či zanedbávající jisté projevy nelineární vazby, nebo se nelinearita vazby považuje za slabou a použijí se některé přibližné metody. Dalším možným východiskem je použití numerických nebo analogových simulací.

Díky současnému akcelerujícímu rozvoji výpočetní techniky již lze řešit úlohy, které byly dříve nezvládnutelné pro svou vysokou časovou náročnost numerických výpočtů. Rychlý rozvoj techniky posledních let zaměřil pozornost k podrobnějšímu a intenzivnějšímu studiu vlastností a metodikám řešení nelineárních dynamických systémů, přičemž je kladen stále větší důraz na efektivnější konstruování a využití zařízení, mnohdy až v mezních provozních režimech. U těchto systémů se intenzivněji projevují vlivy nelineárních prvků a v odezvě na působení těchto systémů se objevují zvláštní jevy, jako jsou víceznačná řešení, bifurkace nebo různé druhy nestability, a to i při stacionárních provozních podmínkách.

Elektrický obvod je modelem elektromagnetického pole, jehož platnost je vždy omezena rámcem učiněných předpokladů, např. rychlostí časových změn napětí a proudů, nebo jejich velikostí. Lineární obvod, jehož všechny obvodové parametry jsou považovány za konstantní, je tím nejjednodušším modelem, u něhož mohou být popsány všechny stavy popsány algebraickými lineárními rovnicemi nebo diferenciálními rovnicemi s konstantními koeficienty. Uplatňujeme u nich princip superpozice (značné zjednodušení jejich řešení), avšak skutečné obvodové prvky nejsou nikdy zcela lineární a jejich parametry jsou závislé na protékajících proudech nebo připojených napětích, takže je pouze otázkou přesnosti řešení, ve které oblasti velikostí napětí a proudů je lze považovat za konstantní.

Můžeme tedy říci, že lineární obvod znamená pouze určitou aproximaci skutečnosti. Pro zjednodušení přístupu a omezení náročnosti řešení těchto typů obvodů je obecná snaha zanedbat možnosti vlivu nelinearity obvodu, avšak v některých případech nelze vliv nelinearity opomenout. Zejména v minulosti bylo řešení těchto obvodů kvůli dostupným prostředkům velmi obtížné, mnohdy téměř či zcela nemožné.

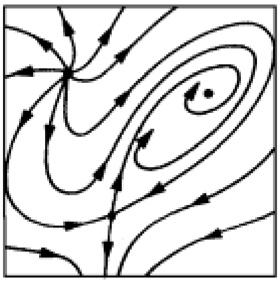
Každý obvod obsahující alespoň jeden nelineární prvek je řazen mezi nelineární obvody, jejichž vlastnosti vyjadřuje soustava obvodových rovnic, z nichž je také nejméně jedna nelineární. Princip superpozice v nelineárních obvodech neplatí, proto se pro jejich řešení nedá použít metod, které jsou na tomto principu založeny. Základními obvodovými prvky, které jsou stejné jako v obvodech lineárních, modelujeme nelineární obvod a setkáváme se v nich se stejnými druhy energie.

Pevný bod fázového portrétu obecného systému popsaného vztahem (2.1) se vyznačuje nulovým tokem, proto musí rychlost toku v pevném bodě vyhovovat vztahu

$$\dot{x} = F\,(t, x) = 0 \tag{2.2}$$

Protože se trajektorie dynamického systému ve fázovém prostoru nemohou nikde protínat, je zřejmé, že pevné body jsou rozhodující pro kvalitativní popis fázového portrétu. Jediný kritický bod, určující typ jednoduchého lineárního systému, může být v případě nelineárních systémů nahrazen více kritickými body s různým charakterem.

Okolím o poloměru *r* bodu fázového prostoru $\mathbf{x_0}$ nazýváme množinu bodů definovanou vztahem $\{\, \mathbf{x} : |\mathbf{x} - \mathbf{x_0}| < r \,\}$ (okolí je tedy n-rozměrná koule). Lokální fázový portrét je pak fázový portrét v podmnožině fázového prostoru definované jako okolí stanoveného bodu. Fázový portrét jednoduchého lineárního systému je kvalitativně ekvivalentní s lokálním fázovým portrétem v libovolném okolí pevného bodu. Základní myšlenkou vyšetřování nelineárních systémů pak je hledání takového okolí jejich pevných bodů, v němž je jejich lokální fázový portrét kvalitativně ekvivalentní s některým typem lineárního systému (viz obr. 2.2) [47].



Obr. 2.2 Příklad fázového portrétu nelineárního systému s nestabilním a sedlovým kritickým bodem a stabilním ohniskem.

2.1.1.1. Linearizovaný systém

Uvažujme nelineární dynamický systém v rovině, který je popsán soustavou

$$\begin{aligned} \dot{y}_1 &= ay_1 + by_2 + g_1(y_1, y_2) \\ \dot{y}_2 &= cy_1 + dy_2 + g_2(y_1, y_2) \end{aligned} \tag{2.3}$$

kde nelineární vektorová funkce $\boldsymbol{g}$ má následující vlastnost

$$\lim_{r \to 0} \frac{g_i(y_1, y_2)}{r} = 0 \tag{2.4}$$

kde *r* je poloměr okolí kritického bodu v počátku.

Soustavu:

$$\begin{aligned} \dot{y}_1 &= ay_1 + by_2 \\ \dot{y}_2 &= cy_1 + dy_2, \end{aligned} \tag{2.5}$$

pak nazýváme *linearizací* dynamického systému.

Linearizace dynamických systémů je důležitou metodou vyšetřování jejich chování. Charakter kritických bodů lze stanovit na základě mnoha užitečných vět, které byly na tomto poli zfor-

mulovány. Zde uvedeme jenom některé základní pojmy a teze, které využijeme v příkladech simulovaných dynamických systémů v následujících kapitolách.

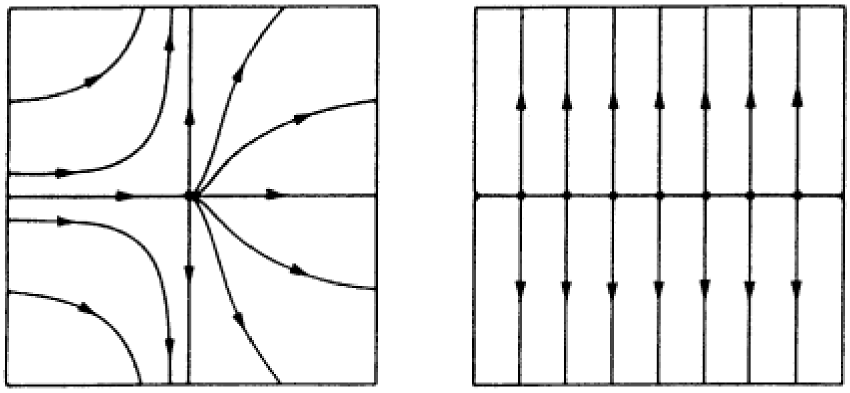
Pomocí Taylorova rozvoje dynamického systému v okolí pevného bodu *(x_{10}, x_{20})* lze snadno ukázat, že pro koeficienty matice $\boldsymbol{A}$ linearizovaného systému platí

$$\boldsymbol{A} = \begin{bmatrix} \frac{\partial F_1}{\partial x_1} & \frac{\partial F_1}{\partial x_2} \\ \frac{\partial F_2}{\partial x_1} & \frac{\partial F_2}{\partial x_2} \end{bmatrix}_{(x_1 . x_2) = (x_{10} . x_{20})} \tag{2.6}$$

Pokud je v okolí jednoduchého kritického bodu nelineárního dynamického systému fázový portrét kvalitativně ekvivalentní s jeho linearizací, pak uvedený kritický bod není středem. Kritický bod je jednoduchý, pokud odpovídající linearizovaný systém v tomto bodě je jednoduchý.

Uvedený teorém je platný pouze pro dynamické systémy v rovině. Středový pevný bod je podle něj jedinou výjimkou, kdy fázový portrét nelineárního systému není v okolí tohoto bodu kvalitativně ekvivalentní s jeho (jednoduchou) linearizací. Přirozeným způsobem lze pak definovat hyperbolické pevné body nelineárních systémů jako body, v jejichž okolí je odpovídající linearizovaný systém hyperbolický. Podle vztahu (2.6) je zřejmé, že hyperbolické pevné body se vyznačují nenulovou reálnou složkou všech vlastních hodnot linearizační matice.

Linearizace v nejednoduchém bodě však neposkytuje informace o chování nelineárního systému (to je zřejmé již z faktu, že linearizovaný fázový portrét obsahuje množinu pevných bodů), (viz obr. 2.3) [47].



Obr. 2.3 Srovnání fázových portrétů nelineárního systému: $\dot{x}_1 = x_1^2, \dot{x}_2 = x_2$
a jeho linearizace v okolí kritického bodu (0,0) $\dot{x}_1 = 0, \dot{x}_2 = x_2$
kde osa x_1 tvoří množinu pevných bodů.

V současnosti neexistuje ucelený klasifikační systém nejednoduchých pevných bodů založený na klasifikaci jednoduchých bodů lineárních systémů. Je to zřejmě dáno tím, že mnoho kvalitativně odlišných systémů může mít v nejednoduchém pevném bodě stejnou linearizaci. Určité vodítko však poskytují kritéria stability pevných bodů:

2.1.1.2. Stabilita kritického bodu

Kritický bod nazýváme *stabilním*, jestliže ke každému okolí N tohoto bodu existuje okolí $M \subseteq N$ takové, že všechny trajektorie, které jím procházejí, zůstávají v okolí N při rostoucím času. Kritický bod, který není stabilní, se nazývá nestabilní.

Kritický bod se nazývá *asymptoticky stabilní*, pokud je stabilní a existuje jeho okolí takové, že každá trajektorie procházející tímto okolím se blíží k uvedenému kritickému bodu při rostoucím času.

Stabilní bod, který *není asymptoticky stabilní*, se nazývá *neutrálně stabilní*. Typickým neutrálně stabilním bodem je středový bod. Uzavřené trajektorie se z jeho okolí nevzdalují, ale do středu rovněž nesměřují.

2.1.1.3. Ljapunovův teorém stability

Jestliže na nějakém okolí kritického bodu existuje zobrazení V fázového prostoru do $\boldsymbol{R}$ takové, že:

1. gradient $\left(\frac{\partial V}{\partial x_1}, \frac{\partial V}{\partial x_2} \right)$ existuje a je spojitý

2. V je positivně definitní

3. $V'\big(\boldsymbol{x}(t)\big) = grad(V) \,.\, \dot{x}(t) = grad(V) \,.\, \boldsymbol{F}(\boldsymbol{x})$ je negativně definitní pak je kritický bod asymptoticky stabilní.

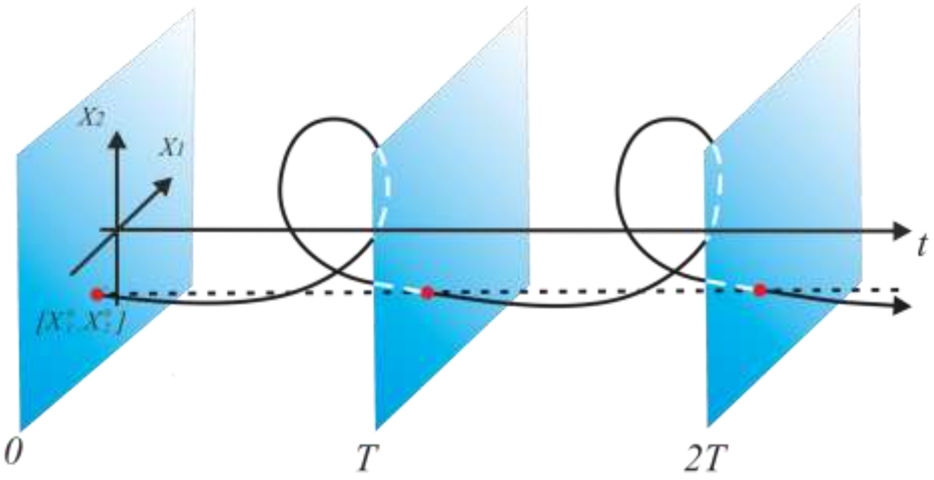
Zobrazení V se nazývá *Ljapunovova funkce*. Pro rovinné systémy není důkaz Ljapunovova teorému obtížný. Bod 3 teorému vyjadřuje derivaci Ljapunovovy funkce ve směru trajektorie systému. Je zřejmé, že v mnoha systémech může hrát roli Ljapunovovy funkce skalární potenciál [47].

2.1.1.4. Poincarého mapy

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

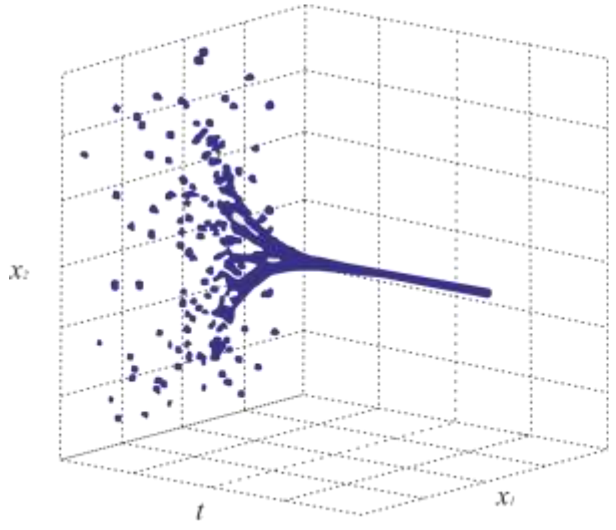
Toto zobrazení se ukázalo jako velmi vhodné pro studium stability i bifurkací periodických řešení. Místo zaznamenávání trajektorií pohybu bodů v časových okamžicích s krokem délky *dt*, v Poincarého zobrazení zaznamenáváme body při kroku délky $T = 2\,\pi/\omega$, tj. v časech $t = kT$, kde $k = 0, 1,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

Poincarého mapu (“Poincaré plot“ nebo “Poincaré map“) lze zjednodušeně chápat jako řez podmnožinou fázového portrétu, ve kterém je hodnota jedné či více stavových proměnných konstantní, viz obr. 2.4.



Obr. 2.4.Poincerého mapy pro neautonomní systém

Sledujeme-li ve stroboskopické fázové rovině přechodný děj konvergující k ustáleným kmitům, dostáváme trajektorii, která se asymptoticky blíží singulárnímu bodu stroboskopické fázové roviny (ustálené periodické kmity se ve stroboskopické fázové rovině zobrazí jako bod, nazývaný též atraktor oblasti), viz obr. 2.5. Nebudou-li tyto ustálené kmity periodické (budou kvaziperiodické či chaotické), pak se trajektorie zobrazí jako soubor bodů vyplňujících určitou plochu (atraktorem je pak celá taková oblast, nazývaná jako oblast podivného atraktoru - "strange attractor"), viz například obr. 2.9.

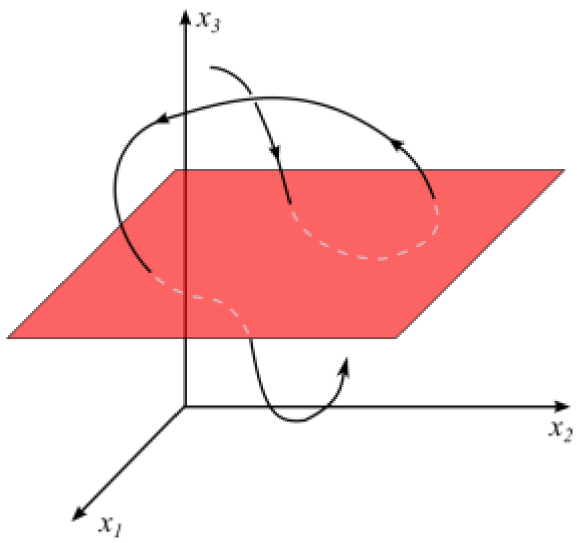


Obr. 2.5 Časový vývoj Poincerého zobrazení – přechodný děj konvergující k ustálenému stavu

Metoda Poincarého zobrazení přináší výhody použitelné při studiu obyčejných diferenciálních rovnic:

1. Redukce dimenze

Konstrukce Poincarého map zahrnuje eliminaci nejméně jedné proměnné systému a vede tak ke studiu nízkodimenzionálního systému (obr. 2.6)



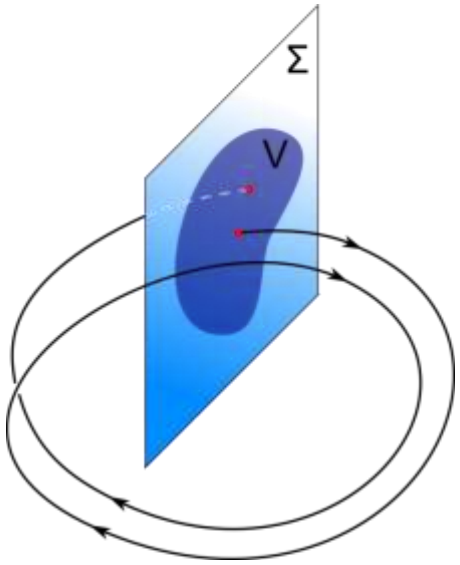
Obr. 2.6 Průnik trajektorie plochou

2. Globální dynamika

V nízkodimenzionálním prostoru (např. dimenze ~ 4) poskytují numericky vypočtené Poincarého mapy komplexní zobrazení globální dynamiky systému. Takovéto příklady zobrazení již byly vícekrát použity v pracích některých autorů např. Holmes a Guckenheimer, nebo Lichtenberg a Lieberman.

3. Jasnost pojmů

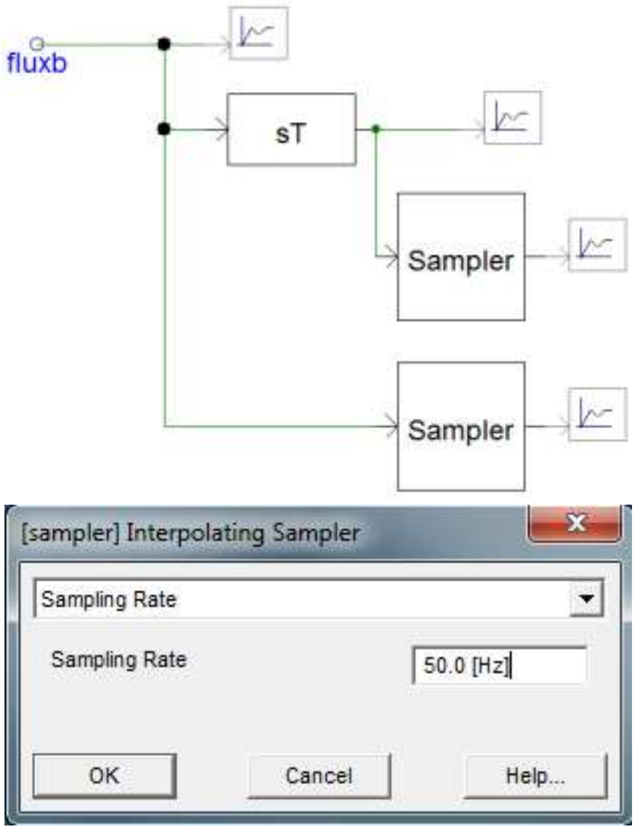
Stanovení mnoha pojmů, jež je u obyčejných diferenciálních rovnic dosti obtížné, může být v mnoha případech jasně provedeno pro odpovídající Poincarého mapu. Například pojem orbitální stability periodické orbity obyčejné diferenciální rovnice. Tento pojem se dá v termínech Poincarého mapy zredukovat na problém stability pevného bodu této mapy, který je jednoduše charakterizován pomocí vlastních čísel mapy, linearizované v blízkém okolí pevného bodu, obr. 2.7. Podrobněji je o tomto problému např. v literatuře [60], [83] aj.



Obr. 2.7 Geometrie Poincarého mapy pro periodickou orbitu

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.

Např. v programu PSCAD, lze získat zmíněnou poincarého mapu ferorezonančních oscilací pomocí jednoduchého zpracování simulovaných signálů dle obr. 2.8. Vytvoření poincarého mapy, provedeme pomocí grafu *xy*, přičemž zobrazíme závislost vzorkovaných (samplovaných) veličin. Nastavení vzorkovacího intervalu lze zadat pomocí frekvence vzorkování viz obr. 2.8.

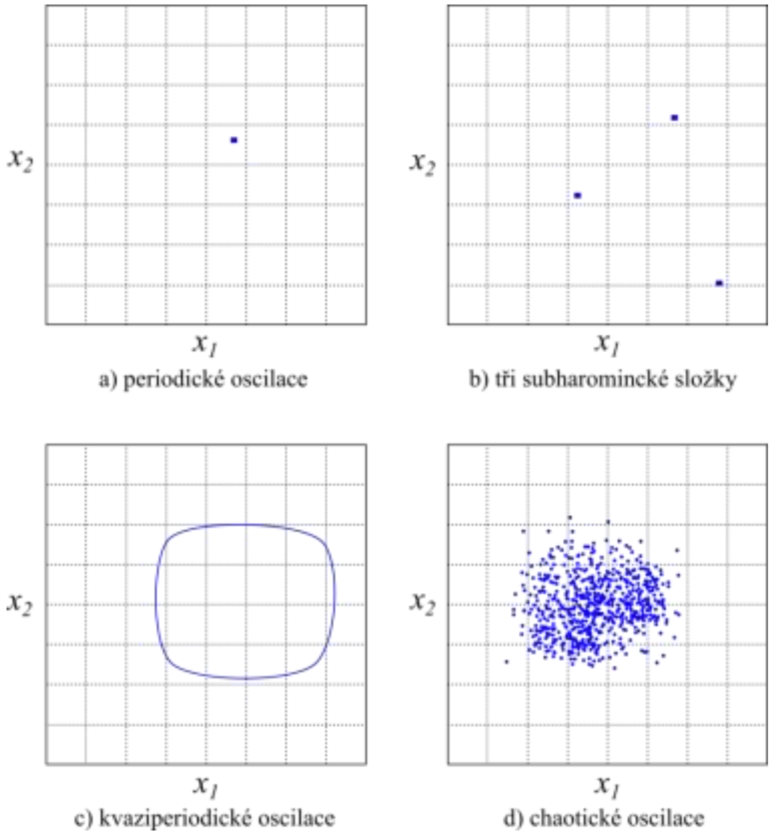


Obr. 2.8 Konstrukce Poincarého zobrazení v prostředí PSCAD a nastavení sampleru

Poincarého mapa je tedy, zjednodušeně řečeno, sestrojení 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. 2.9a,
- systém s *k* subharmonickými složkami bude Poincarého mapa obsahovat konečný počet bodů *(k)*. Pro tři body viz obr. 2.9b,
- kvaziperiodický systém nejsou frekvenční složky souměřitelné s řídící frekvencí a Poincarého mapa se tedy vyvíjí jako uzavřená orbita, obr. 2.9c,

- 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. 2.9d), které v podstatě představují řez atraktorem.

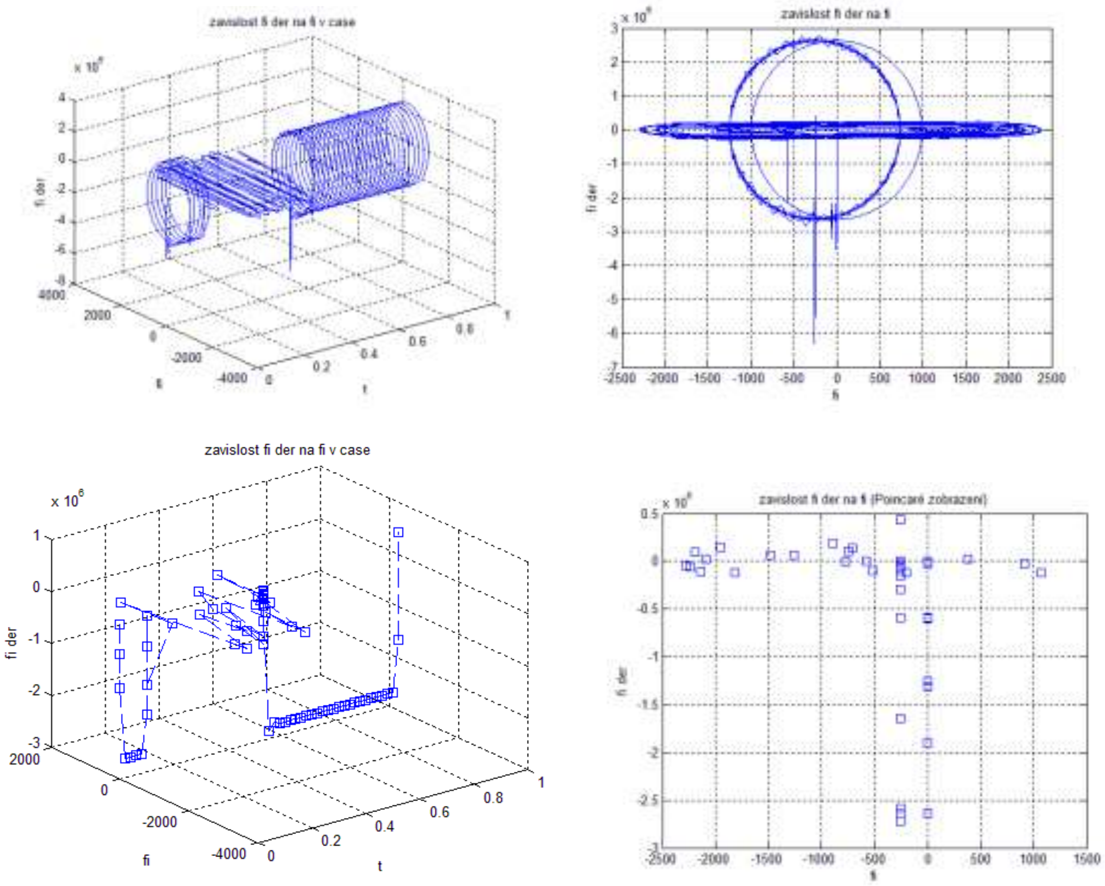


Obr. 2.9 Poincarého zobrazení v ustáleném stavu pro různé odezvy systému

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. 2.9b.

Jestliže se použijí techniky Poincarého zobrazení pro vystihnutí trajektorie, jež se ve fázovém prostoru vyvíjí v čase, lze v případě, že nás zajímají jen kvalitativní stavy chování systému, obdržet průběhy přehledné a vystihující danou skutečnost. Na obrázcích níže lze porovnat ukázku vývoje systému v čase v klasickém zobrazení (3D a 2D projekce fázového prostoru jež se vyvíjí v čase), viz obr. 2.10a a ukázku odpovídajícího vývoje systému (opět ve 3D a 2D zobrazení časového vývoje) s využitím Poincarého zobrazení, viz obr. 2.10b. Ustálené stavy Poincarého mapy chaotického systému jsou odlišných forem a často velmi pozoruhodných tvarů. Tyto orbity mají dvě hlavní vlastnosti:

- mapy neobsahují jednoduché geometrické tvary
- atraktor má jemnou strukturu



Obr. 2.10 Časový vývoj fázového prostoru a časový vývoj s využitím Poincarého zobrazení

Obecně, atraktory nelineárních systémů s více než dvěma proměnnými mohou mít velmi neobvyklé vlastnosti a jejich dimenze nemusí být, jak už bylo v četných pracích prokázáno, celočíselná.

Nelze předpokládat, že Poincarého mapa chaotického chování je mapou jedné skutečné trajektorie. Vzhledem k chybě použité numerické metody a zaokrouhlovací chybě neustále přeskakujeme mezi blízkými trajektoriemi, čímž se může stát, že po dostatečně dlouhé době představují uvedené body skutečně řez limitní množinou. Navzdory tomu, že hustota bodů v mapě roste s délkou vývoje systému, nedosáhne se ani při dostatečně přesném výpočtu vyplnění souvislé oblasti. Lze ukázat, že uvedená limitní množina má skutečně složitou vrstevnatou strukturu, která vyplývá z podstaty chaotického pohybu (trajektorie nejsou periodické, nemohou se protínat, původně blízké trajektorie se od sebe rychle vzdalují, přesto je však vývoj systému omezen na uzavřenou oblast fázového prostoru).

Jak popisuje Macur [47], fázový portrét v ustáleném stavu tvoří trajektorie na "nekonečně zvrásněné" ploše (zjednodušeně si ji lze představit jako hladkou plochu, kterou přeložíme přes sebe, výsledek opět přeložíme a tento proces opakujeme bez omezení). Pro tyto vlastnosti byla limitní množina chaotického pohybu nazvána podivný atraktor. Z hlediska teorie míry představuje podivný atraktor množinu s neceločíselnou dimenzí. Přestože se jedná o plochu, která by měla být dvojrozměrná, způsobí její nekonečná vrstevnatost zvýšení její dimenze na číslo vyšší než 2, avšak nižší než 3 (atraktor nemá objemový charakter). Takové útvary se nazývají fraktály a jed-

nou z jejich charakteristických vlastností je tzv. soběpodobnost. Soběpodobností rozumíme "podobnost" dvou úseků fraktálu v různém měřítku. Absolutní relativnost měřítka (tj. libovolně malý detail fraktálu je stejně složitý jako původní úsek) má za následek nekonečně velkou členitost výsledného útvaru.

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 systémů. Jak grafický, tak numerický výstup z počítače je však nutno považovat za experimentální výstup, který je třeba dále analyzovat.

2.1.1.5. Deterministický chaos

Nepředvídatelnost je významem slova chaos, které vzniklo z řeckého „χαος“. Deterministický chaos je ve své podstatě neperiodické deterministické chování, jež má velkou citlivost na počáteční podmínky. Zároveň je topologicky transitivní (jinými slovy transformuje libovolný interval na libovolný jiný interval) a také má kompaktní periodické trajektorie. Označuje také nepravidelné chování dynamických systémů, které vzniká z přesně deterministického časového vývoje, bez zdroje šumu nebo externí stochasticity.

Dlouhodobou předpověď vývoje dynamiky systémů znemožňuje projevující se nepravidelnost v extrémně citlivé závislosti na počátečních podmínkách. Pro většinu systémů je takovéto chaotické chování typické a jednou ze zajímavostí je, že může vzniknout již u systémů s velmi malým počtem stupňů volnosti.

Dynamický systém můžeme vyjádřit soustavou *N* diferenciálních rovnic prvního řádu jako

$$\frac{dx_i}{dt} = f(x_1, \dots, x_N, r_m); \quad i = 1,2, \dots, N \tag{2.7}$$

kde čas *t je* nezávisle proměnnou a $x_i(t)$ jsou dynamické veličiny, jejichž časová závislost je definována rovnicí (2.7) se specifickými počátečními podmínkami, které můžeme determinovat jako $x_i(0)$; $i = 1, 2, \dots, N$ přičemž systém (2.7) není explicitně časově závislý. Jinými slovy na pravé straně rovnice není přítomná časová proměnná. Můžeme říci, že je autonomní. Funkce f_i je nelineární funkcí x_i, jež je dána parametrem nebo parametry r_m . Rovnice spěje zaprvé k rozvíjení chaotického pohybu a ke změnám řídícího parametru, nebo parametrů r_m , a zadruhé ke změnám charakteristik systému. Predikce autonomního systému nerozhoduje, jelikož systém může být převeden do autonomního systému převedením času *t* do přidané proměnné $x_N + 1$.

Diskrétní dynamický systém můžeme definovat iteračními rovnicemi typu

$$x_i\,(n+1) = f_i\,[x_1(n), \dots, x_N\,(n), r_m]; \qquad i = 1, 2, \dots, N \tag{2.8}$$

začínajícími v počátečním bodě $x_i\,(\emptyset)$; $i = 1, 2, \dots, N$. Takovýto diskrétní systém může vzniknout přirozeným vývojem zmíněného problému, nebo může být jakýmsi převodem, či redukcí předchozího spojitého systému, jenž popisujeme rovnicí (2.7), kterou můžeme zavést pro zjednodušení analýzy, např. pro Poincarého řezy.

2.1.1.6. Bifurkace

Nalezení kvalitativních vlastností fázových portrétů je pro úplnou analýzu dynamického systému zásadní, a to pro všechny možné hodnoty parametrů systému. Pro nelineární systémy je analýza velmi komplexní, a tedy náročná. Proto se využívá nejrůznějších strategií, mezi které např. patří hledání bifurkačních bodů.

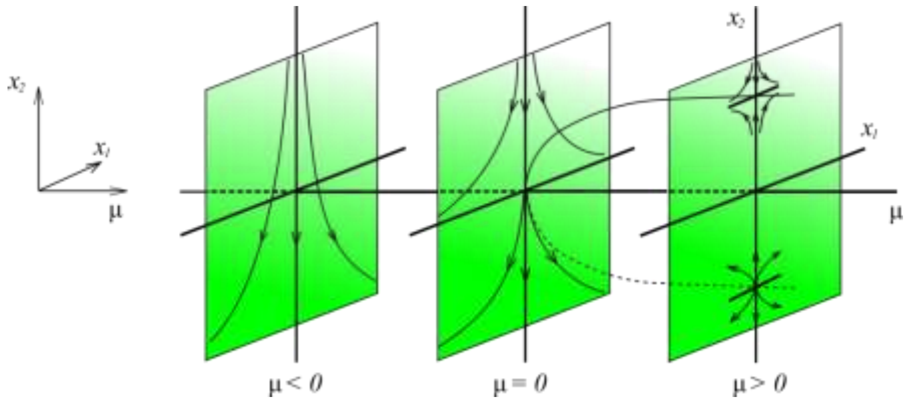
Z počátku vytvoříme předpoklad, že systém je určen jedním parametrem nebo v případě většího počtu parametrů určíme pouze jeden z nich a ostatní budeme považovat za konstantní. Našim cílem je následně zkoumat fázové portréty systému tedy, je-li změna hodnoty daného parametru spojitá. Bifurkačním bodem pak nazýváme kritickou hodnotu parametru, kdy se fázový portrét kvalitativně nemění. Očividně bifurkační body mají stěžejní význam vedoucí k rozložení prostoru parametrů na oblasti, v nichž nedochází k bifurkacím. Systém se pak chová kvalitativně stejně, jinými slovy je systém strukturálně stabilní. O strukturální nestabilitě systému hovoříme, hovoříme-li o okolí bifurkačního bodu [47].

S dimenzí parametrického prostoru roste složitost oblastí a současně i možný počet typů bifurkací. Bifurkace rovnovážných stavů, bifurkace zrodu periodického řešení a bifurkace změny stability periodických řešení jsou nejjednodušší a zároveň nejdůležitější. Bifurkace sedlo-uzel a Hopfova bifurkace jsou pak u ferorezonance nejčastěji se vyskytujícími typy.

Bifurkace sedlo-uzel

Na obr. 2.11 je zobrazen vývoj fázového portrétu odpovídající tomuto typu bifurkace „Saddle-node bifurcation“ nazývaný též „Fold bifurcation“. Typickou vlastností tohoto typu bifurkace je vznik dvou pevných bodů a jejich vzdalování se při spojité změně parametru μ, nebo přibližování dvou pevných bodů a jejich následný zánik při opačném vývoji.

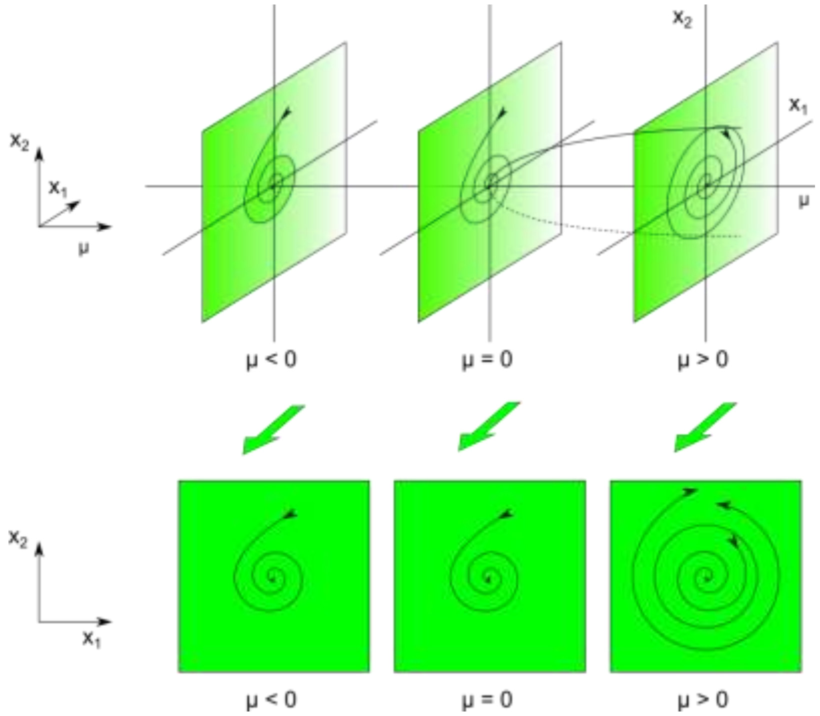
Rovnovážný stav nenacházíme v případě, je-li hodnota parametru $\mu < 0$. Je-li hodnota $\mu > 0$, nacházíme zde jeden nestabilní a jeden stabilní rovnovážný stav. Bodu o hodnotě $\mu = 0$ odpovídá bifurkační bod. Výskyt kvadratických nelinearit je typickým rysem systémů vykazujících tento typ bifurkace, viz [47].



Obr. 2.11 Bifurkace sedlo - uzel

Hopfova bifurkace

Na obr. 2.12 je zobrazen vývoj fázového portrétu odpovídající různým hodnotám parametru μ pro tento typ bifurkace. Tvar stabilního ohniska má fázový portrét, nabývá-li parametr hodnot $\mu < 0$. V případě parametru nabývající hodnot $\mu > 0$ se stává pevný bod nestabilním a zároveň vzniká stabilní limitní cyklus se zvětšující se amplitudou a s rostoucí hodnotou parametru μ. Bodu o hodnotě $\mu = 0$ odpovídá opět bifurkační bod, v němž dochází k tzv. zrodu nebo zániku limitního cyklu.

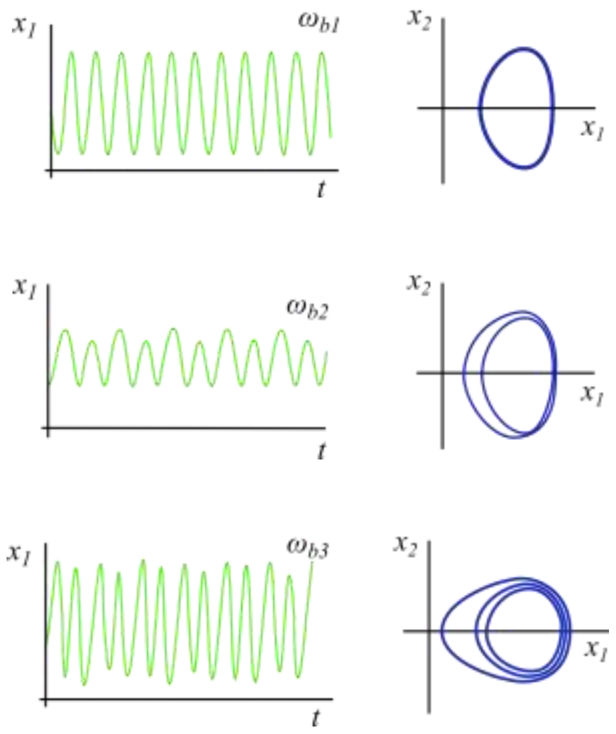


Obr. 2.12 Hopfova bifurkace

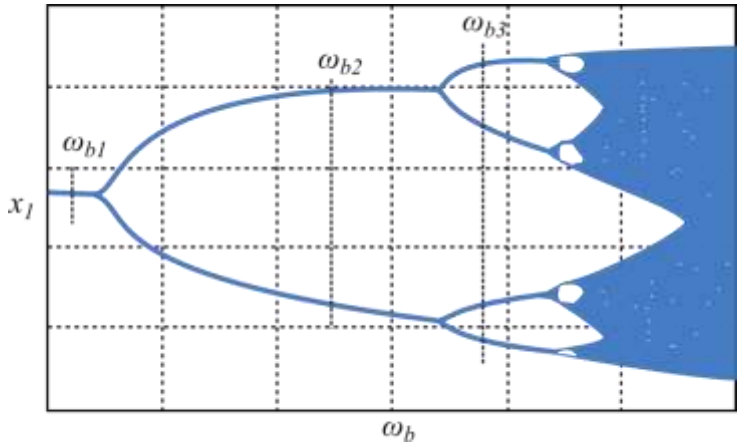
Další typy bifurkací

Dalším typem bifurkace jsou např. transkritická neboli „křížová“ bifurkace („Transcritical bifurcation), při níž se mění stabilita dvou limitních cyklů, tzv. „vidličková“ bifurkace („Pitchfork bifurcation“), kde z jednoho limitního cyklu vznikají dále tři limitní cykly, tzv. bifurkace „zdvojení periody“ („Period doubling bifurcation“), kde se stabilní trajektorie mění na nestabilní, a jež se dále rozvětvuje do uzavřené trajektorie s dvojnásobnou periodou. Na obr. 2.13 je zjednodušeně zobrazeno zdvojení periody neboli zrod vícenásobných oscilací. Oscilace o více *k*-periodách, ne však dvojnásobných, se zrodí z limitního cyklu odpovídajícího jedné periodě oscilací, a tak vzniká torus *k*-dimenzionální se stabilními i nestabilními periodickými trajektoriemi, tzv. kvaziperiodické chování, aj.

Na obr. 2.13 jsou zobrazeny příklady dílčích typů chování systému po jevu označovaném jako bifurkace. Jednotlivé typy vznikly po bifurkaci předešlého, jinými slovy změnou jednoho parametru ω_b. Bifurkační diagram ve své podstatě zobrazuje tyto změny (počet bodů v ustáleném stavu v Poincarého zobrazení). Na obr. 2.14 je zobrazen bifurkační diagram, který takto může vypadat. Počet period limitního cyklu ve fázovém prostoru je dán počtem bodů pro určitou hodnotu ω_b.



Obr. 2.13 Bifukace zdvojování periody



Obr. 2.14 Bifurkační diagram pro veličinu y s proměnným parametrem omega

2.2 Přepětí v ES

V reálných energetických sítích veškeré změny napětí a proudu neprobíhají skokově tak, že by jeden ustálený stav přešel na druhý náhle, ale mezi dvěma ustálenými stavy probíhá vždy přechodný jev. Po jeho odeznění je možné mluvit o konečném ustáleném stavu.

Jedním z následků přechodných dějů je vznik přepětí. Přepětí je jakékoliv časově závislé zvýšení síťového napětí nad hodnotu stanovenou normou, odvozenou od nejvyššího napětí pro zařízení. Aktuální procentuální hodnota napětí, kterou norma označuje za přepětí je 110 % ze jmenovité hodnoty napětí a vyšší. Přepětí se může vyjadřovat buď absolutně svoji vrcholovou hodnotou (ve voltech) nebo jako poměrná hodnota pomocí činitele přepětí. Často se přepětí vyjadřuje v procentech, přičemž 100 % představuje jmenovitou hodnotu napětí.

Při vyjádření velikosti přepětí pomoci činitele přepětí se ve většině případů používá jmenovitý činitel přepětí proti zemi, který je dán jako poměr vrcholové hodnoty přepětí mezi fází a zemí a vrcholové hodnoty nejvyššího napětí pro zařízení a relativní činitel přepětí, který se vyjadřuje jako poměr mezi vrcholovou hodnotou přepětí a vrcholovou hodnotou fázového napětí o síťové frekvenci bezprostředně po utlumení přechodného děje. Jmenovitý činitel přepětí se obvykle používá při teoretických fyzikálních úvahách a relativní činitel přepětí se používá při vyhodnocování výsledků měření přechodových jevů.

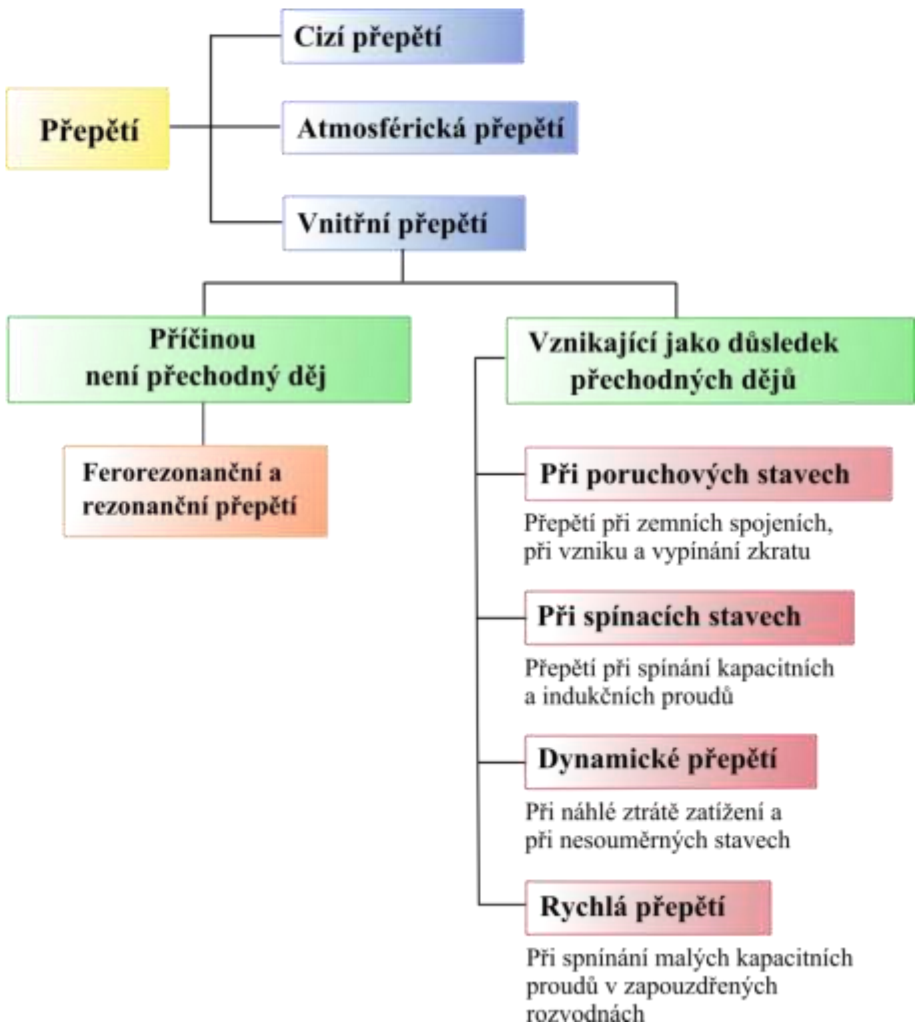
Přepětí lze rozdělit podle různých hledisek. Rozdělení přepětí dle příčiny vzniku lze vidět na obrázku (obr. 2.15). Dále se můžeme setkat s dělením podle tvaru, resp. podle doby trvání přepěťové křivky (dočasná, přechodná přepětí).

Důsledkem provozu el. sítě vznikají provozní (nebo také tzv. vnitřní) přepětí. Tyto přepětí vznikají v síti důsledkem přechodných jevů při provozních spínáních, zemních spojeních a zkratech a rovněž při rezonančních, či při jiných zvýšení napětí. Jejich velikost závisí na provozním napětí zařízení a může dosáhnout až několikanásobku provozního napětí. Vnitřní přepětí je možno dále rozdělit na dočasná přepětí a spínací přepětí.

Dočasná přepětí jsou oscilační přepětí, která mají poměrně dlouhou dobu trvání (několik sekund až několik tisíc sekund) a jsou buď netlumená, nebo jen slabě tlumená. Zpravidla jsou způsobena spínacími operacemi, poruchovými stavy (zemní spojení, zkraty, nesouměrné poruchy, rezonanční resp. ferorezonanční stavy) a náhlou ztrátou zatížení.

Spínací přepětí vznikají buď spínací operací, zkratem nebo jinou příčinou. Mají krátkou dobu trvání v časovém intervalu přibližně 0,1 μs až 10 ms a jsou silně tlumená. Jsou to vlastně přepětí přechodné povahy, jejichž příčinou je přechodný jev.

Speciálním případem spínacích přepětí jsou tzv. rychlá (resp. velmi rychlá) přepětí, vznikající při spínání malých kapacitních proudů odpojovači v zapouzdřených rozvodnách s izolací elektronegativním plynem (SF_6).



Obr. 2.15 Rozdělení přepětí dle příčiny vzniku

2.3 Ferorezonanční jev

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 měřícího 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.

Možnost efektivně předpovídat ferorezonanční jev se výrazně opírá o přesnost použitých modelů transformátorů a parametrů elektrické sítě. Úspěšná volba vhodného simulačního modelu nám dovolí relativně přesně určit stupeň vlivu různých součástí elektrických sítí a parametrů na vznik ferorezonančního jevu. V dnešní době existují v praxi ověřené modely, které dokáží vygenerovat tzv. mapy, které definují hranice mezi bezpečnými regiony a regiony se zvýšenou pravděpodobností vzniku ferorezonance v elektrizační soustavě [22].

Jev ferorezonance má v elektrizační soustavě velký význam i z hlediska napěťových přístrojových transformátorů. Při splnění konkrétních počátečních podmínek a určité síťové kapacitní reaktanci může ferorezonance představovat značné riziko pro napěťové transformátory kvůli velkým nadproudům v primárních vinutích. Z toho důvodu je nutné chránit tyto prvky elektrizační soustavy. Praktická měření ukázala, že poměrně spolehlivou ochranou je zapojení malého odporu do sekundárního vinutí. Z této ochrany se postupně vyvíjejí modernější aktivní kompaktní ochrany [57], [68], [16], [2].

Jedním z příčin vzniku ferorezonančního jevu je nelineární voltampérová charakteristika cívek se železným jádrem. Tuto vlastnost lze popsat tzv. PEC charakteristikou (power frequency excitation characteristic – výkonová frekvenční budící charakteristika). Pro získání PEC je potřeba použít dvě metody. První metoda je založená na simulaci elektromagnetických přechodných dějů, které jsou původem skokové změny napětí. Druhá metoda pozůstává z Fourier-MacLaurinovy aproximace a umožní získat ještě jednodušší analytické vyjádření, které spolehlivě interpretuje vlastnost prvků v nasyceném stavu a zvláště v extrémně nasyceném stavu [44].

V současné době existují speciální prvky, které jsou schopné potlačit jev ferorezonance. Jedná se hlavně o ochranu před základní ferorezonancí (fundamental ferroresonance – FF). K určení místa nasazení zmiňovaných ochran slouží právě dříve zmíněná PEC charakteristika [45], [52], [32].

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 magnetostrikci při vysokých hodnotách magnetické indukce. Transformátor je při ferorezonanci často popisován výskytem drnčení či jiného nezvyklého hluku. Tyto zvuky jsou znatelně odlišné od zvuků, vyskytujících se při nasycení transformátoru ze sinusového zdroje jmenovitého napětí a kmitočtu.

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.

Nový rozměr pohledu a možnosti uplatnění přinesla aplikace neuronových sítí pro analýzu ferorezonančních obvodů. Nový algoritmus učení založený na RBF (Radial Basis Function Network) neuronových sítích se obecně používá pro modelování chaotických systémů. Algoritmus optimalizuje schopnost učení neuronové sítě pomocí pravidla centrálních vektorů a využívání centralizování funkcí síťových prvků. Velkou výhodou zmíněné metody je rychlost konver-

gence, stabilita a ověřené použití pro modelování náhodných jevů v energetických systémech [69], [51], [43], [69], [14], [40].

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 nelineární indukčnost (feromagnetickou s možností nasycení), kapacitu, napěťový zdroj (obecně sinusový) a nízké ztráty.

2.3.1 Proces deformace průběhu proudu a napětí v obvodech se železem

Uvažujme, podle [61], že budící cívka magnetického obvodu se železem, která má *N* závitů, se připojí na zdroj harmonického napětí

$$u(t) = U_m \sin \omega t \tag{2.9}$$

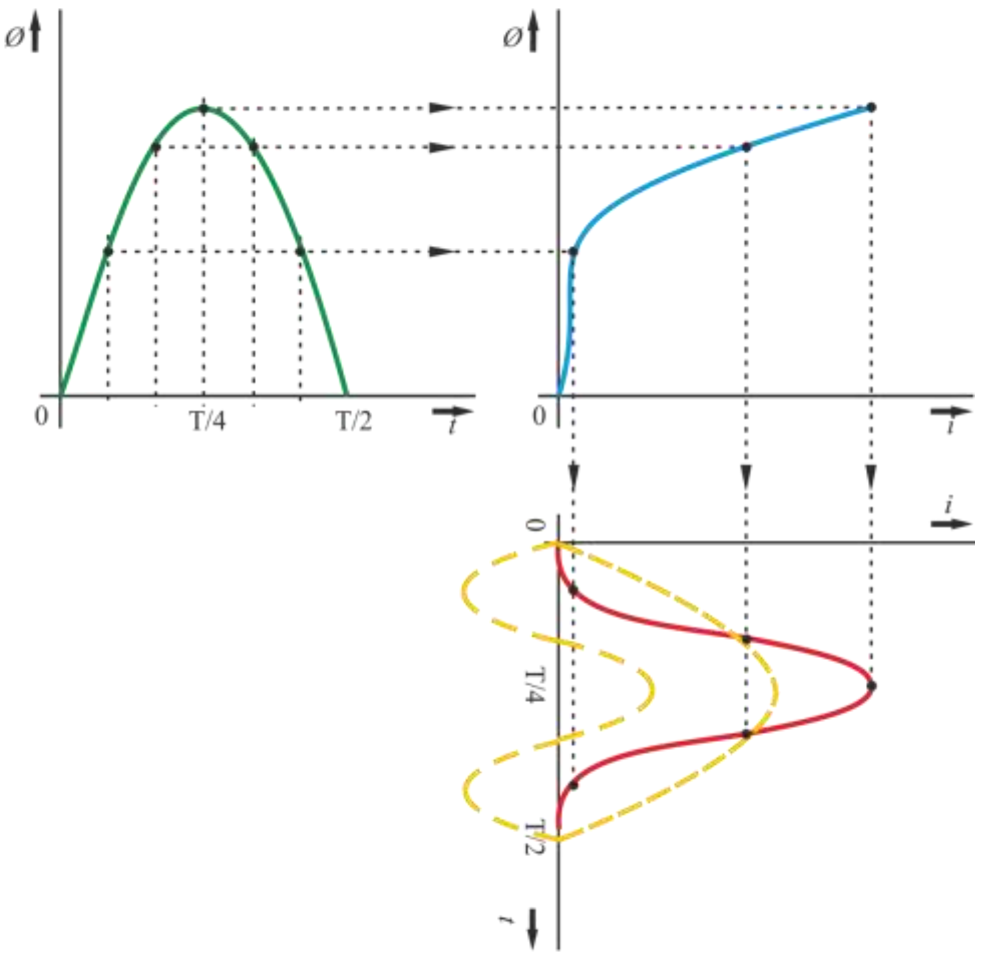
Magnetický tok, který vznikne v magnetickém obvodu, indukuje v budícím vinutí stejně velké harmonické napětí

$$u_i(t) = N \frac{d\phi(i)}{dt} = U_m \sin \omega t \tag{2.10}$$

Okamžitá hodnota magnetického toku je

$$\phi(i) = \int \frac{U_m}{N} \sin(\omega t) dt = -\frac{U_m}{\omega N} \cos \omega t = \frac{U_m}{\omega N} \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right) \tag{2.11}$$

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 $\phi = \phi(i)$, viz obr. 2.16 [28]. Z tohoto průběhu je zřejmé, že magnetizační proud obsahuje výraznou třetí harmonickou.



Obr. 2.16 Časový průběh magnetizačního proudu pro harmonický magnetický tok [28]

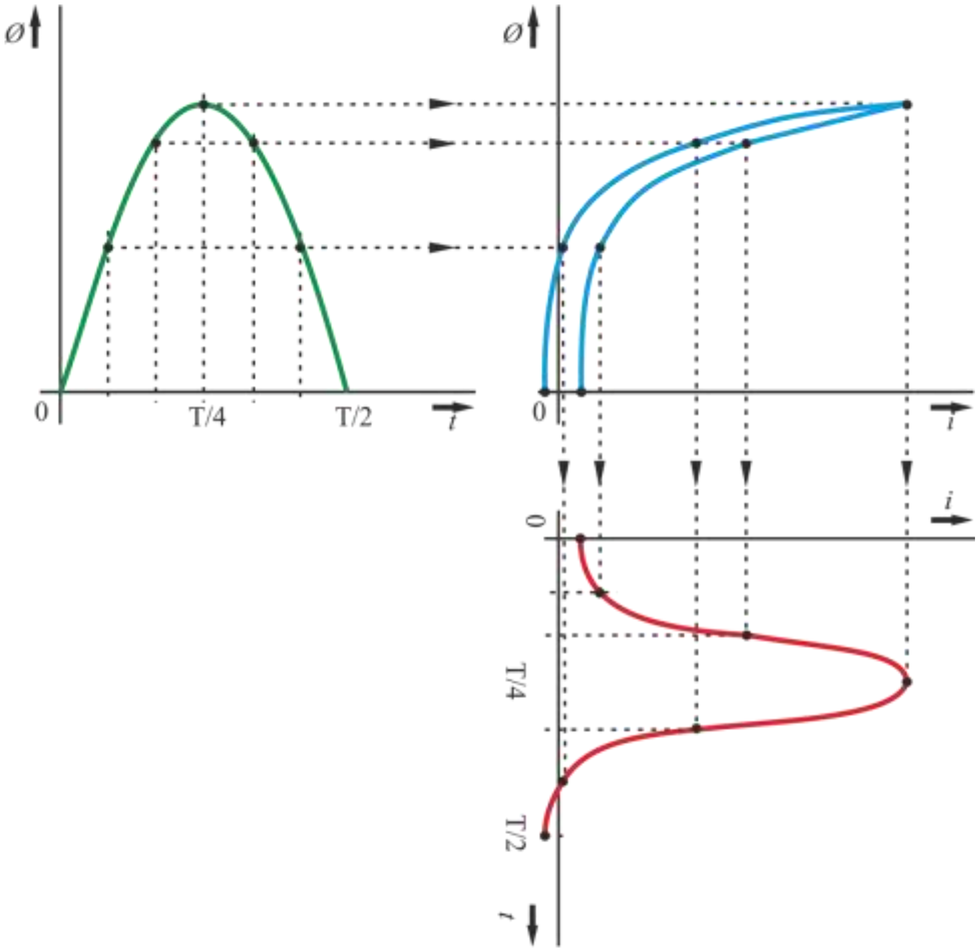
Převážné vlivy na nelinearitu v železném jádru, např. transformátoru, ukazuje schéma naznačené na obr. 2.17.

Obr. 2.17 Převážné vlivy na nelinearitu v železném jádru

Saturace má z těchto tří vlivů největší účinek na to, co Swift [72] 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. [12].

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 [73]. 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.



Obr. 2.18 Časový průběh magnetizačního proudu pro harmonický magnetický tok při uvažování hystereze [28]

Uvažujeme-li i hysterezi, má magnetizační charakteristika tvar hysterezní křivky, obr. 2.18 na kterém je obdobně jako v předchozím případě ukázáno, jak by se z ní dal získat časový průběh proudu *i*.

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. Při zanedbání hystereze výsledky simulace neodráží přesné fyzikální chování obvodů za přítomnosti cívky se železným jádrem. Pro úspěšnou analýzu ferorezonančních dějů, včetně základního, subharmonického, kvazi-

periodického a chaotického průběhu, v elektrické sítí je tedy zapotřebí uvažovat minimálně jednofázový model transformátoru s hysterezí. Důsledky hystereze, kapacity vinutí transformátoru, kapacity vedení a jiných počátečních podmínek jsou velmi aktuálním předmětem diskusí na vědeckých konferencích [64], [19], [15], [63].

Vidíme, že nulové hodnotě toku odpovídá nenulová hodnota proudu. Tento budící proud tak obsahuje činnou složku, tzv. ztrátový proud. Vezmeme-li opačný postup, tj. necháme-li budícím vinutím protékat harmonický proud, vznikne v jádru nesinusový magnetický tok, který ve vinutí indukuje nesinusové napětí. 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 [10], [12], [20], [28], [53], [73] či [74].

2.3.2 Jevy a parametry ovlivňující vznik a průběh ferorezonance

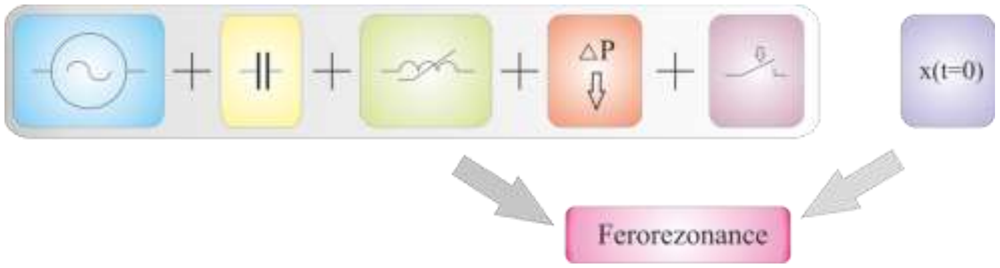
Ferorezonance se v elektrizační soustavě vyskytuje při určité konfiguraci sítě v provozním či mimoprovozním stavu. Veškeré metody analýzy pak vedou ke zjišťování podmínek, které vznik ferorezonance umožňují. Jak už bylo uvedeno, může ferorezonance nastat po provedení spínacích manipulací (např. připojení vedení, přípojnic, provádění opětného zapínání) zvýšení napětí. Aby se ferorezonance mohla v elektrizační soustavě objevit, musí v ní podle [34] existovat:

- zdroj napětí
- kapacita
- transformátor nebo indukčnost se syceným feromagnetickým jádrem
- nízké ztráty

Elektroenergetické systémy sestávají z velkého počtu nelineárních induktorů se železným jádrem (výkonové transformátory, měřící transformátory, reaktory) stejně jako kondenzátorů (kabely, dlouhá vedení, kapacitní měřící 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. Jinak řečeno, uvedené podmínky jsou podmínkami nutnými, nikoliv však postačujícími. Do hry totiž ještě vstupují počáteční podmínky, kterými jsou hodnoty daných veličin v čase vzniku nějakého přechodného děje (např. při spínání v čase $t = 0$), a které výraznou měrou ovlivňují poměry v soustavě při přechodném ději. Rozhoduje tedy velikost zapínacího proudu, okamžik zapnutí a také charakteristiky sítě (zkratový výkon, impedance vedení apod.)

Dynamické chování potencionálně ferorezonančního obvodu je popsáno nelineárními diferenciálními rovnicemi, jejichž nelinearita je způsobena právě díky nelineární indukčnosti. Možné metody pro řešení takovýchto rovnic jsou popsány v řadě publikací, např. [21], [38], [47], [59], aj.



Obr. 2.19 Podmínky pro vznik ferorezonance

Aby bylo možné danou problematiku vůbec řešit, musíme dodržet podle [50] určitý postup:

- určit náhradní elektrický obvod pro konkrétní řešenou oblast elektrizační soustavy
- sestavit matematický model, který by co nejvěrněji reprezentoval tento obvod (tedy soustavu nelineárních diferenciálních rovnic)
- nalézt vhodný matematický aparát pro postupné řešení soustavy rovnic při malých změnách počátečních podmínek pro nalezení kritických stavů
- stanovit počáteční podmínky, které lze a které nelze měnit, a sled změn jejich hodnot

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. 2.19 [28].

Ferorezonanční jevy mají charakter přechodný i trvalý a projevují se zvýšeným napětím (ferorezonančním přepětím). Zvláště nebezpečné jsou pak jevy trvalejšího rázu, neboť vyvolávají nedovolené zvýšení napětí, které může poškodit nejen samotný transformátor, ale v případě měřících transformátorů také ostatní připojené přístroje. Zde zároveň dochází k nepřesnostem při mě-

ření a ke znemožňování funkce jistících přístrojů. Mechanické kmity, vyvolané subharmonickými kmity mohou dále poškodit jistící přístroje a vyvolat, podle [37], jejich nežádoucí funkci.

2.3.3 Ferorezonanční přepětí

Obzvlášť nebezpečný druh přepětí je přepětí vznikající v důsledku rezonance v části systému. Amplituda ferorezonančních přepětí může prakticky dosahovat několika násobek hodnoty amplitudy napětí v ustáleném provozním stavu.

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 nepravidelným kmitáním ruček voltmetrů jednotlivých fází.

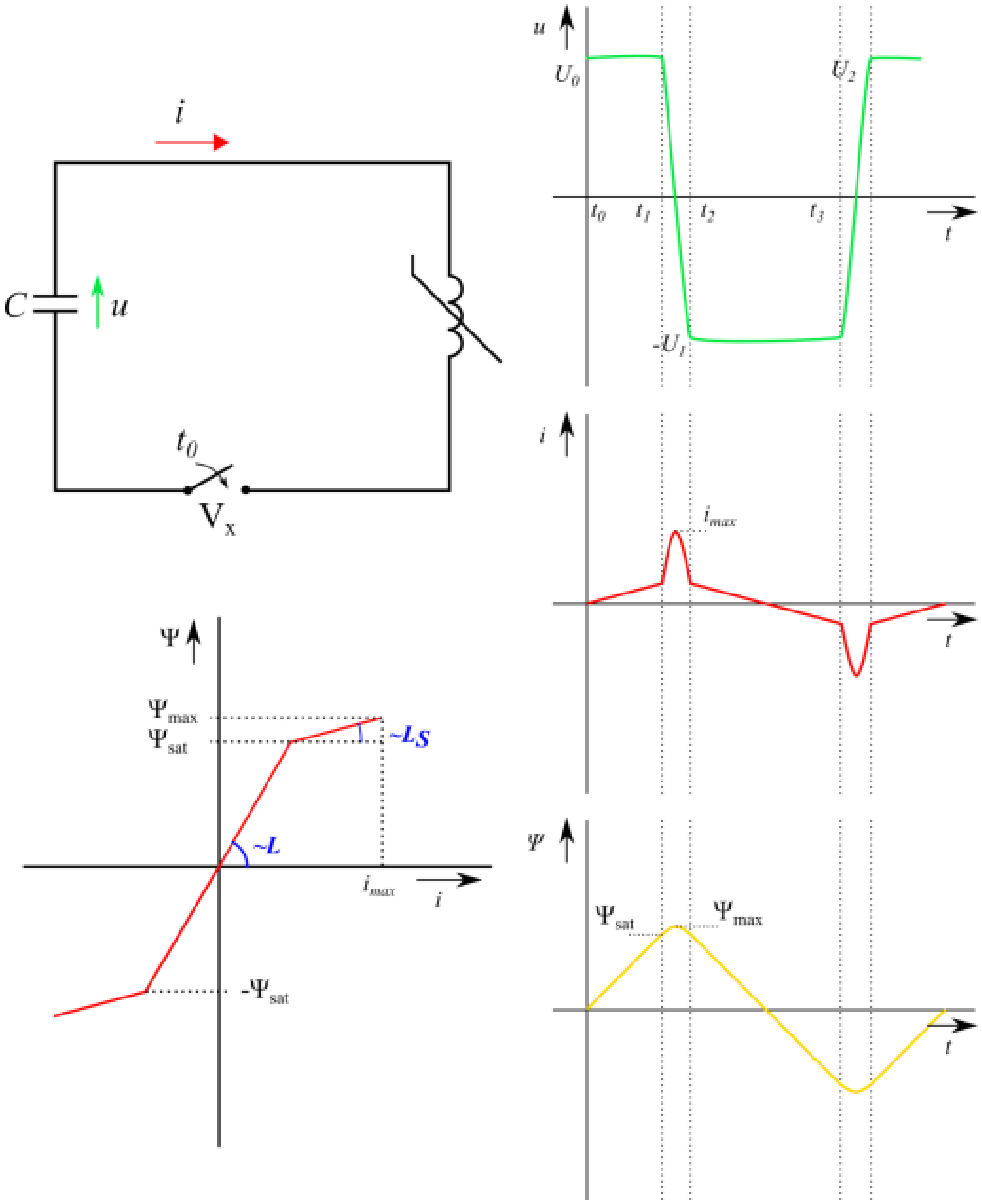
Příklady průběhu můžeme vidět na obr. 4.23 Průběh napětí při ferorezonančním jevu a jeho srovnání s harmonickým průběhem napětí. Přítomnost jevu ferorezonance v elektrizační soustavě způsobuje jeden nebo více mimořádných jevů, které mohou být pozorovány nebo změřeny. Nejzávažnější jsou zejména výrazně zvýšené maximální hodnoty napětí a proudu (v extrémních případech 5 i více násobek nominální maximální hodnoty), současně výrazné zkreslení a nepravidelné tvary průběhů napětí a proudů.

2.4 Analýza ferorezonančního obvodu

V současné době existují různé metody řešení jednoduchých i složitějších ferorezonančních obvodů. Graficko-numerické metody patří mezi nejpřehlednější a nejlépe čitelné. Stejně tak lze použít analytické či jiné numerické metody. Vzhledem ke složitosti a množství výpočtů se i zde s oblibou využívá síla moderní výpočetní techniky.

2.4.1 Sériový ferorezonanční obvod (SFO)

Využití graficko-matematické metody na příkladu jednoduchého sériového ferorezonančního obvodu lze snadno využít pro pochopení principu ferorezonance. Pro lepší zjednodušení se zanedbávají ztráty obvodu a uvažuje zjednodušená magnetizační charakteristika železného jádra cívky. Zanedbáním ztrát se v obvodě vybudí periodická ferorezonance.



Obr. 2.20 Schéma jednoduchého SFO [28]

Před sepnutím spínače V_X předpokládáme na kondenzátoru napětí U_0. Po sepnutí spínače v čase t_0 začne protékající proud oscilovat s frekvencí $\omega_1 = 1/\sqrt{LC}$.

V případě, kdy $U_0 = cos\,\omega_1 t$ je vztah mezi magnetickým tokem a okamžitým napětím dán vztahem:

$$\Psi = \int udt = \frac{U_0}{\omega_1} \sin \omega_1 t \tag{2.12}$$

Pokud poměr U_0/ω_1 je větší jako hodnota saturačního magnetického proudu ψ_{sat} dojde k nasycení železného jádra a indukčnost cívky se změní z L na L_S. Indukčnost L_S je podstatně menší než původní hodnota L, čímž dojde k vybití kondenzátoru formou oscilačních pulsů

s frekvencí $\omega_2 = 1/\sqrt{L_S C}$. Dojde-li k vyrovnání elektrostatické energie nahromaděné v kondenzátoru $1/2\, C U_1^2$ a elektromagnetické energie nahromaděné v cívce $1/2\, L I^2$ dosáhne magnetický tok a proud své špičky. V čase t_2, kdy přestane kondenzátor dodávat energii cívce, se situace otočí, tedy i napětí na cívce a energie uložená v jádru cívky, se začne přesouvat zpátky do kondenzátoru. V čase t_3 dosáhne magnetický tok v jádru hodnoty $-\psi_{sat}$ a situace se pravidelně opakuje, jelikož neuvažujeme ztráty. V praxi je hodnota ω_1 velmi malá, proto můžeme uvažovat, že napětí U_0, U_1 a U_2 jsou téměř stejné a tedy perioda oscilací v nenasyceném stavu je $2\pi = \sqrt{LC}$ a v nasyceném stavu $2\pi\sqrt{L_S C} + 2\,(t_3 - t_2)$, přičemž $t_3 - t_2 = 2\,\Psi_{sat}/U_0$. Pro frekvenci f ($f = 1/T$) pak platí:

$$\frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} < f < \frac{1}{2\pi\sqrt{L_S C}} \tag{2.13}$$

I v ideálních podmínkách ovšem tato počáteční frekvence závisí na nelinearitě cívky a počáteční hodnotě U_0 a uvažováním reálných podmínek dochází ke změně magnetického toku ve stavu nasycení podle následujícího vztahu:

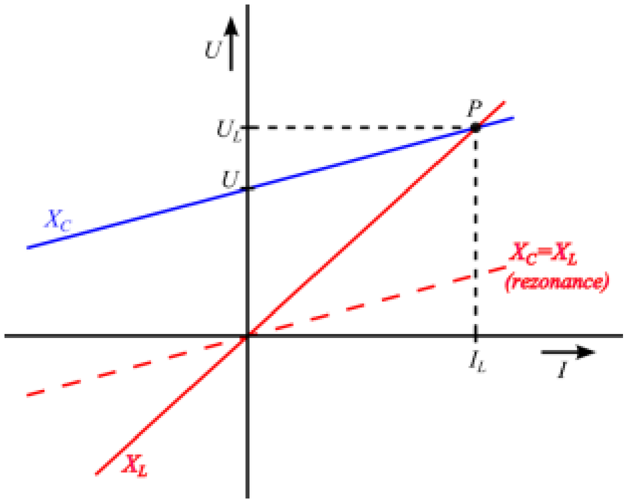
$$\Delta\psi = 2\psi_{sat} = \int_{t_2}^{t_3} u\,dt \tag{2.14}$$

a zmenšování amplitudy napětí, co ovlivňuje i frekvenci. Dochází k tzv. tlumení ($U_2 < U_1 < U_0$)

V případě, že je obvod ještě externě buzen zdrojem s periodickým, často harmonickým signálem, dochází pouze k ustálení frekvence na kmitočtu budícího zdroje nebo jeho zlomku.

Nelinearita, zejména indukčností cívek, v praxi způsobuje, že k ferorezonanci dochází nejenom pro jednu kombinaci kapacity kondenzátoru a indukčnosti cívky, ale pro větší rozsah hodnot kapacit kondenzátorů.

Uvažováním jednoduchého obvodu jako v předchozím případě s připojeným externím síťovým harmonickým zdrojem a lineární indukčností cívky by grafické řešení takového obvodu mohlo vypadat následovně:



Obr. 2.21 Grafické řešení SFO

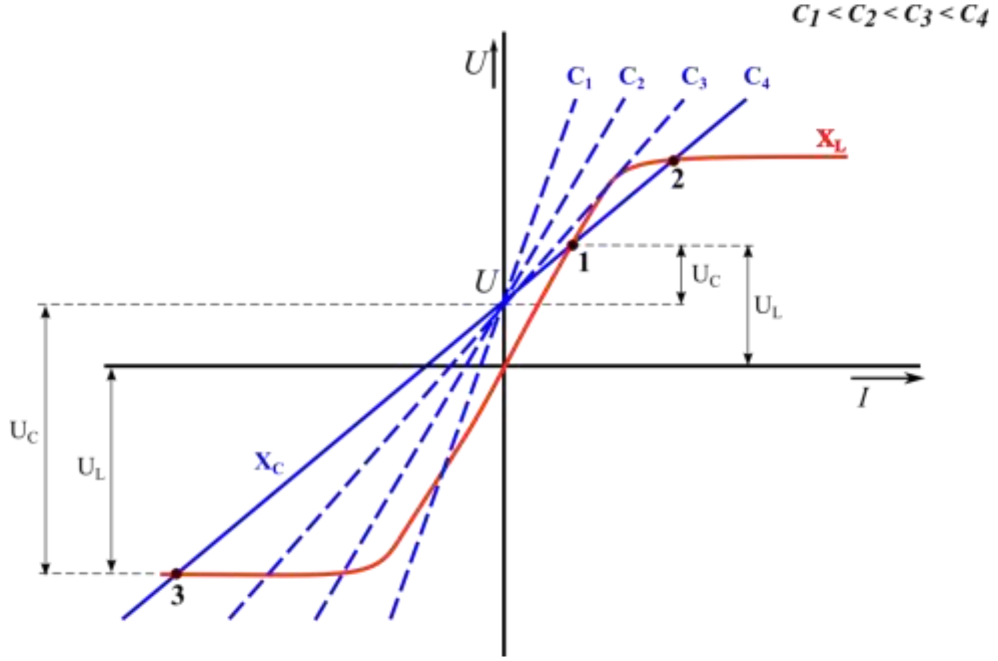
Přímky reaktancí X_L a X_C představují řešení rovnice:

$$U_L = j\omega \mathrm{LI} = \mathrm{j}X_L I = U - (-jX_C), \tag{2.15}$$

kde souřadnice průsečíku *P* reprezentují hodnotu napětí a proudu na cívce.

Ve stavu rezonance, pokud neuvažujeme vůbec žádné ztráty, nabývá grafické řešení nekonečné hodnoty napětí i proudu, jelikož přímky reaktance X_L a X_C jsou rovnoběžné.

V případě potřeby zohlednění ztrát reálných prvků, může být přímka reaktance kondenzátoru X_C zaměněna za elipsu nebo uvažování nelineárního nasytitelného induktoru. V případě řešení s využitím nelineární cívky grafické řešení vypadá podobně následujícímu obrázku.



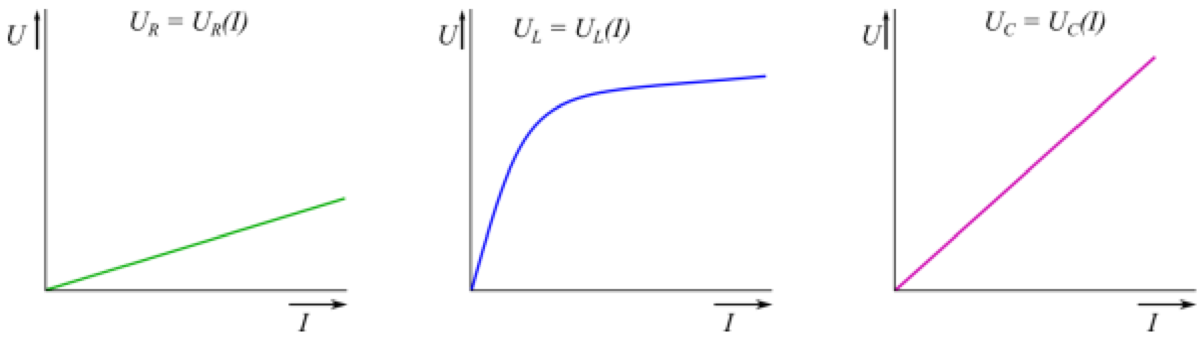
Obr. 2.22 Řešení SFO s nelineárním induktorem [28]

Hned na první pohled musí být zřejmé, že v tomto případě se objevují řešení hned tři. Mezi stabilní body patří průsečíky *1* a *3*, které existují i v ustáleném stavu. V extrémním případě, pokud by kapacita kondenzátoru byla dostatečně malá, tedy přímka reaktance X_C velmi strmá, je možné dosáhnout pouze jediného průsečíku v bodě *3*. Přesto, že průsečík je stabilní, není v praxi využíván, neboť vykazuje kapacitní charakter a na kondenzátoru se tak objevuje příliš vysoké napětí, což je nežádoucí, neboť hrozí proražení dielektrika.

V praxi nejžádanější je dosažení řešení v průsečíku *1*, který vykazuje induktivní charakter. V tomto případě proud zaostává za napětím a na kondenzátoru je proto jenom malé napětí. Za určitých okolností může dojít ke zmizení průsečíku *1* a to hlavně při zvýšení napětí zdroje, protože se současně posune i přímka kapacitní reaktance X_C. Dojde-li ke zmizení bodu *1*, řešení se překlopí do bodu *3*, což má za následek nárůst proudu, který způsobí pokles napětí zdroje. Tímto procesem může dojít k znovuvytvoření bodu *1* a řešení se překlopí zpátky a děj se může cyklicky náhodně opakovat, přičemž je téměř nemožné jakkoliv předpovídat jeho chování. Jako jediný nestabilní bod je průsečík *2*, který se může objevit během přechodných jevů.

Zatím byl zkoumaný sériový ferorezonanční obvod považován za bezeztrátový pouze s uvažovanou nelinearitou akumulačních prvků, zejména cívky. Chceme-li znát chování obvodu a nezanedbat vznikající ztráty zakomponuje se do obvodu i ideální rezistor, který představuje právě tyto ztráty. Pro zjednodušení výpočtů nahradíme periodické odezvy obvodu harmonickými o stejné efektivní hodnotě. Do výpočtů se tímto krokem zanese určitá chyba, nicméně výpočty jsou výrazně jednodušší.

Ve zjednodušeném případě, kdy rezistor i kondenzátor vykazují lineární vlastnosti podle následujícího obrázku a pouze u cívky se uvažuje nelinearita, pak pro efektivní hodnoty napětí U_L, U_R a U_C v závislosti na efektivní hodnotě proudu platí dále uvedené vztahy.

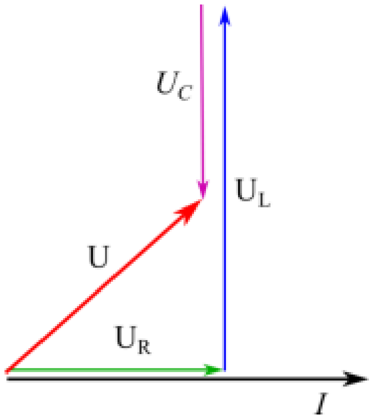


Obr. 2.23 VA charakteristiky použitých pasivních prvků

$$\sqrt{U^2 - U_R^2} = U_L - U_C \tag{2.16}$$

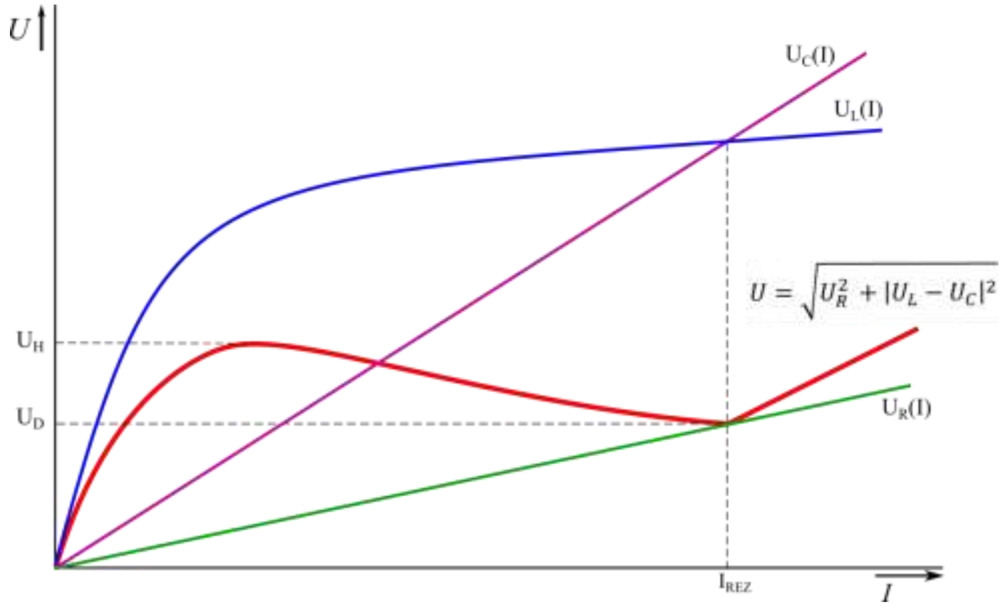
$$U = \sqrt{U_R^2 + |U_L - U_C|^2} = f(I) \tag{2.17}$$

Pokud by měl uvažovaný proud tekoucí tímto obvodem hodnotu těsně za zlomem nelineární charakteristiky cívky, na cívce by se objevilo výrazně vyšší napětí než na kondenzátoru a fázorový diagram by měl následující rozložení:



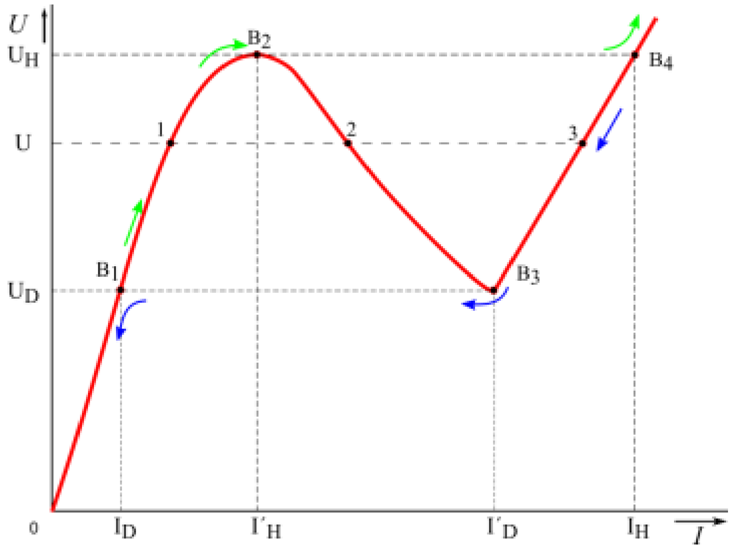
Obr. 2.24 Fázorový diagram sériového RLC obvodu

Výrazně vyšší výpovědní hodnotu má ale graf, který vznikne sloučením všech tří volt-ampérových charakteristik do jednoho souřadného systému neboť místo stavu v případě jedné konkrétní hodnoty proudu, jako tomu je u fázorového diagramu, je možné sledovat stav obvodu v širším rozsahu budícího proudu.



Obr. 2.25 VA charakteristika SFO

Z obrázku je ihned patrné chování sériového ferorezonančního obvodu. Se zvyšující se hodnotou proudu (od nuly) se nejdříve obvod chová výrazně nelineárně díky nelineární magnetizaci jádra cívky. Až přesáhne hodnota proudu „koleno“ na charakteristice cívky, celé chování obvodu se výrazně linearizuje. Kritickým bodem je bod I_{REZ}, kdy se velikosti reaktance cívky i kondenzátoru vyrovnají a vzájemně vyruší – obvod se dostane do stavu rezonance a vykazuje čistě reálnou odporovou složku. V tomto bodě se mění charakter obvodu z induktivního na kapacitní, což s sebou přináší další komplikace. Překreslením předcházejícího obrázku ve zjednodušené podobě pouze pro výsledné napětí názorně demonstruje jevy, ke kterým může docházet.



Obr. 2.26 VA charakteristika SFO

Uvažujeme-li pořád obvod napájený externím síťovým harmonickým zdrojem, kterého napětí alternuje v čase bude, podle výše uvedeného obrázku, docházet k „skákání“ proudu. Pokud se bude napětí zvyšovat od nuly, při překročení hodnoty U_H dojde ke skoku proudu z hodnoty I'_D na I_H (z bodu B_2 do B_4), který bude plynule růst po přímce procházející body B_3 a B_4.

Při snižování napětí z hodnoty vyšší než U_H se situace opakuje, pouze v jiných bodech. Dokud bude napětí v rozmezí U_H a U_D, bude proud plynule klesat z bodu B_4 do bodu B_3, teprve poklesem napětí pod hodnotu U_D dojde ke skokové změně proudu do bodu B_2 a pak plynule až k nule.

Z této studie tedy vyplývá, že v rozmezí napětí U_D a U_H se nachází tři možné pracovní body, ale z nich pouze body *1* a *3* jsou stabilní. Bod *2*, ležící v místě charakteristiky, která vykazuje zápornou derivaci, je považován za nestabilní. Dostane-li se obvod do tohoto bodu, samovolně se rychle vrátí do stavu *1* nebo *3* na základě i malé změny napětí.

Vzhledem k výskytu více možných stabilních pracovních bodů za stejných napěťových podmínek se tyto obvody označují jako sekvenční nebo obvody s pamětí, protože jejich současné chování závisí i na předešlých okolnostech. Konkrétně v tomto případě se při zvyšování napětí od nuly (a maximální hodnota nepřekročí hodnotu U_H) obvod ustálí v pracovním bodě *1*. Podobně, při snižovaní napětí z hodnoty větší jako U_H (a minimální hodnota neklesne pod hodnotu U_D) dojde k ustálení obvodu v pracovním bodě *3*. U těchto systémů je proto potřeba monitorovat předešlé chování v delším rozsahu.

Další možností grafického řešení, je vyjádření napětí na cívce v závislosti na proudu.

$$U_L = \sqrt{U^2 - U_R^2} + U_C = f(I) \tag{2.18}$$

Zavedením jednoduché substituce se tento vztah změní na

$$U_L(I) = e_{li} + p_{ri}, \tag{2.19}$$

kde

$$e_{li} = \sqrt{U^2 - U_R^2} = \sqrt{U^2} - (RI)^2 \tag{2.20}$$

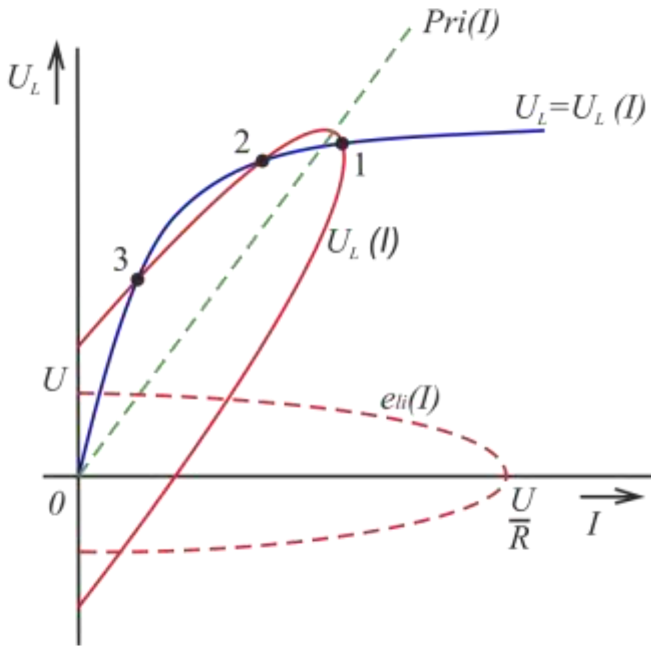
a

$$p_{ri} = U_C(I) = \frac{I}{\omega C} \tag{2.21}$$

Pak pro funkci $e_{li} = e_{li}(\mathrm{I})$ platí vztah

$$\frac{e_{li}^2}{U^2} + \frac{I^2}{\left(\frac{U}{R}\right)^2} = 1 \tag{2.22}$$

Z této rovnice vyplývá, že řešením rovnic (2.18) a (2.19) je elipsa e_{li} s poloosami U a U/R natočená ve směru přímky p_{ri}. Vykreslením funkcí $p_{ri} = p_{ri}(I)$ a $e_{li} = e_{li}(I)$ pro U ležící mezi úrovněmi U_D a U_H vznikne graf funkce $U_L(I) = e_{li} + p_{ri}$, který protíná charakteristiku U_L=$U_L(I)$ ve třech bodech.



Obr. 2.27 Další grafické řešení SFO [28]

I v tomto případě platí, že stabilní jsou pouze body *1* a *3*, protože v bodě *1* platí $U_C > U_L$ a obvod vykazuje kapacitní charakter a v bodě *3* platí $U_L > U_C$, tedy obvod vykazuje induktivní charakter. Tvar grafu výrazně ovlivňuje hodnota odporu zařazeného v obvodu a to tak, že se zvyšující se hodnotou odporu se zkracuje délka hlavní poloosy, čím se průsečíky přesouvají do lineárnější části charakteristiky $U_L(I)$. V takovém případě lze pro daný typ odporové zátěže získat jediné a stabilní řešení a současně se v obvodu vyskytují menší napětí i proudy. Jediné řešení lze rovněž získat, jak bylo zmíněno u předchozího řešení, změnou napětí U pod hodnotu U_D nebo nad hodnotu U_H.

Protože ferorezonance v elektroenergetice nepatří mezi žádoucí jevy, je potřeba hledat řešení a podmínky, za jakých ferorezonance nenastane. Z obr. 2.28 lze vyjádřit dvě podmínky:

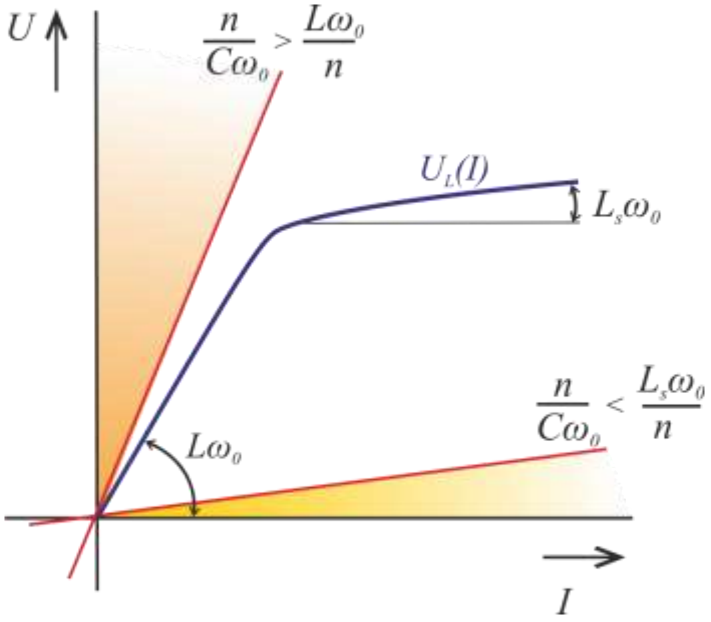
$$\frac{n}{C\omega_0} > \frac{L\omega_0}{n} \quad \text{a} \quad \frac{n}{C\omega_0} < \frac{L_S\omega_0}{n} \tag{2.23}$$

Zde n značí řád harmonické, resp. subharmonické. V případě ferorezonance na základní frekvenci je n rovno *1*. Hodnoty obou indukčností lze zjistit z magnetizační charakteristiky, ale hodnotu L_S lze často získat přímo od výrobce a hodnotu L dopočítat. Pro jednofázový přístrojový nebo výkonový transformátor napětí je možné použít tento vztah:

$$L = \frac{1}{\omega}\frac{U_n}{\sqrt{I_0^2 - \left(\frac{P_0}{U_n}\right)^2}} \tag{2.24}$$

U_n značí jmenovité napětí, I_0 proud naprázdno a P_0 ztráty naprázdno

Pro lepší názornost ještě graf.



Obr. 2.28 Oblasti bezpečných hodnot pro potlačení vzniku ferorezonance [28]

V praxi se při návrhu vedení a zařízení odolných proti vzniku ferorezonance využívají informace o vlastní kapacitě použitých vedení a kabelů, které poskytuje samotný výrobce a které nelze měnit. Dopočítává se tak pouze induktivní složka.

U (kV)	22	110	220	400
kapacita (nF/km)	5	5	5,5	7

Tab. 2.1 Vlastní kapacity venkovních vedení

Průřez (mm²)	35	50	70	95	120	150	185	240	300	400	500
kapacita (µF/km)	0,16	0,18	0,2	0,22	0,24	0,26	0,28	0,3	0,33	0,37	0,4

Tab. 2.2 Vlastní kapacity kabelových vedení pro 22kV

2.4.2 Paralelní ferorezonanční obvod (PFO)

Řešení paralelních ferorezonančních obvodů je totožné s řešením pro sériové ferorezonanční obvody, pouze se vymění obvodové veličiny, jako jsou napětí a proudy.

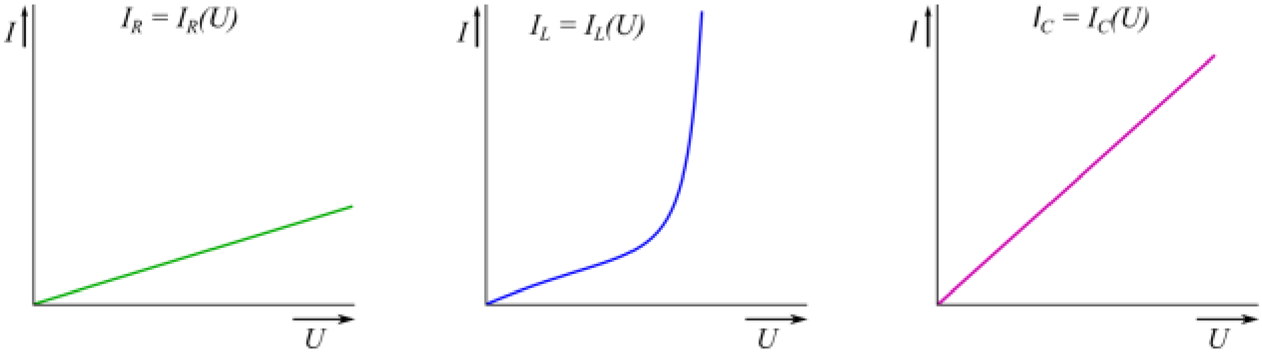
Pro podložení tohoto tvrzení uvažujme paralelní obvod složený ze všech pasivních prvků, tedy kondenzátoru, cívky se železným jádrem i rezistoru.

Pro zjednodušení výpočtů budou znovu využité efektivní hodnoty a vzniklá chyba zanedbána.

$$\sqrt{I^2 - I_R^2} = I_L - I_C \tag{2.25}$$

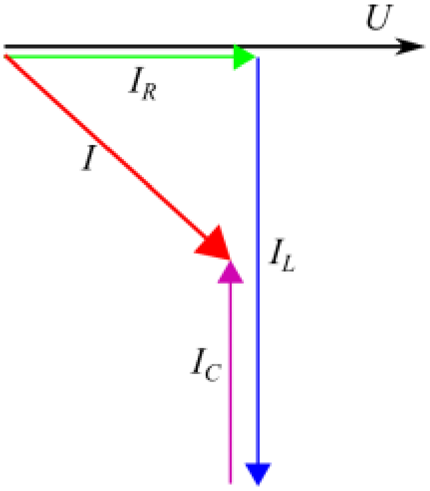
$$I = \sqrt{I_R^2 + |I_L - I_C|^2} = f(U) \tag{2.26}$$

Ampér-voltové charakteristiky jednotlivých prvků:



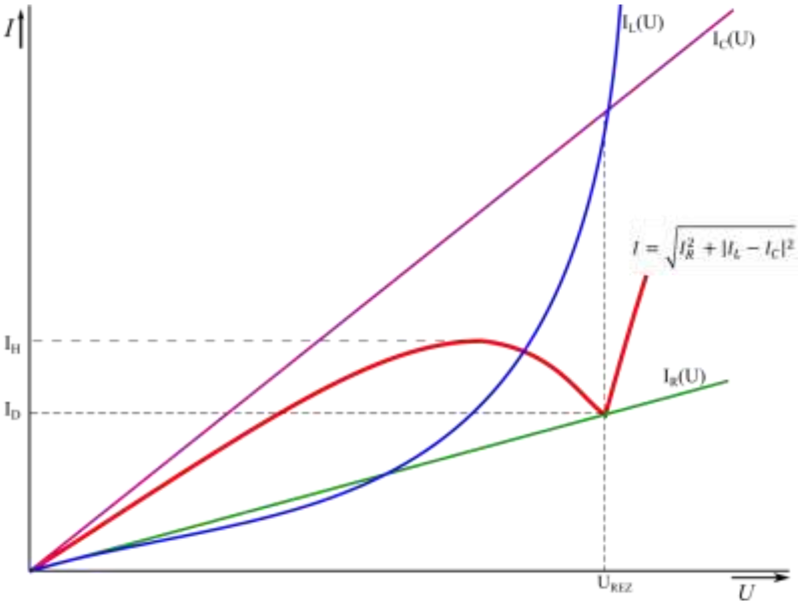
Obr. 2.29 Závislosti proudů na jednotlivých prvcích na napětí

Fázorový diagram:



Obr. 2.30 Fázorový diagram PFO

Opět větší výpovědní hodnotu má graf, ve kterém jsou všechny AV charakteristiky umístěné do společného souřadného systému.



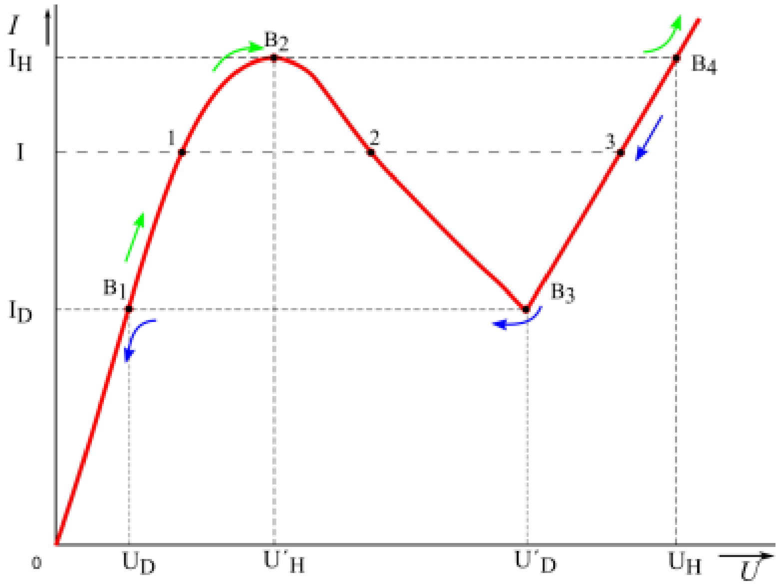
Obr. 2.31 AV Charakteristika PFO [28]

Z obrázku je patrné, že u paralelního ferorezonančího obvodu dochází ke stejným dějům jako u sériového ferorezonančního obvodu, pouze se vymění obvodové veličiny a vlastnosti obvodu. Jestli tedy sériový obvod vykazoval induktivní charakter v intervalu mezi nulou a I_{REZ}, v případě paralelního obvodu se při napětí $0V$ až U_{REZ} obvod chová jako kapacitní zátěž.

K podobným výsledkům jako u sériového ferorezonančního obvodu se lze dopracovat i druhou metodou grafického řešení pro hledané I_L.

$$I_L = \sqrt{I^2 - I_R^2} + I_C = f(U) \tag{2.27}$$

Další úpravou a vyjádřením lze získat staro-nový graf



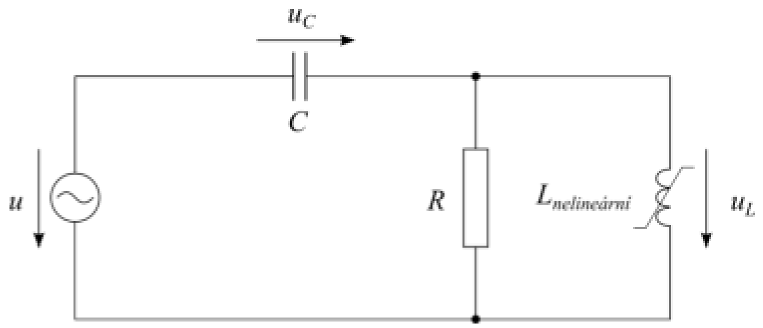
Obr. 2.32 AV charakteristika PFO

Jistě už není překvapením výrazná podoba s grafem získaným při řešení sériového ferorezonančního obvodu ani význam se nijak nemění, proto je zbytečné popisovat probíhající děje ještě jednou.

2.4.3 Analytická metoda

Pro výpočet chování jednodušších úzkopásmových ferorezonančních obvodů, které pracují na základní frekvenci lze použít výpočty přes diferenciální rovnice.

Nyní předpokládejme obvod podle následujícího schématu



Obr. 2.33 Schéma jednoduchého ferorezonančního obvodu

Popis magnetizační charakteristiky představuje polynom

$$i(\Psi) = a_1 \Psi + a_n \Psi^n \quad (2.28)$$

Obvod popisují rovnice

$$\frac{1}{C}\int i_c \, dt + \frac{d\Psi}{dt} = U_m \sin(\omega t + \varphi) \quad (2.29)$$

$$i_c = \frac{1}{R}\frac{d\Psi}{dt} + i(\Psi) \quad (2.30)$$

Úpravou těchto dvou rovnic do jedné rovnice druhého řádu lze dostat

$$\Psi'' + \frac{1}{CR}\Psi + \frac{1}{C} i\,(\Psi) = k\omega U_v \cos(\omega + \varphi) \text{ kde } k = \frac{U_m}{U_v} \quad (2.31)$$

Pak substitucí $\Psi_v = \frac{\omega U_v}{\omega_0}$, $x = \frac{\Psi}{\Psi_v}$

(ψ_v – vztažná hodnota magnetického toku, U_v – vztažná hodnota napětí)

$$\frac{\Psi_v}{\omega U_v}\frac{d^2x}{dt^2} + \frac{\Psi_v}{\omega U_v CR}\frac{dx}{dt} + \frac{1}{\omega U_v C}(a_1 \Psi_v \, . x + a_n \Psi_v^n . x^n) = k \cos(\varphi) cos(\omega t) - k \sin(\varphi) \sin(\omega t) \quad (2.32)$$

A další substitucí

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{a_1}{C}}, \qquad \tau = \omega_0 t, \qquad 2\delta = \frac{a_1 R}{\omega_0}, \qquad a = \frac{a_n}{a_1}\Psi_v^{n-1}, \qquad \alpha = \frac{\omega}{\omega_0}, \quad (2.33)$$

Po dosazení

$$\frac{\Psi_v \omega_0^2}{\omega U_v}\frac{d^2x}{d\tau^2} + \frac{\Psi_v \omega_0}{\omega U_v CR}\frac{dx}{d\tau} + \frac{\omega_0^2 C \Psi_v}{\omega U_v C} x + \frac{\omega_0^2 \Psi_v a_n \Psi_v^{n-1}}{\omega U_v a_1} x^n = k_1 \, . \cos(\alpha\tau) - k_2 \, . \sin(\alpha\tau) \quad (2.34)$$

a úpravě dostaneme

$$\frac{d^2x}{d\tau^2} + \frac{1}{2\delta}\frac{dx}{d\tau} + x + a x^n = \frac{k_1}{\omega_0} . \cos(\alpha\tau) - \frac{k_2}{\omega_0} . \sin(\alpha\tau) \quad (2.35)$$

Další postup řešení pro jednoduchost vynecháme, ale předpokládáme řešení ve tvaru *x=Xcos(ατ)*. Pak derivováním a dosazením do předchozí rovnice získáme rovnice obsahující goniometrické členy *sin* a *cos*. Porovnáním jejich koeficientů a zanedbáním vyšších harmonických složek, se dopracujeme ke dvěma algebraickým rovnicím

$$-\omega_0 \frac{1}{2\delta} \alpha X = k_2, \ \ \omega_0 = (\alpha^2 X + X + F_{n1h} a X^n) = k_1 \quad (2.36)$$

(F_{n1h} – koeficient Fourierova rozvoje funkce $cos^n(\alpha\tau)$ u první harmonické)

Pak dosazením těchto dvou rovnic do následujícího vztahu

$$k^2 = k_1^2 + k_2^2 \quad (2.37)$$

lze dospět k rovnici

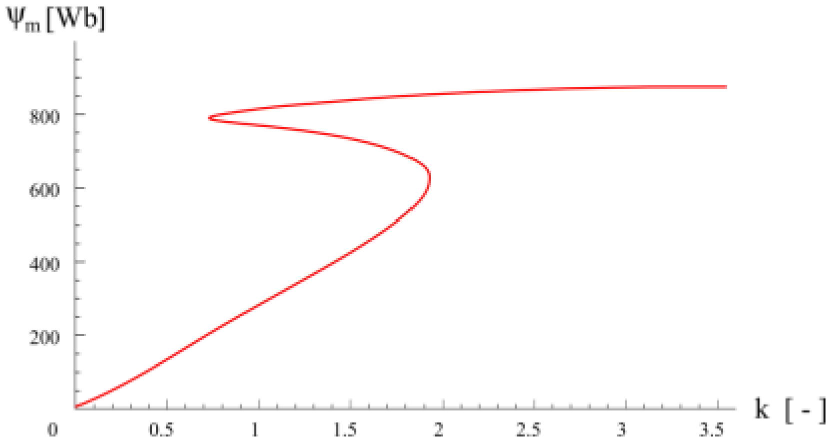
$$\omega_0^2 . \{[(1 - X\alpha^2)\, X + F_{n1h}\alpha X^n]^2 + \left(\frac{1}{2\delta}\,\alpha X\right)^2\} = k^2 \tag{2.38}$$

ve které ještě zpětným dosazením získáme

$$\omega_0^2 . \left\{\left[\left(1 - \frac{\Psi_m}{\Psi_v}\alpha^2\right) X + F_{n1h}\alpha\left(\frac{\Psi_m}{\Psi_v}\right)^n\right]^2 + \left(\frac{1}{2\delta}\,\alpha\,\frac{\Psi_m}{\Psi_v}\right)^2\right\} = k^2 \tag{2.39}$$

(ψ_m – amplituda spřaženého magnetického toku)

Z této rovnice je již možné sestrojit např. závislost $\psi_m=f(k)$, kde k označuje proměnnou amplitudu zdroje napětí [28]. Zde je ještě ukázka takovéto charakteristiky pro výše uvedený obvod.



Obr. 2.34 Závislost amplitudy magnetického toku na proměnné hodnotě amplitudy napětí (koeficienty α_1=1,33.10^{-8}, α_{11}=3,87.10^{-33}, n=11, U_v=90kV, R=8MΩ a C=1,1nF)

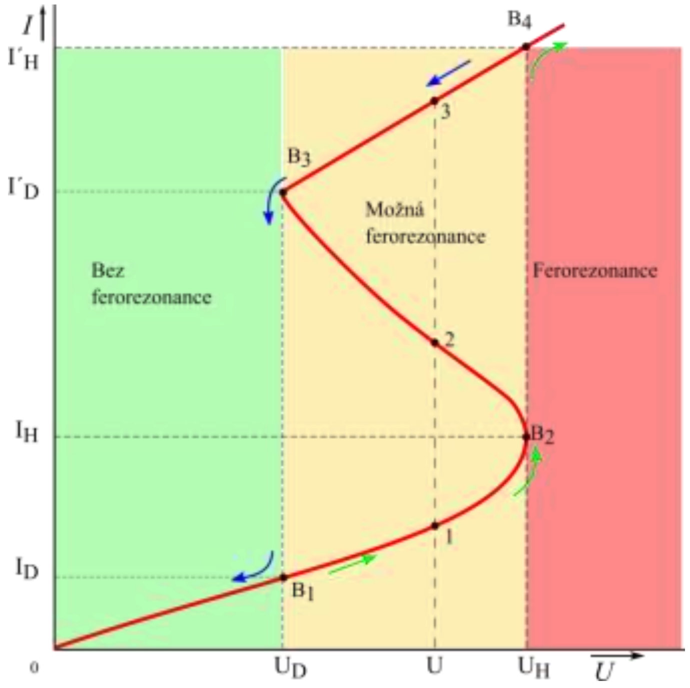
Použití uvedených analytických a graficko-numerických metod je velice omezené zejména možnosti řešení pouze pro jednu nelinearitu a kmitočtovým omezením výstupní veličiny pouze na základní harmonickou složku, což je velice těžko dosažitelné vzhledem k množství nových kmitočtů vznikajících na nelineárním prvku. Pro analýzu složitějších obvodů je nutné použít numerických a simulačních metod, které staví na vysokém výkonu moderních výpočtových systémů.

2.4.4 Teorie katastrof

Katastrofa bodu zvratu (Cusp catastrophe) je součástí tzv. elementárních katastrof vznikajících v dynamických systémech. Nejčastěji se jedná o systémy vyznačující se pomalou změnou řídicích parametrů a rychlou změnou proměnných stavových hodnot, u kterých dochází k přechodu do rovnováhy téměř okamžitě. V případě, že odchylka rovnovážných stavů vykazuje ohyb, např. typu cusp (bod zvratu), má změna parametrů za následek tzv. jev hysterese a náhlého skoku.

Na druhou stranu, pozorujeme-li náhlé skoky a bistabilitu hysteresního jevu v dynamickém systému, můžeme s největší pravděpodobností předpokládat, že budeme moci toto chování vysvětlit modelem, v němž dochází ke katastrofě. Fold, cusp, swallowtail a butterfly katastrofy řadíme mezi základní elementární katastrofy, v jednorozměrném prostoru s jedním až čtyřmi bifurkačními parametry.

Teorií katastrof lze využít pro analýzu ferorezonančního jevu. Grafické řešení sériového ferorezonančního obvodu, jsme uvedli v kapitole 2.4.1 na obr. 2.24. Pokud bychom zaměnili osy uvedené závislosti, dostali bychom místo voltampérové charakteristiky charakteristiku ampérvoltovou. Toto znázornění můžeme také nazvat evolučním diagramem, který znázorňuje vývoj (tzv. evoluci) při změně parametru, v tomto případě napětí.



Obr. 2.35 Ampérvoltová charakteristika sériového ferorezonančního obvodu

Z grafického řešení tohoto obvodu je možné určit projev napětí zdroje v daných oblastech pracovního bodu. V oblasti mezi U_D a U_H existuji tři hodnoty proudu a v oblastech $U<U_D$ a $U>U_H$ existuje jen jedno řešení. Hodnoty napětí U_D a U_H nám charakteristiku rozdělují na tři oblasti a to oblast $U<U_D$ co je oblast, kde se ferorezonance nemůže objevit, oblast $U>U_H$, kde nutně vznikne ferorezonanční jev a oblast mezi U_D a U_H, kde ferorezonance může nastat. Jestli nastane či nikoli, závisí na počátečních podmínkách a předchozím stavu obvodu.

Pokud se nacházíme v oblasti mezi U_D a U_H, je z grafického řešení patrné, že při změně napětí dojde ke skokové změně proudu. Skoková změna proudu způsobená malou změnou napětí je jev, který se v teorii katastrof nazývá katastrofou.

Teorie katastrof umožňuje lépe objasnit a pochopit problematiku ferorezonance a nabízí konkrétnější a přehlednější pohled. Více o teoriích katastrof a jejich použití, pro analýzu ferorezonančních jevů, lze najít v literatuře [28].

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 konfiguraci (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 jejích 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 možnosti 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

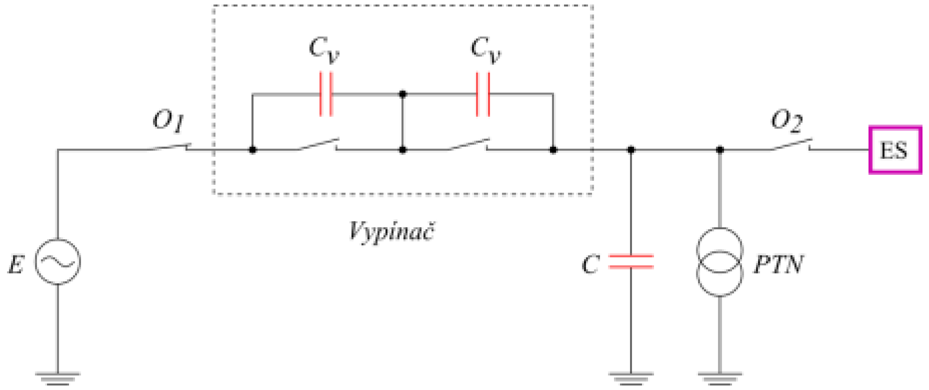
Tato kapitola hledá řešení a odpovědi na problémy a cíle definované v předchozí kapitole. V první části se věnuje různým situacím a konfiguracím energetických systémů mající sklon k vzniku ferorezonance. Dále se věnuje různým softwarovým nástrojům, které lze využít pro řešení ferorezonančních jevů. Různé softwarové nástroje srovnává a vyhodnocuje dle různých kritérií a hledá odpověď na otázku, který simulační nástroj je pro řešení uvedených transientních 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 Konfigurace energetických systémů mající sklon k vzniku ferorezonance

V reálném elektroenergetickém systému, nalézáme téměř nekonečný počet možných konfigurací zapojení, kdy může dojít ke vzniku ferorezonance. Příčinou vzniku mohou být např. různé zdroje nelineárních indukčností, kapacit a dále široký rozsah provozních podmínek. Vzhledem k množství variant zapojení, se budeme v této kapitole zabývat pouze nejpravděpodobnějšími konfiguracemi. Další podobné analýzy lze nalézt [17], [11], [28], [50], [10] .

4.1.1 Přístrojový transformátor napětí v blízkosti jednoho nebo více rozepnutých vypínačů

Na obr. 4.1 je schematicky znázorněna konfigurace zapojení, kterou nalézáme u systémů velmi vysokého a zvlášť vysokého napětí (dále jen VNN a ZVN). Přístrojový transformátor napětí (dále jen PTN), připojený mezi fázi a zem, může být uveden do ferorezonančního stavu po určitých spínacích operacích, jako je např. porucha v sekci přípojnic, vypnutí spínače přípojnic atd.



Obr. 4.1 Konfigurace zapojení složená z PTN zapojeného v sérii s rozepnutým vypínačem

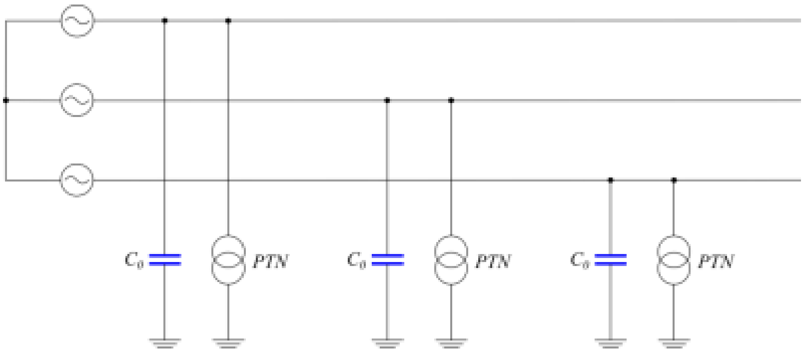
Při rozepnutí vypínače dochází k zakolísání elektromagnetického pole. Proto se u některých vypínačů používají kondenzátory za účelem dosažení rovnoměrnějšího pole na komorách vypínače. Při rozepnutí O_2, pak dochází k vybíjení kapacit C_V dílčích kondenzátorů přes PTN, u kterého může nastat stav saturace. V tomto případě pak zdroj dodává, k udržení těchto oscilací přes kapa-

city C_V, dostatek energie. Součet všech kapacit (kapacita PTN, přípojnic, ostatních připojených zařízení, atd.) mimo všech C_V, odpovídá kapacitě C (viz obr. 4.1). [30].

Větší pravděpodobnost vzniku ferorezonančních jevů, týkající se tohoto způsobu zapojení, nastává v případech - jeli PTN připojen k síti s malou kapacitou, připojenou mezi fázi a zem (malá délka kabelového nebo venkovního vedení, malá kapacita přípojnic); a dále za použití vypínačů na bázi SF_6, jež mají vyšší hodnoty přípojnicových kapacit (až 7500 pF), viz [24].

4.1.2 Přístrojový transformátor napětí připojený k izolovanému systému

Konfigurace zapojení na obr. 4.2 může vzniknout v případě poruchy zemnícího obvodu uzlu nebo jako důsledek vazby nouzového zdroje s izolovaným uzlem. Přechodná přepětí a nadproudy, mohou přivést železné jádro, jednoho nebo dvou PTN, do stavu saturace, který je podnětem pro vznik ferorezonance. Přepětí vznikají v důsledku spínacích operací v elektroenergetickém systému (odpojení zátěže, nesoučasné zapnutí/vypnutí PTN – při spojení jednopólovým odpojovačem nebo při přerušení jedné z pojistek předřazených skupině transformátorů, odstranění poruch, za použití méně než tří transformátorů jednopólově izolovaných, nesymetricky zatížená síť, atd.) nebo příčinnou zemních spojení či značně kolísající nesouměrné zátěže soustavy (např. obloukové pece). Ferorezonance se může následně projevovat změnou fázového napětí i změnou napětí izolovaného uzlu vůči zemi. Dochází zde k situaci podobné jako u zemního spojení, při kterém je posunut fázor napětí, čímž se zvýší napětí vůči zemi.



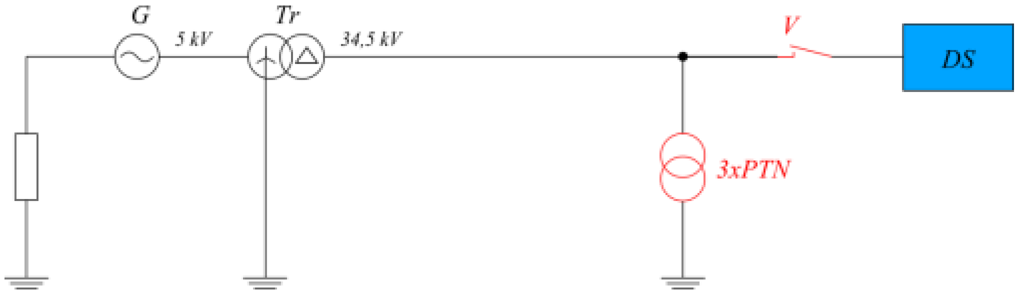
Obr. 4.2 Konfigurace zapojení PTN v systému s izolovaným uzlem

Zemní spojení se indikuje za použití tří jednopólových transformátorů (Y,Y) s pomocným vinutím zapojeným do otevřeného trojúhelníka, v jehož obvodě je zapojeno návěstní zemní relé. Napětí na zemním relé vzroste až na 100 V nebo 110 V, při kovovém zemním spojení. Při ferorezonanci zpravidla dosahuje menších hodnot, ale přesto to může vést k nežádoucí indikaci zemního spojení.

Případně může dojít k dosažení vyšší hodnoty přepětí, než sdruženého napětí za ustáleného stavu a způsobit tak průraz izolace elektrického zařízení. Jednotlivé druhy ferorezonančních oscilací vznikají v závislosti na hodnotách magnetizační indukčnosti napěťového transformátoru a kapacity netočivé složky systému.

Zjednodušené schéma zapojení této konfigurace je zobrazeno na obr. 4.3, jejímž problémovým prvkem je PTN. Jeho primární vinutí je uzemněné a připojené na systém 34,5 kV (za určitých okolností může být izolovaný). Generátor (G) (kogenerační jednotky) napájí levou stranu obvodu přes transformátor (Tr) (YnD), který poskytuje pro daný systém 34,5 kV neuzemněný systém a izoluje je od jakéhokoliv typu uzemnění na straně generátoru. Distribuční síť (dále DS)

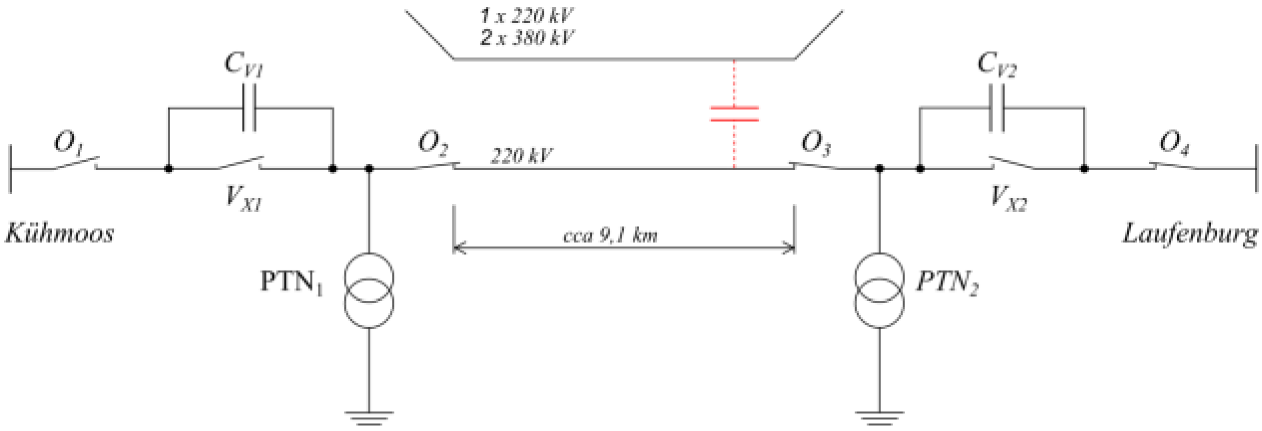
napájí pravou stranu obvodu. Ačkoli je DS uzemněna, může se stát izolovanou díky možným, ale nepředvídaným spínacím operacím. Vypínač (V) může odpojit uzemněný zdroj od DS. Pracuje-li tato jednotka i při rozepnutém vypínači, pak bude systém 34,5 kV izolovaný celý a dostaneme tak případ popsaný na obr. 4.3.



Obr. 4.3 Konfigurace zapojení potencionálně izolovaného systému s napěťovými transformátory

4.1.3 Přístrojový transformátor napětí napájený přes kapacitní vazbu se sousedním vedením

Na obr. 4.4 je zobrazena konfigurace zapojení v elektroenergetickém systému, kde může vzniknout ferorezonanční obvod. Jeho kapacita je zejména tvořena kapacitní vazbou s rovnoběžným vedením. Např. Kočiš a Švancara [36] popisují případ destrukce PTN ve stanici Kühmoos v SRN, kde byla provedena napěťová zkouška (po výměně napěťových transformátorů) v nejblíže vzdálené stanici 9,1 km. Ferorezonance nastala ve chvíli po ukončení napěťové zkoušky, kdy zemnící nože nebyly zapnuté, a to vlivem indukce ze sousedících vedení 380 kV a 220 kV, které byly umístěny na stejných stožárech jako vypnuté vedení 220 kV.



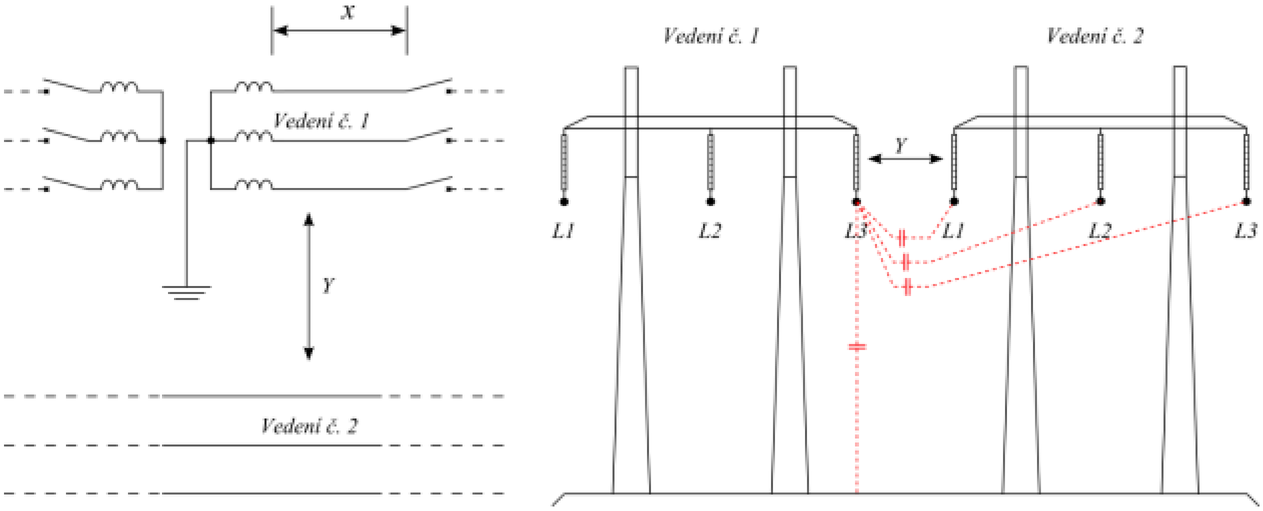
Obr. 4.4 Konfigurace zapojení PTN s kapacitní vazbou mezi sousedními vedeními na stejném stožáru

PTN explodoval 13 minut po opětovném připojení napětí k vedení. Frekvence ferorezonance byla rovna třetí subharmonické (16,6 Hz). Ke vzniku ferorezonance došlo v obvodu tvořeném kapacitou vodičů a indukčností transformátorů.

Obdobný případ výše uvedeného, popisuje např. Jacobson a Menzies [25].

4.1.4 Trojfázový transformátor napájený přes kapacitní vazbu se souběžným vedením

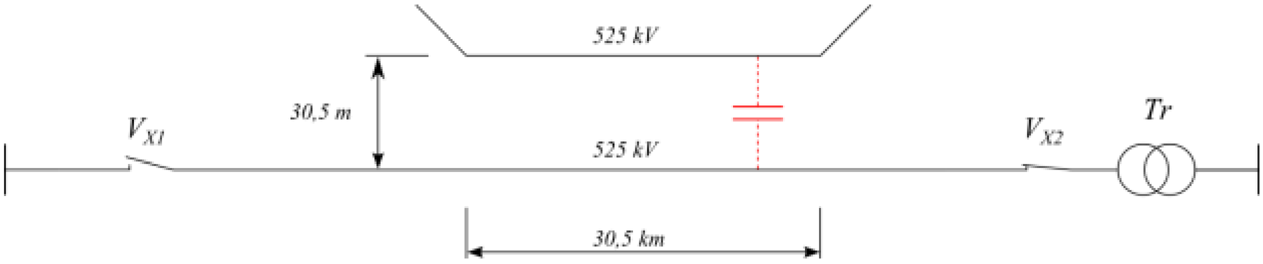
Ferorezonance se také několikrát vyskytla u principiálně stejného případu popsaného v předchozí kapitole 4.1.3, kdy vedení nejsou umístěné na stejném stožáru, ale souběžně probíhají po určité délce dostatečně blízko vedle sebe. V prvním případě se mohou objevit tlumené ferorezonanční jevy, kdy je jedno vedení vypnuto. Tyto ferorezonance vznikají mezi transformátorem a venkovním vedením, ale obvykle nezpůsobují vážnější provozní potíže. V druhém případě může dojít ke vzniku ferorezonančních podmínek a jejich udržení ve chvíli, kdy je sousední vedení v provozu a právě dojde k odpojení paralelního vedení, skrze naznačenou kapacitní vazbu zobrazenou na obr. 4.5.



Obr. 4.5 Konfigurace zapojení transformátoru přes kapacitní vazbu souběžného vedení

Tento případ popisují např. Dolan, Gillies a Kimbark [13]. Trojfázový transformátor 100 MVA 525/241,5 kV napájený přes kapacitní vazbu souběžně vedeného vedení 525 kV (v délce 30,5 km ve vzdálenosti 30,5 m od sebe), byl z důvodu údržby odpojen.

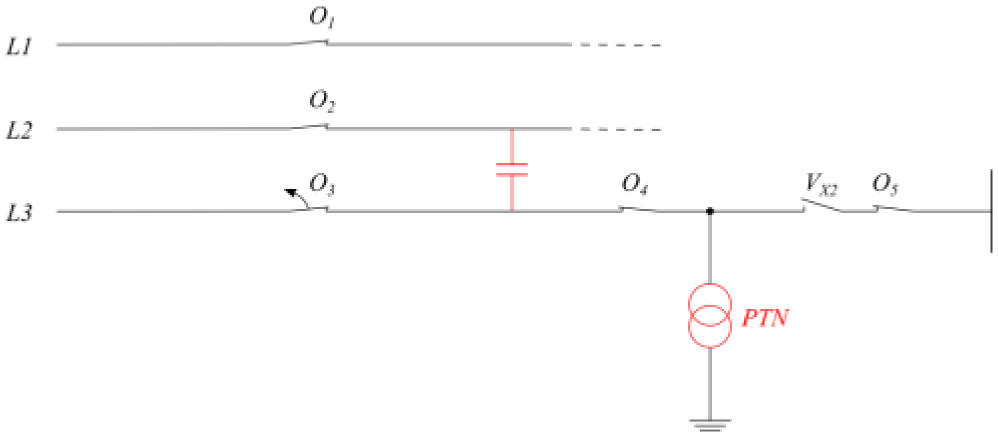
V tomto případě se jedná o trojfázový výkonový transformátor.



Obr. 4.6 Schématické zobrazení konfigurace zapojení transformátoru přes kapacitní vazbu souběžného vedení

4.1.5 Přístrojový transformátor napětí napájený přes kapacitní vazbu s ostatními fázemi

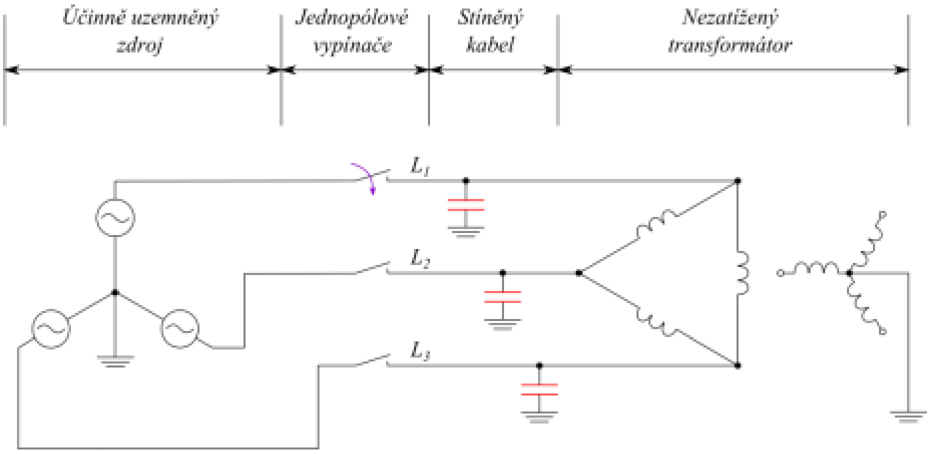
Na obr. 4.7 je zobrazena další konfigurace zapojení, kde může vzniknout ferorezonance. Tento případ byl prvně publikován v roce 1997 společností Ontario Hydro Toronto Kanada [35], která odhalila výskyt ferorezonančního jevu v místě několika kilometrů od stanice, a to ve chvíli postupného rozpojování vodičů nezatíženého 100 kV vedení pod napětím. Svým způsobem je tento případ velmi podobný konfiguraci zapojení v kapitole 4.1.3, kdy je ferorezonanční obvod tvořen vzájemnou kapacitou vodičů vedení a indukčností transformátoru. Ferorezonance nastala po rozpojení prvního vodiče v příslušném PTN vlivem kapacitní vazby zbylých neodpojených fází a trvala po dobu několika minut. Ovšem po opětovném zapnutí PTN nastala jeho exploze s totálně destruktivními účinky. V tomto případě byla frekvence ferorezonance rovna třetí subharmonické (20 Hz).



Obr. 4.7 Konfigurace zapojení PTN s kapacitní vazbou mezi sousedními fázemi při postupném rozpojování vodičů

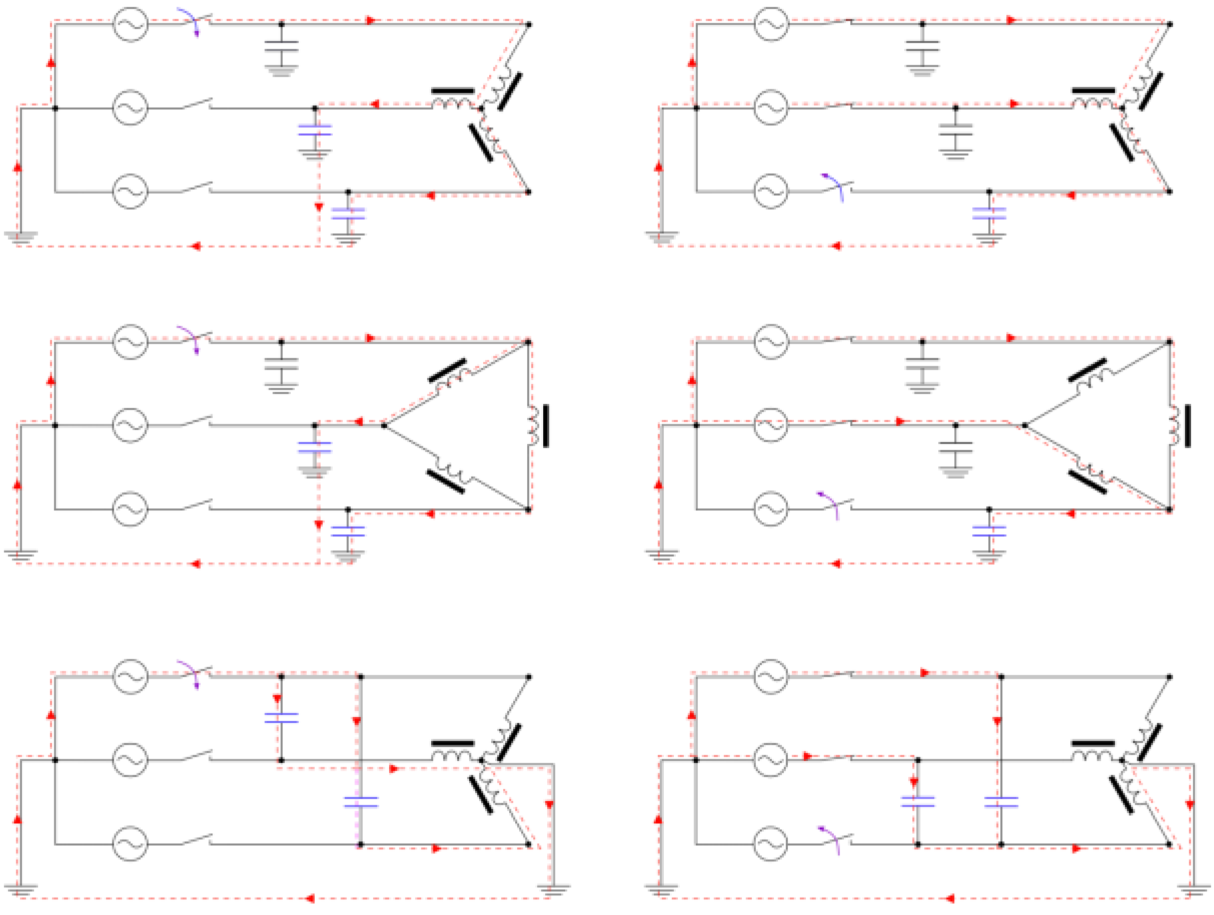
4.1.6 Trojfázový transformátor napájený z jedné či ze dvou fází

Například na obr. 4.8 je zobrazena jedna z takovýchto potencionálně nebezpečných konfigurací, která může nastat v případech, dojde-li k nesoučasnému spínání pólů vypínače, který připojuje ke zdroji napětí vedení s nezatíženým transformátorem.



Obr. 4.8 Trojfázový transformátor při sepnutí jedné fáze

Při sepnutí pólu vypínače ve fázi L_1 dojde k nabíjení dvou fází transformátoru L_2 a L_3 přes jejich vzájemné kapacity kabelu. Ve chvíli, kdy dojde k sepnutí, jeví se tyto kapacity jako zkrat a zároveň mezi fázemi L_1-L_2 a L_1-L_3 prochází vinutími transformátoru nabíjecí či budicí proud. Během první periody napájecího napětí se železné jádro transformátoru může nasytit díky sepnutí v nulové hodnotě napětí a zároveň (nebo jen) díky zbytkovému magnetickému toku v jádře transformátoru. Následkem saturace je velký proudový puls, který prochází přes vinutí transformátoru kapacity fází L_2 a L_3. Následně u pracovního bodu dojde k opuštění nasycené oblasti jádra transformátoru. Na kapacitách kabelu však zůstane zbytkový náboj (napětí). V následujících cyklech se transformátor může nasytit v opačném směru, kdy pohyb pracovního bodu probíhá po hysterezní křivce jádra transformátoru. Tímto dojde ke změně polarity zbytkového náboje kapacit. V případě, že pracovní bod pokračuje v přechodech z nasycené do nenasycené oblasti, přičemž nezávisí, zdali cyklicky nebo náhodně, mezi fází a zemí a mezi fázemi, objeví se vzájemně vysoká napětí. Při delším trvání těchto napětí může dojít k přesycení transformátoru, poruše svodiče přepětí a dokonce i poruše izolace transformátoru nebo systému. Dojde-li k sepnutí další fáze, mohou vzniklá přepětí přetrvat nebo může dojít i k jejich zesílení. Dojde-li k sepnutí poslední fáze, obnoví se rovnovážné podmínky v systému a ferorezonance ustane.



Obr. 4.9 Příklady kritických soustav u trojfázového transformátoru z pohledu ferorezonance

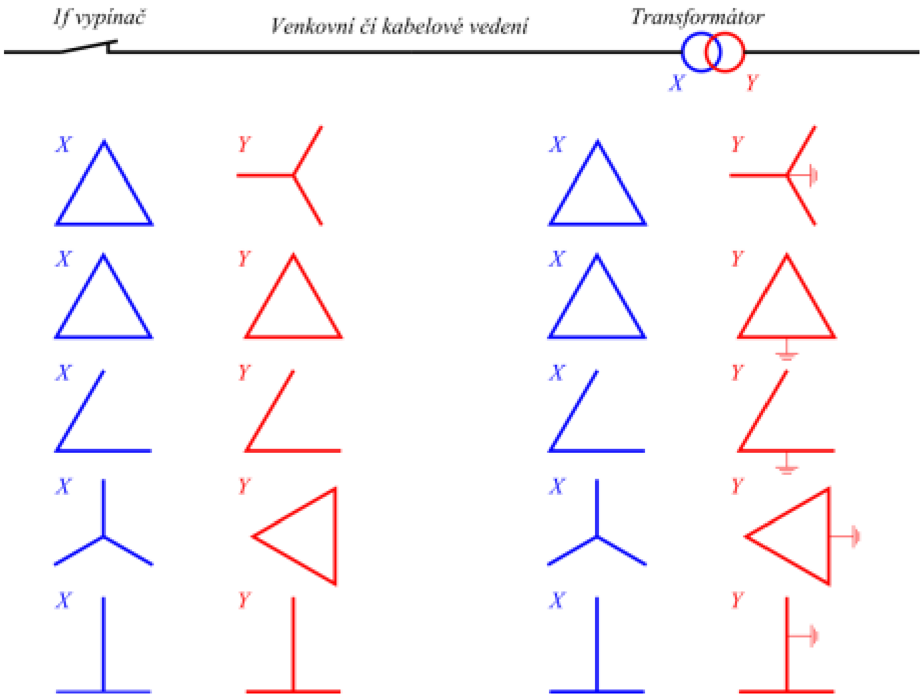
Výše popsané jevy mohou také nastat v případech přerušení jedné či dvou přívodních fází, a to díky přerušení pojistky v jedné fázi, přerušení vodiče způsobené jeho poruchou, provádění jednofázového opětovného zapínání [1] nebo jen nevhodnou manipulací. Kapacita může předsta-

vovat kapacitu venkovního vedení, nebo kabelů uložených v zemi napájejících transformátor. Primární vinutí transformátoru může být zapojeno do Y, Yn, nebo D. Zapojení Yn je méně náchylné ke vzniku ferorezonance než zapojení s izolovaným uzlem.

Na obr. 4.9 je znázorněn směr toku poruchového proudu, a to v nejčastěji se vyskytujících případech spojení transformátoru, kdy dochází k přerušení či spínání jedné fáze [87].

V případě sepnutí nebo rozepnutí představuje odepnutá část sériový rezonanční obvod, který tvoří kapacita vedení a transformátor se svou nelineární indukčností. Průběh přechodného jevu pak může záviset na faktorech jako např. zapojení primárního a sekundárního vinutí, provedení magnetického jádra transformátoru (3x1f, 1x3f), uzemnění napěťového zdroje, zatížení sekundárního vinutí, délka vedení (velikost kapacity jak vlastní tak vzájemné), výkonu transformátoru., aj. Průběh přechodného děje může být stabilní s kmitáním při základní harmonické, případně subharmonické, vyšších harmonických, nebo nepravidelný až chaotický.

Na obr. 4.10 jsou znázorněny možné zapojení transformátoru, které jsou náchylné na vznik ferorezonance.



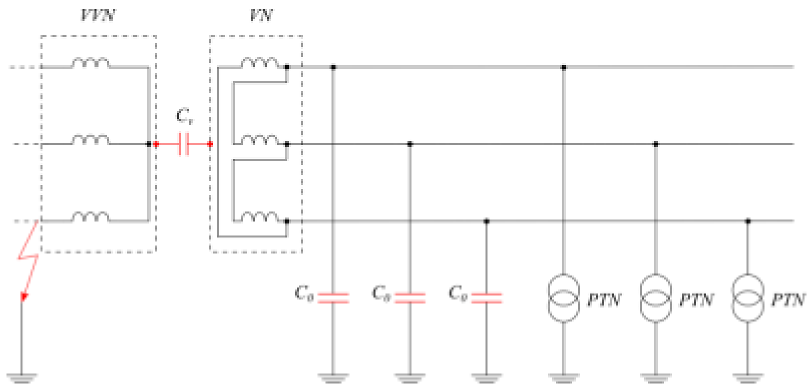
Obr. 4.10 Zapojení vinutí transformátoru mající sklon k ferorezonanci

Zdali se při zapojeních transformátoru a jednopólovém spínaní objeví ferorezonance, záleží na parametrech příslušného elektroenergetického systému spolu s vlastnostmi transformátoru, jak je znázorněno na obr. 4.10. Hodnoty vlastních a vzájemných kapacit obvodu včetně parazitní kapacity transformátoru mají velký význam. Nacházejí-li se hodnoty těchto kapacit v určitém rozsahu, mohou se objevit dlouhotrvající ferorezonanční jevy pro určitá zapojení. Úroveň primárního napětí, velikost výkonu a charakteristiky transformátoru a do určité míry i jeho konstrukce, pak určují spodní a horní hranici rozsahu hodnot kapacit. Se snižujícím se jmenovitým výkonem transformátoru se snižuje spodní hranice rozsahu kapacit, a to pro danou hodnotu primárního napětí. V případě transformátoru s neměnným jmenovitým výkonem spodní hranice klesá, zvyšuje-li se úroveň napětí. Díky tomu je u transformátorů o nižším jmenovitém výkonu s větší hodnotou primárního napětí větší riziko vzniku ferorezonance.

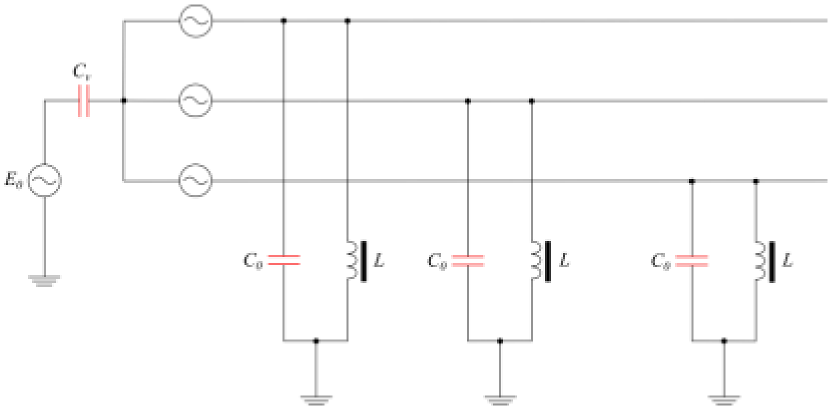
4.1.7 Přístrojové transformátory napětí a výkonové transformátory VVN/VN s izolovaným uzlem

Na obr. 4.11a je zobrazena další konfigurace zapojení, kdy může dojít ke vzniku ferorezonance. Uzel VN i VVN vinutí je provozován jako izolovaný a nezatížené PTN jsou připojeny na VN stranu mezi fáze a zem.

V případě, že dojde k zemnímu spojení na VVN straně transformátoru, bude mít uzel vinutí na této straně transformátoru vysoký potenciál vůči zemi. Vzhledem k tomu, že mezi primárním a sekundárním vinutím je kapacitní vazba, vznikne na VN straně transformátoru přepětí, které může vyvolat ferorezonanci v obvodu tvořeném z napěťového zdroje E_0 (napětí netočivé složky na VVN straně), kapacit C_v (kapacita mezi VVN a VN vinutím) a C_0 (kapacita netočivé složky na VN straně) a magnetizační indukčnosti L napěťových transformátorů PTN, viz obr. 4.11b.



a) Schéma systému se zemním spojením



b) Náhradní schéma

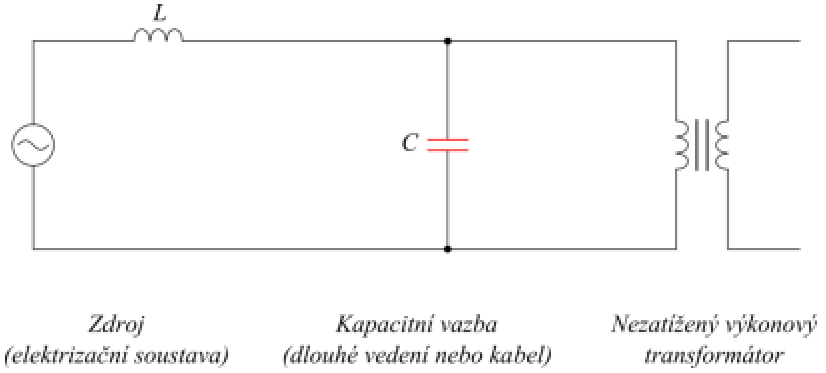
Obr. 4.11 Ferorezonanční obvod tvořený PTN zapojenými mezi fáze a zem a transformátorem s izolovaným uzlem

Napětí uzlu na VVN straně transformátoru vůči zemi může přetrvat i po odstranění poruchy na této VVN straně transformátoru, a to díky přirozené nerovnováze systému, která je dostatečná k udržení ferorezonance.

V literatuře [27] jsou popsány typické konfigurace, u nichž byl zjištěn vznik ferorezonance. Jsou to např. obvody vlastní spotřeby elektráren, elektroenergetické sítě v průmyslových závodech, nebo dočasně izolované veřejné distribuční sítě.

4.1.8 Výkonový transformátor napájený přes elektroenergetický systém s velkou kapacitou a s nízkým zkratovým výkonem

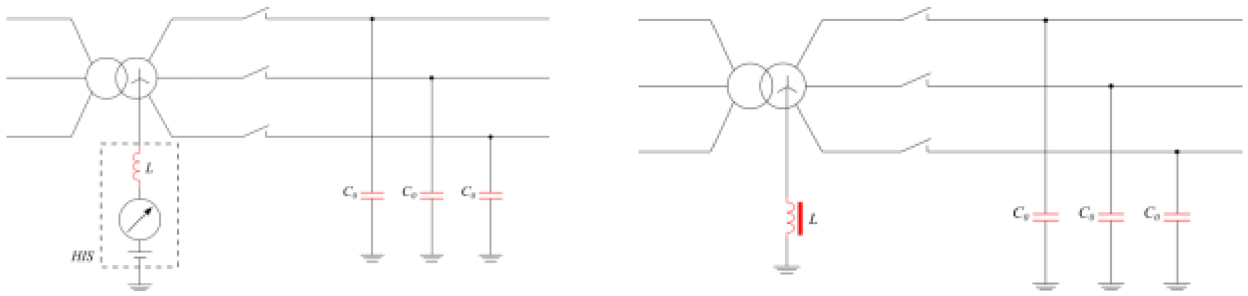
Na obr. 4.12 je zobrazena konfigurace zapojení nezatíženého transformátoru. V případě náhlého připojení transformátoru ke zdroji, s nízkým počátečním rázovým zkratovým výkonem elektrizační soustavy (ve srovnání se jmenovitým výkonem transformátoru), dlouhé vedení nebo kabelové vedení, dochází ke vzniku ferorezonance. Tento stav nastává např. při obnovení provozu ve VN městských kabelových a průmyslových elektroenergetických sítích a rovněž ve velmi rozsáhlých distribučních VN elektroenergetických sítích nebo v případech se zvýšenou mírou používání kabelových vedení, za účelem spolehlivosti, či s ohledem na estetickou stránku. Tento ferorezonanční obvod je tvořen magnetizační indukčností transformátoru a paralelním spojením kapacity, přičemž ferorezonance se zde projevuje ve všech třech fázích.



Obr. 4.12 Zjednodušené náhradní schéma nezatíženého výkonového transformátoru napájeného přes systém s velkou kapacitou

4.1.9 Elektroenergetický systém uzemněný přes reaktor

Na obr. 4.13 jsou zobrazeny dvě konfigurace zapojení náchylných na vznik ferorezonančních jevů, a to mezi indukčností připojenou mezi uzel a zem a vlastní kapacitu sítě.



Obr. 4.13 Ferorezonanční obvod v případě uzemnění uzlu transformátoru přes vnitřní indukčnost hlídače izolačního stavu nebo reaktor

U nízkonapěťových (dále jen NN) systémů s izolovaným uzlem je doporučena implementace monitorování stálé izolace pomocí hlídače izolačního stavu (HIS) dle normy IEC 364. Některé z těchto hlídačů jsou schopny měřit impedanci izolace elektroenergetického systému za pomoci injektáže stejnosměrného proudu mezi systémem a zemí. V převážné většině je jejich impedance induktivního charakteru, jinými slovy impedance pro stejnosměrný proud je nízká a pro frekvenci systému vysoká. Tento fakt může být jedním z hlavních podnětů pro vznik ferorezonance. Díky

zde vzniklému přepětí, může docházet k nárůstu potenciálu uzlu transformátoru. Tento potenciál je dále iniciátorem ferorezonančního jevu mezi indukčností hlídače izolačního stavu a vlastními kapacitami systému C_0. Schématické zobrazení takové konfigurace zapojení je na obr. 4.13 zobrazeno vlevo.

Na obr. 4.13 vpravo je zobrazena konfigurace zapojení za použití tzv. Petersenovy cívky, což je induktor L vložený mezi uzel vinutí VN (v případě transformátoru VVN/VN) a zem. Takováto konfigurace zapojení se používá u VN sítí za účelem omezení proudu při zemním spojení a schopnosti minimalizovat tuto poruchu. Pak bude velikost indukčnosti odpovídat vztahu

$$L = \frac{1}{3C_0\omega_0^2}, \tag{4.1}$$

kde

C_0 je kapacita netočivé složky náhradního složkového schématu kapacit VN strany

ω_0 je úhlová rychlost systému

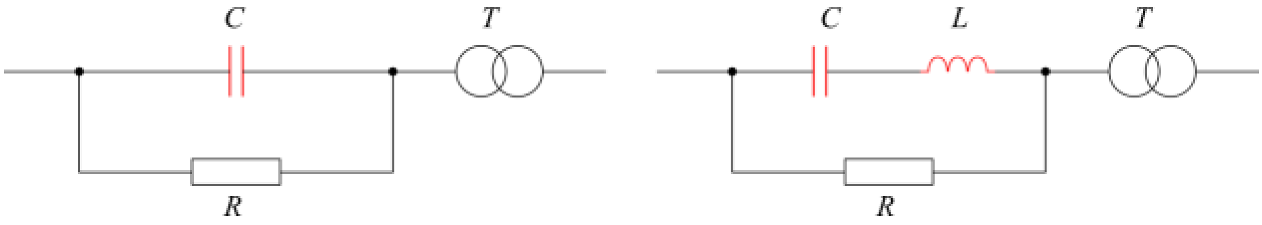
Vznik ferorezonance v této konfiguraci se může objevit v následujících případech:

- nasycení železného jádra transformátoru
- uzel na VVN straně transformátoru je uzemněn a poruchový proud na VN straně se uzavírá přes uzemňovací soustavu rozvodny
- přirozená asymetrie vlastních kapacit jednotlivých fází
- asymetrická konstrukce transformátoru

Následkem těchto stavů může být saturace železného jádra transformátoru vedoucí ke vzniku nebo udržení ferorezonance.

4.1.10 Kompenzační sekce v obvodu s tlumivkou se železným jádrem

U kompenzačních zařízení dochází také ke vzniku ferorezonančních jevů, a to jak u sériových, tak i paralelních kompenzačních sekcí, které většinou obsahují jeden nebo více kondenzátorů. Ty mohou vyvolat, po připojení do elektroenergetické sítě, rezonanční oscilace s transformátory. Na obr. 4.14 jsou zobrazeny příklady chráněných a nechráněných kompenzačních sekcí.



Obr. 4.14 Nechráněná a chráněná kompenzační sekce

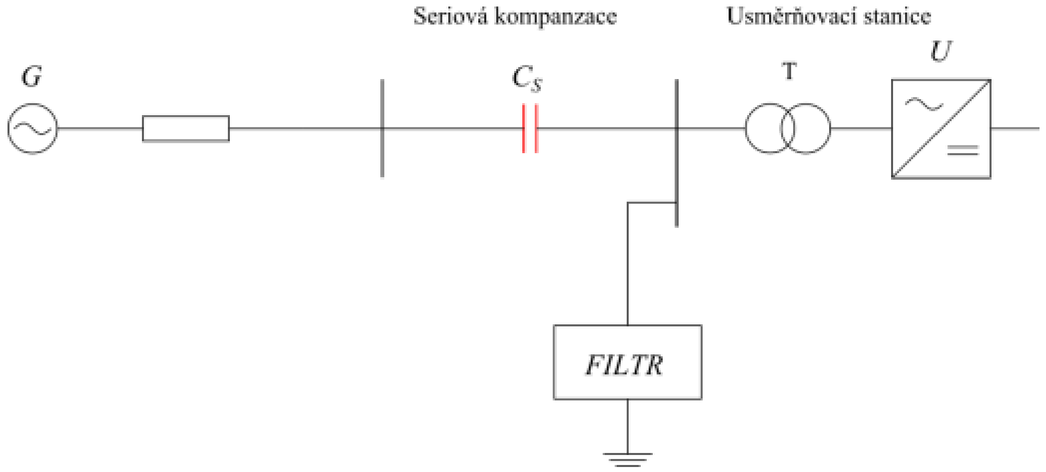
Díky tomu, že provozní kmitočet je většinou vyšší než běžný kmitočet systému, do kterého je zapojen kompenzační kondenzátor do série, může vzniknout za určitých podmínek možnost vzniku rezonance se jmenovitým kmitočtem 50 Hz. V běžném provozu je méně pravděpodobné vznik takovéhoto jevu, jelikož závisí na mnoha okolnostech. Proto je nutné se zabývat každým případem, kdy nastane tento jev, zvlášť. Národní technická norma ČSN EN 60 143 [N9] uvádí: *„Vlivem účinků sycení může zapínací proud vyvolat netlumené rezonanční rozkmitání subharmo-*

nické frekvence. V případě, že se připojí nezatížený transformátor nebo reaktor na systém sériové kompenzace při malém zatížení, především po odlehčení, může dojít k ferorezonanci.“

V určitých případech se používají vedle kondenzátorů i reaktory sloužící ke kompenzaci velkého kapacitního zatížení soustavy. Zde pak můžeme hovořit o kompenzačních sekcích, ovšem v opačném smyslu uvedeného předchozího příkladu. Tato opatření nalézáme např. u kapacitních PTN, kdy kompenzační tlumivka (reaktor) L_R, kompenzuje kapacitní dělič, viz obr. 4.16.

Ve světě také nacházíme použití sériové kompenzace vedení. Jak již bylo výše zmíněno může i zde dojít ke vzniku ferorezonančních jevů díky působení sériové kapacity a indukčnosti transformátoru [57].

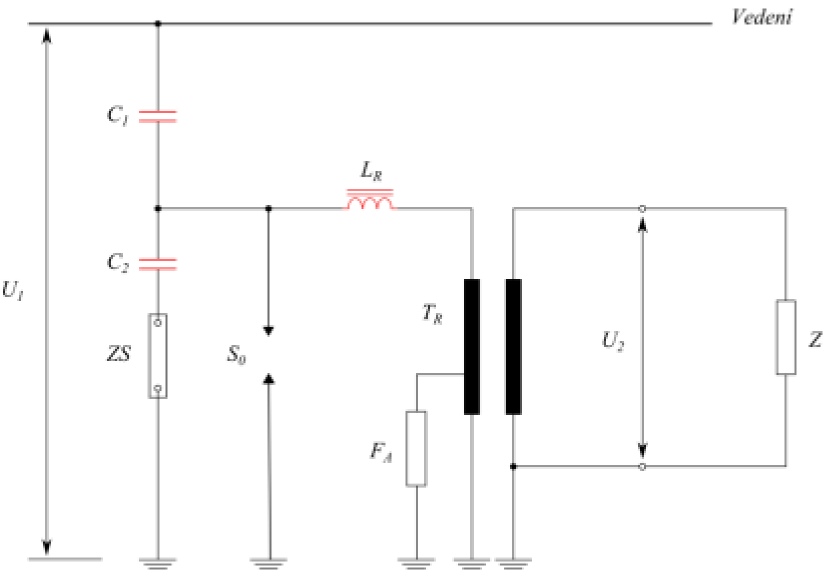
Dalším a typickým případem je sériová kompenzace usměrňovací stanice, která spadá do oblasti kompenzačních sekcí. V případě stejnosměrného vedení vloženého do střídavého systému o nízkých až velmi nízkých zkratových výkonech je nutné dodat jalový výkon, viz [84], který se získává prostřednictvím filtrů, synchronních kompenzátorů, statických kondenzátorových baterií nebo je brán ze střídavého systému. Z ekonomického hlediska se zdá lákavé, použít sériové kompenzace umístěné mezi střídavý systém a stejnosměrnou linku. Tento koncept je na jednu stranu výhodný z hlediska schopnosti regulovat dodávky jalového výkonu. Nevýhodou je ale jeho citlivost a rezonance mezi transformátorem usměrňovací stanice a sériovou kompenzací C_S (obr. 4.15.) Oscilace pak mohou být vyvolány např. poruchou při blízkém zemním spojení nebo nějakou jinou poruchou v síti.



Obr. 4.15 Použití sériové kompenzace mezi usměrňovací stanicí a ES

4.1.11 Obvod s kapacitním přístrojovým transformátorem napětí

Kapacitními PTN jsou PTN, které jsou určené pro elektroenergetické sítě VN, VVN a ZVN. Využívají se k napájení přístrojů a k měření napětí (o frekvenci 50 Hz) například u ochran jako levnější možnost induktivních přístrojových transformátorů napětí. Jeho hlavní části je kapacitní dělič napětí, transformátor a kompenzační tlumivka. Další prvky mají pouze ochrannou funkci. Na obr. 4.16 je zobrazena zjednodušená konfigurace zapojení kapacitního PTN, např. typ C2VT od firmy Passoni-Villa dle [F3]. Na tomto obrázku veličina U_1 označuje velikost fázového napětí jedné fáze vedení, na které je transformátor připojen, C_1 reprezentuje kapacitu VVN části děliče, C_2 reprezentuje kapacitu NN části děliče, ZS značí uzemňovací spojku, S_0 je NN ochranné jiskřiště, L_R představuje kompenzační tlumivku, T_R je snižovací transformátor, F_A označuje antiferorezonanční RLC filtr a U_2 je napětí používané pro napájení zátěže Z.



Obr. 4.16 Zjednodušené schéma zapojení kapacitního přístrojového transformátoru napětí C2VT určeného pro rozvodné sítě VVN

V obvodu s kapacitním PTN může nastat ferorezonance ve chvíli, kdy jeden z přechodných dějů vytvoří vhodné podmínky pro výměnu energie mezi skupinou kondenzátorů (lineární prvky) a induktivním obvodem (induktor zde představuje nelineární prvek). Přechodnými ději mohou být např. zkrat na sekundárních svorkách, obloukové zemní spojení u vedení, náhlé připojení napětí, aj. Tzv „jiskřiště“, (svodič přepětí) S_0 je určen k ochraně vinutí před možným přepětím, vznikající za těchto situací. Důsledkem přechodných stavů může být přesycení magnetických obvodů některých částí kapacitního PTN, jako např. kompenzační tlumivky, snižovacího transformátoru, některých prvků adjustačního zařízení, případně i indukční zátěže s nelineární charakteristikou. Podmínkami usnadňující vznik ferorezonance jsou malá zátěž nebo zátěž induktivní, zvláště je-li její pracovní oblast blízko nasycené části magnetizační charakteristiky. Rozhodujícími jsou také parametry sítě a podmínky při spínání. Při přerušení zkratu sekundárního obvodu nezatíženého kapacitního PTN je největší nebezpečí vzniku ferorezonance. Obdobný jev může nastat, kdy je kapacitní PTN vypnut a po krátké či delší době opět připojen na napětí. V ostatních případech, jako je např. připojení transformátoru na síť, nehrozí dle [37] tak velké nebezpečí. Pro všechny případy je nejpříznivější okamžik průchodu napětí či proudu nulou. V případě ferorezonančních jevů, obzvláště dlouhotrvajícího rázu, může dojít k poškození samotného kapacitního PTN, ale i ostatních přístrojů a také ke zhoršení přesnosti měření a v neposlední řadě znemožnění funkce jisticích přístrojů. Díky vzniku subharmonických oscilací vznikají mechanické kmity, které přispívají k poškozování jisticích přístrojů.

Za účelem tlumení nepříznivých účinků ferorezonance, se do konstrukce kapacitních PTN musí zabudovat prostředek k tomu určený. Jedním takovým prostředkem je tlumicí obvod (filtr F_A) sestávající z určité konfigurace RLC prvků obvodu. Indukčnost a kapacita tohoto obvodu jsou určeny tak, aby vykazovaly vysokou impedanci při jmenovitém kmitočtu (50 Hz), čímž je i vlastní spotřeba obvodu nízká. Tyto impedance jsou pro jiné frekvence výrazně nižší, což umožní svedení přepětí do země. O účinné utlumení rezonančních oscilací se postará do série zapojený odpor (zátěž). Proto takový obvod nemá v normální provozu žádný vliv na funkci PTN.

Národní technická norma ČSN 35 1302 [N3] u kapacitních PTN zahrnuje ferorezonanci přímo do vlivu přechodných jevů. Proto jsou definovány tyto podmínky pro rezonanční jevy:

- Jestliže je kapacitní přístrojový transformátor napětí připojen na 120 % jmenovitého napětí a má přitom prakticky nulovou zátěž a zkratované sekundární svorky, pak po odstranění zkratu těchto svorek musí vrcholová hodnota sekundárního napětí při jmenovitém kmitočtu během 10 cyklů klesnout na hodnotu, která se od normální hodnoty neliší o více než ± 10 %.
- Jestliže u kapacitního přístrojového transformátoru napětí, který je připojen na zvýšené napětí odpovídající jeho jmenovitému činiteli zvýšení napětí, a který má prakticky nulovou zátěž a zkratované sekundární svorky, je zkrat náhle odstraněn, nesmí ferorezonance trvat déle než 2 sekundy.

Uvedená norma podrobně popisuje i zkoušky kapacitních PTN. Bližší informace uvádí příslušná norma [N3].

4.2 Softwarové nástroje pro simulaci, vizualizaci a řešení ferorezonančních jevů

4.2.1 PS CAD

PSCAD program je rychlý, přesný a uživatelsky poměrně jednoduchý simulátor elektrizačních soustav, určený pro návrh a analýzu všech typů elektrických sítí. PSCAD je také znám jako PSCAD/EMTDC, protože základ výpočtového jádra programu tvoří právě EMTDC, který je nedílnou součástí graficko-uživatelského rozhraní PSCAD. PSCAD je vhodný pro simulaci ustálených stavů i přechodných jevů jak v elektrizační soustavě, tak např. při vyhodnocování řídicích systémů.

Při návrhu simulačního obvodu se prvky vybírají z rozsáhlé knihovny různých prvků elektrizační soustavy nebo logických prvků. U většiny prvků program umožňuje různé vykreslení (obr. 4.17). Parametry každého prvku je možné editovat dle potřeby.

Do schématu je možné vložit schematické značky měřicích senzorů pro měření proudu, napětí, výkonu, atd. a následně definovat výstupní proměnné (obr. 4.24), které je možné vynést do grafu (obr. 4.23) nebo do tabulky výstupů, případně exportovat do různých formátů souborů včetně MATLABU.

PSCAD byl poprvé koncipován v roce 1988, kdy začal jeho dlouhý vývoj, jako nástroje pro generování datových souborů pro EMTDC simulační program. Ve své prvotní podobě, verze 1, byl velmi experimentální. Přesto představoval velký skok v rychlosti a produktivitě. Uživatelé EMTDC místo vytváření textových výpisů mohli své systémy kreslit. PSCAD byl poprvé představen jako komerční produkt ve verzi 2, určený pro platformy UNIX v roce 1994. Byl to soubor softwarových nástrojů, které řešily a vykreslovaly průběh vypočtených veličin off-line.

Když přišla v roce 1999 verze 3 pro Windows, prezentovala se zavedením simulačního systému, který by mohl být postaven v modulární podobě. Systémy mohly být sestaveny pomocí propojovacích kreslících bloků, individuálně komplikovaných, kdy každý měl svůj vlastní datový prostor. Tento modulární systém zlepšil přesnost a správnost simulace. Navíc verze 3 přinesla

nové využití plné integrace navrhování a runtime systémů proti předchůdci. Tato integrace vytvořila intuitivní prostředí jak pro návrh, tak pro simulaci.

PSCAD Verze 4 představuje nejnovější vývoj simulačního softwaru pro energetické systémy. Nové výzvy spočívají v rozvoji prvků a nástrojů pro uživatele. Cílem je vytvořit software, který je výkonný a snadno ovladatelný. Verze 4 zachovává vhodné simulační modely svých předchůdců a zároveň přináší aktualizace a nový vzhled. Nové editory a jednodušší nápověda usnadňují hledání možnosti řešení větších systémů. Verze 4 je kompatibilní se starší verzí 3. PSCAD se stává stále častější volbou odborníků pro simulaci přechodných dějů, ale i ustálených stavů v elektrických sítích.

PSCAD umožňuje uživateli schematicky sestavit obvod, spustit simulaci, analyzovat výsledky a spravovat data v kompletně integrovaném grafickém prostředí. Uživatel může změnit systémové parametry v průběhu simulace a zobrazit výsledky přímo.

PSCAD je dodáván s knihovnou předprogramovaných a testovaných modelů, od jednoduchých pasivních prvků a kontrolních funkcí, po komplexnější, jako jsou elektrické stroje, FACTS, přenosové vedení a kabely. Pokud konkrétní model neexistuje, PSCAD poskytuje flexibilitu vytváření vlastních modelů, a to buď úpravou stávajících modelů, nebo využitím Design Editoru.

Níže jsou uvedeny některé běžné modely nalezené v systémech řešených pomocí PSCAD:

- Rezistory, induktory, kondenzátory
- Vzájemně spojené vinutí, transformátory
- Elektrická vedení a kabely
- Napěťové a proudové zdroje
- Spínače a jističe
- Ochrany
- Polovodičové prvky
- Analogové a digitální funkce
- Měřící systémy a funkce
- Generování signálů
- Větrné farmy, turbíny
- AC a DC stroje, generátory, setrvačné modely

PSCAD a jeho simulační engine EMTDC má za sebou téměř 30 let vývoje inspirovaného nápady a návrhy jeho stále se zvětšující celosvětové uživatelské základny. Tato filozofie vývoje pomohla vytvořit PSCAD jakožto jeden z nejsilnějších CAD softwarových balíčků pro simulaci v oboru elektrotechniky. Podrobný popis programu a jeho využití pro analýzu ferorezonančního jevu je možné nalézt v kapitole 4.3.

4.2.2 Matlab / Simulink

MATLAB (MAtrix LABoratory) je interaktivní programové prostředí a skriptovací programovací jazyk čtvrté generace. Program MATLAB je vyvíjen společností MathWorks a je k dispozici pro operační systémy Linux (32-bit, 64-bit), Windows (32-bit, 64-bit), Mac OS X (64-bit). MATLAB umožňuje počítání s maticemi, vykreslování 2D i 3D grafů funkcí, implementaci algoritmů, počítačovou simulaci, analýzu a prezentaci dat i vytváření aplikací včetně uživatelského rozhraní. Původně byl jazyk určen pro matematické účely, ale časem byl upraven, byly přidány

nové funkce a rozšíření, rozrostl se různými směry a dnes je využitelný v široké paletě aplikací. V roce 2004 měl MATLAB přes milión uživatelů a to především v řadách vědeckotechnických pracovníků, studentů a zaměstnanců vysokých škol. MATLAB je využíván pro vědecké a výzkumné účely a to jak v soukromém sektoru, tak i v akademických řadách. Hlavní oblastí využití jsou technické obory a ekonomie.

Název MATLAB vznikl zkrácením slov MATrix LABoratory (volně přeloženo „maticová laboratoř“), což odpovídá skutečnosti, že klíčovou datovou strukturou při výpočtech v MATLABu jsou matice. Vlastní programovací jazyk vychází z jazyka Fortran.

Programovací jazyk Matlab je integrované prostředí, které je určené pro vědeckotechnické účely, simulace, paralelní výpočty apod. Zahrnuje výpočty, vizualizaci a programovaní do uživatelsky ovladatelného prostředí. Problémy a řešení jsou nejčastěji vyjádřeny pomocí známých matematických vztahů. Typické oblasti použití:

- inženýrské výpočty,
- tvorba algoritmů,
- modelování a simulace,
- analýza dat,
- vědecká a inženýrská grafika,
- tvorba aplikací (včetně grafického rozhraní).

Mezi základní vlastnosti lze zahrnout vlastnost, že veškeré objekty v Matlabu jsou považovány za prvky pole (matice). Tyto prvky však mohou být nejen čísla, proměnné, ale i složitější struktury jako například obrázky. Výkonnost Matlabu je rozšiřována díky navazujícímu softwaru, které tvoří především soubory programu tzv. "toolboxy", orientované zpravidla na daný problém nebo uživatelem sestavené programy, tzv. m-files (m-soubory).

Simulink je program, který využívá Matlab a jeho funkce k simulaci dynamických systémů. Je mladší než Matlab. Jeho první verze byla k dispozici pro Matlab 4. Simulink má jiné uživatelské rozhraní než Matlab. Zatímco u Matlabu je stále nejdůležitější příkazový řádek, ovládání Simulinku je jednodušší a intuitivnější, ale pokročilejší funkce nelze provádět bez znalosti jazyka Matlab. Interaktivní způsob tvorby a simulace modelů se spouští z příkazového řádku systému Matlab příkazem „simulink“. Po spuštění je vytvořeno okno pro tvorbu nového modelu a okno obsahující základní nabídku otvírání knihoven zdrojů signálů, základních spojitých, diskrétních a nelineárních bloků a bloků pro zobrazování a ukládání signálů. Pod touto interaktivní obálkou se skrývá systém velmi podobný grafickému subsystému s obdobnými funkcemi simget a simset. Další vrstva funkcí umožňuje již neinteraktivní tvorbu modelů systémů. Pro obvyklého uživatele však není nutné o implementaci a programování modelů přemýšlet.

Využití programu MATLAB – simulink pro využíti k analýze ferorezonančních jevů je podrobně popsáno v kapitole 4.4.

4.2.3 ATP EMTP

ATP EMTP je softwarový nástroj pro simulaci přechodných jevů v elektrických sítích. Vývoj programu EMTP byl započat koncem 70. let 20. století a zpočátku byl používán jen jako vý-

zkumný program. Byl vyvinut společnosti EFI, později přejmenovanou na SINTEF Energy Research.

Po jeho komercializaci došlo k vývoji dalších programů s grafickým editorem jako je ATP Draw. V současnosti je program rozšířený i v akademických kruzích ČR.

ATP Designer může být použit jako grafický editor pro ATP verzi programu elektromagnetických přechodových jevů (EMTP) provedených v operačním systému Windows. ATP Designer umožňuje uživateli simulovat různé situace a analyzovat poruchy a přechodné jevy v elektrických sítích.

ATP obsahuje mnoho různých modelů zahrnující prvky elektrických systémů, jako jsou transformátory, točivé stroje, vedení, kabely, spínací prvky a dalších. Práce v programu je způsobem Drag and drop (přetažení), kde z knihovny postupně vybíráme prvky a sestavujeme simulovaný obvod.

Navíc jsou vysoce sofistikované funkce implementované tak, aby ATP základní síťové simulace zjednodušil. Všechny tyto vlastnosti jsou založeny na zpracování konkrétních ATP PL4 - souborů nebo Comtrade - souborů. ATP Designer je schopen číst a psát v obou formátech Comtrade 1999 a 2001 podle mezinárodního standardu IEC 60255-24. ATP Designer je také schopen konvertovar ATP PL4 - soubory do formátu COMTRADE. ATP Designer je kompatibilní pro operační systémy Windows NT, Windows 9x, Windows 2000, Windows XP Home Edition a Professional Edition, Windows Vista a Windows 7 (32 a 64bit). U 64bitových systémů, lze programy pustit pouze pomocí 32bitového virtuálního stroje, což neumožňuje využití celé výpočetní kapacity.

Pro simulaci nelineárních prvků a analýzu jevů ferorezonance, lze využít různé prvky. Editace parametrů spočívá v zadání jednotlivých bodů závislosti proudu na magnetickém toku s libovolnou přesností. Samozřejmě počet těchto bodů je přímo úměrný rychlosti simulace.

Za velkou nevýhodu programu ATP lze považovat rozdělení nástrojů do samostatných aplikací. Instalace je poměrně uživatelsky nepohodlná, nastavení a zprovoznění celého systému ATP je komplikované a zdlouhavé.

4.2.4 Dynast

Jedná se o simulační software, který umožňuje modelovaný objekt popsat za pomoci kombinací matematických vztahů, schématu řídících bloků (fungují podobně jako v softwaru SIMULINK) a různých fyzikálních prvků. Tento přístup nabízí uživateli vysokou volnost v přístupu k problematice a možnost využití v mnoha oborech. Je naprogramován v jazyce C++.

Základní technologií modelování jsou multipólová schémata, které kopírují principy reálného systému. Model je možné sestavit bez pracného vytváření matematických diferenciálních vztahů. Pro zvýšení přehlednosti je možné kombinovat schémata jednotlivých prvků do hierarchické struktury a vytvářet jejich knihovny.

Sestavení vícepólových a blokových schémat je možné provádět přímo ve zdrojovém jazyce programu, ale zároveň taky v interaktivní nadstavbě DYNCAD nebo DYNSHELL (programy pracující pod operačním systémem Windows a taky jako webová aplikace JAVA). Dále program nabízí možnost importovat složitá elektrická schémata ze systému OrCAD.

DYNAST je schopen simulovat nelineární dynamické systémy (proti SIMULINKu vyniká výkonností), linearizovat je a detailně analyzovat. Ve výsledku můžeme získat např. přenosové funkce, póly a nulové body. Tyto výpočtové výsledky je možné exportovat jako M-soubory do systému MATLAB, nebo kombinovat simulaci v DYNASTu a SIMULINKu. Můžeme tak využít universálnost SIMULINKu a výkonnost DYNASTu.

Dynamické systémy popisuje několika způsoby s možností libovolné vzájemné kombinace:

1. sada rovnic (víceúčelový řešitel rovnic nevyžadující žádný blokový diagram soustavy)
2. blokový diagram (funguje jako klasicky simulátor)
3. vícepólový diagram struktury systému (odpovídá skutečnému analyzovanému systému)

Vzhledem k tomu, že DYNAST používá numerické početní metody a veliká část operací je automatizována, nevyžaduje žádné znalosti počítačového programování. Pracuje v operačním systému Windows Z9X/NT/2000/XP/Win7 a výpočetní jádro v některých systémech UNIX. Jedná se o komerčně dostupný software s možností přístupu na volném internetovém výpočetním serveru fungujícím pod webovým rozhraním HTTP a JAVA. Kromě toho existuje částečně omezená, ale po registraci zdarma ke stažení studentská verze, nebo relativně levná plná verze pro školy.

4.2.5 Dymola – DYnamic MOdeling LAboratory

Program Dymola je univerzální komerční software vyvinutý pro modelování a simulace dynamického chování a vztahů mezi systémy různých oborů jako jsou elektrotechnika, mechanika, termodynamika, hydraulika a řídicí systémy. Díky svému mezioborovému přesahu má tento program dobré předpoklady pro jeho účinné využití v energetickém oboru.

Většina rutinních manipulací s objekty i matematických formulací je v této metodě modelování automatizována, jelikož vychází z objektové reprezentace komponent a matematických vztahů. Prostřednictvím objektového hierarchického přístupu je možné nenáročně a přehledně vytvářet i komplikované a rozsáhlé systémy.

Dymola pracuje s knihovnami modelových komponent z více oborů a to včetně elektroenergetiky. Díky využití těchto knihoven modelových komponentů je možné sestavit modely soustav více odpovídající realitě a tím dosáhnout přesnějších výsledků a tím snížit potřebu tvorby skutečných prototypů. Propojením programu Dymola a systému Symulink je možné, aby byly veškeré modely exportovány jako blokové S-funkce, přičemž vzniklý DymolaBlock lze použít jako knihovní prvek pro Simulink a včlenit jej do rozsáhlejších analýz.

Mezi nesporné přednosti programu Dymola patří rychlé sestavení grafických modelů a zrychlené simulování pomocí symbolického preprocesingu umožňující definování modelů. Dále pro názornou ukázku využívá 3D animace chodu a funkce simulovaného zařízení a simulace v reálném čase.

4.2.6 ETAP

Software ETAP je výkonným nástrojem pro jednoduché návrhy až po nejnáročnější projekty. Je vysoce komplexní a ve velké míře používaný pro podniková řešení cílená pro navrhování, si-

mulaci, provoz, řízení, optimalizaci a automatizaci výroby, dále pro přenos, distribuci a průmyslové energetické systémy. Software ETAP sestává z několika dílčích analytických softwarů specificky zaměřených. Podrobnější popis jednotlivých softwarových modulů je uveden níže.

Network Analysis – Integrated AC & DC System. V tomto softwaru je plně integrován analytický nástroj AC a DC elektrického systému. Sítě DC využívají stejnou databázi jako AC moduly. DC Load Flow a DC Short Circuit poskytují inženýrům analytické možnosti, jak navrhovat a analyzovat DC napájecí systémy. Battery Discharge a Sizing Analysis se používají k výběru nejvhodnějších kondenzátorů, ověření maximální kapacity stávajících baterií a snadno simulují širokou škálu zálohování, řízení a dalších možností v DC.

Real-Time Monitoring & Simulation je sada softwarových nástrojů nabízejících integrované podnikové řešení. Umožňuje nepřetržité monitorování systému, simulaci a optimalizaci. Dále v sobě zahrnuje systém zpracování, výroby a řízení.

Protective Devices - Device Coordination/Selectivity využívá inteligentní jednovrstvové diagramy, komplexní nástroj knihovny a integrovanou trojrozměrnou databázi.

Automatic Relay Testing and Transient Simulator (ARTTS) systém je určený pro testování řady ochran (včetně distančních), elektroměrů a převodníků. ARTTS tak slouží pro testování, simulaci a kalibraci ochran a porovnávání skutečných hodnotami s hodnoty udanými výrobcem.

Panel Systems - ANSI & IEC spojuje grafické uživatelské rozhraní s inteligencí ETAP pro snadné navrhování a analýzu systému pro malá distribuční napětí.

Ground Grid Systems umožňuje rychle a přesně navrhovat a analyzovat zemní ochranu. Pokročilé 3D technologie v sobě zahrnují jednovrstvové diagramy, které umožňují inženýrům vizualizovat uzemňovací systémy. Flexibilní návrhové metodiky umožňují rychle automaticky navrhnout uspořádání v detailních schématech.

User-Defined Dynamic Models (UDM) slouží pro vytváření a zpracování diagramů řídicích bloků používající moduly Transient Stability a Generator Start-up. Umožňuje nezávislé sebetestování přes vypnutí zátěže, připojení zátěže a přípojnicových systémů pro ověření modelů a jejího dynamického chování. UDM modely mohou být použity ve více zařízeních s rozdílnými nastaveními s neomezeným počtem vytvořených projektů.

Cable Thermal Analysis je určený pro navrhování kabelových systémů tak, aby byl využit jejich maximální potenciál a zároveň zajištěn bezpečný a spolehlivý provoz. Pomocí přesných výpočtů je schopen vypočítat velikost kabelů, která je úměrná jejich fyzické schopnosti být maximálně vytížený. Mimo jiné je schopen provádět teplotní analýzy, kdy vypočítá teplotní profil pro dané proudy protékající kabelem, a tím je schopen inženýr snížit riziko poškození systému za havarijních podmínek.

Cable Pulling umožňuje pro více druhů kabelů a jejich různé velikosti vytvořit jejich komplexní 3D tahové namáhání, na jehož základě je následně navržena optimální průřez kabelu.

Control Systems v sobě zahrnuje analýzu napájecích a řídicích obvodů. Umožňuje simulaci sekvenčního provozování kontrolních zařízení (elektromagnety, relé, ovládané kontakty, multisekvenční kontakty, pohony včetně spínacích podmínek).

Data Exchange (DATAX) je určen pro import, export a synchronizaci dat mezi externími zdroji. Dále slouží pro transformaci starších dat do ETAP a z něj do externích softwarů (GIS systémy, AutoCAD, Microstation, aj.). Zahrnuje v sobě přizpůsobení mapování dat, inteligentní kontrolu chyb a generátor jednovrstvových diagramů.

GIS Map umožňuje vrstvit jednovrstvové diagramy, kterým odpovídají dané zeměpisné mapy elektrické energie, přenosu a distribuce systémů. Synchronizuje informace příslušných elektrických zařízení z GIS do ETAP a udržuje asociaci mezi nimi. Umožňuje neomezený počet otevřených GIS map v ETAP. Výsledky se zobrazují na geografických mapách, poskytujících snadný přehled o stavu elektrizační soustavy v rámci GIS mapy.

4.2.7 EasyPower

Sada produktu Easy Power poskytuje na trhu silný nástroj, který zjednodušuje práci projektantů, elektrotechniků, bezpečnostních pracovníků, dodavatelů elektro, vedoucích údržby atd. Urychluje a zjednodušuje navrhování energetického systému a analýzy.

Easy Power nabízí tyto produkty:

Easypower Suite

Produkt Easypower Suite poskytuje kompletní řadu elektrotechnických softwarových nástrojů pro inteligentní projektování, analýzu a monitorování elektrotechnických systémů na bázi Windows. Produkt Easypower nabízí rychlé zpracování, přesné výsledky. Ke konfiguraci Easypower pro specifické úkoly, lze pak podle potřeby přidat další funkce. Jsou plně přizpůsobitelné a rozšiřitelné.

EasyPower EasySolv

Produkt EasySolv rychle a snadno vytváří podrobné diagramy, provádí Arc Flash rizikové kalkulace, jednovrstvové diagramy, bezpečnostní dokumentaci atd. Poskytuje výkonné nástroje např. pro zlepšení bezpečnosti zařízení, identifikuje nebezpečné oblasti a navrhuje efektivní řešení, zjednodušuje dokumentaci, aj.

EasyPower Safety Tracker

Produkt Safety Tracker zjednodušuje elektrotechnické bezpečnostní programy, přináší výkonné nástroje pro provozní personál.

EasyPower DataExpres poskytuje řešení pro uživatele, kteří zadávají vstupní údaje.

DataExpress vytváří jednoduché a chytré jednovrstvové diagramy.

4.2.8 PowerCAD

Tento software byl vyvinut v roce 1991 několika přidruženými společnostmi, které společně přispívali k budování elektrotechnického průmyslu za posledních 25 let. PowerCAD nabízí širokou škálu softwarů určených pro konstrukci elektrotechnických zařízení a zahrnuje v sobě jejich podpůrné služby, které jsou na špičkové úrovni v tomto oboru.

Softwarové produkty PowerCAD jsou vytvořeny speciálně pro služby elektrotechnického a projekčního odvětví. Jsou určené pro simulaci a modelování elektrických sítí. Produktový software PowerCAD Electrical Design je vhodný nástroj pro návrh elektrických systémů. Nejnovější

nabízený produktový software na trhu je PowerCAD-5, který v sobě zahrnuje software, jako jsou QuickCable-LTTM, QuickCableTM, PowerCalcTM a PowerCalc-HTM.

PowerCAD-5 je schopný vytvořit kompletní konstrukční možnosti z pohledu elektrotechniky (pomocí zabudovaného softwaru PowerCalc-HTM). Dále je schopný namodelovat situace, při nichž vznikají harmonické frekvence. Zahrnuje v sobě modelování jednovrstvových diagramů, koordinačních křivek selektivity ochranných prvků v závislosti na čase. Kompatibilita s CAD systémy umožňuje načíst informace přímo z projektové dokumentace.

4.2.9 MATPOWER

MATPOWER byl původně vyvinut z kódu výpočetních požadavků PowerWeb projektu, ovšem jeho konečná podoba je ve formě balíku MATLAB®M-files, sloužící pro řešení přenosu elektrické energie a optimalizaci problémových energetických systémů. Zejména slouží jako simulační nástroj pro výzkumné pracovníky a pedagogy, pro méně náročné aplikace. Je navržen tak, aby byl dosažen co nejlepší výsledek a zároveň kód výstupu byl snadno pochopitelný a editovatelný. MATPOWER vyvinuli Ray D. Zimmerman, Carlos E. Murillo-Sanchez a Deqiang Gan z PSERC na Cornellově univerzitě pod vedením Roberta Thomase. Tento software je poskytovaný zdarma, s písemným souhlasem autorů.

Neposkytuje žádné záruky správnosti dosažených výsledků, proto je nutné jednotlivé modely ověřit praktickým měřením, nebo pomocí jiných simulačních nástrojů. Pro vlastní potřeby lze zdrojový kód programu modifikovat, ovšem se zachováním původních autorských práv.

4.2.10 Octave

GNU Octave byl původně vyvíjen pro potřeby vysokých škol jako výukový program pro navrhování chemických reaktorů, kde by studenti řešili reálné problémy v přístupném funkčním prostředí. Postupně se rozšířil do mnoha oborů a je plně využíván jak ve školství, tak ve výzkumu, tak i pro komerční aplikace.

Octave disponuje rozsáhlou knihovnu matematických funkcí, velkým množstvím nástrojů pro řešení problémů numerické lineární algebry, hledání kořenů nelineárních rovnic, integrování běžných funkcí, službami pro manipulaci s polynomy, numerickou integraci a řešení diferenciálních a algebrodiferenciálních problémů.

S výjimkou numerických výpočtů poskytuje Octave široké grafické možnosti pro vizualizaci dat a manipulace. Využívá rozhraní příkazového řádku. Programovací prostředí je dál rozšiřitelné, a to jak pomocí vlastního jazyka OCTAVE, tak pomocí dynamicky nahrávaných modulů napsaných v C++, C, Fortranu a dalších jazycích, přičemž je Octave freeware pracující pod operačním systémem Windows 9X/NT/2000/XP, GNU/Linux

Díky tomu, že je Octave plně funkční klon MATLABu, můžeme využívat SIMULINK jako jeho nadstavbu, což činí z Octave silný a univerzální simulační nástroj, přestože samotný software Octave je schopen řešit jen simulace definované pomocí matematických vztahů.

4.2.11 Srovnání softwarových nástrojů

Přehledné srovnání softwarů je uvedeno v tab. 4.1. Kritérií pro výběr nejvhodnějšího softwaru může být několik. Pro účel analýzy ferorezonančního jevu by měl simulační nástroj splňovat následující kritéria.

- Dostatečná *knihovna matematických modelů* prvků elektrické sítě. Modely jednotlivých prvků by měly dostatečně přesně popisovat jejich reálné chování.
- *Možnost nastavení počátečních podmínek* simulace. Jazyk pro řízení simulace musí umožnit nastavení hodnot v libovolném místě modelu a zajistit rozšíření definovaných hodnot v modelu.
- *Možnost namodelovat chování okolí*. V nejzákladnějším případě, musí umožnit definovat pomocí různých generátorů signálů primární vstupy.
- *Schopnost zobrazit hodnoty libovolných proměnných* - optimálně jejich časový průběh.
- *Konverzační režim*. Po ukončení simulace by měl software přejít do konverzačního režimu a umožnit uživateli provést různé akce, jako například nastavovat a zobrazovat hodnoty.
- *Hlášení o chybách*. Software by měl v průběhu simulace detekovat a upozorňovat na chybové stavy.

Objektivní srovnání software je velmi problematické. Pro výběr vhodného nástroje je nutné posoudit, jak používané modely zohledňují nelinearitu reálných prvků a jak matematicky tuto vlastnost popisují. Matematické definice nelinearity má vliv na rychlost a stabilitu simulace. Z tohoto pohledu jako nejvhodnější lze považovat software Matlab/simulink, PSCAD, ATP. ATP v některých limitních situacích není dostatečně stabilní. Pro praktické řešení a analýzu ferorezonančního jevu byli vybrány programy Matlab/simulink a PSCAD.

Oba vybrané softwary používají jako základ výpočetního jádra jazyk Fortran. Fortran byl v 50. letech 20. století vyvinut společností IBM pro vědecké účely a numerické výpočty. Od té doby jej řada nových simulačních nástrojů poslední generace využívá v různě modifikovaných verzích.

Rychlost simulace, je u každého nástroje ovlivněna zejména složitostí použitých modelů prvků. V případě lineárního systému je strojový čas obou nástrojů přibližně stejný. Strojový čas ovlivňuje i počet a definice proměnných, způsob zápisu dat, nebo vykreslování a nastavení kroku výpočtu.

Tab. 4.1 Srovnání softwarových nástrojů

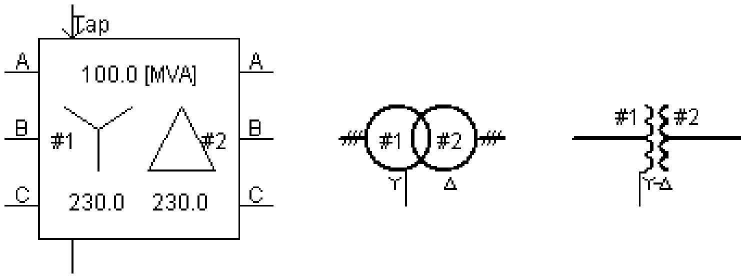
	PS CAD	Matlab simulink	ATP EEUG	DYNAST	DYMOLA	ETAP	EasyPower	PowerCAD	MATPOWER	Octave
Společnost	Manitoba Hydro International	MathWorks Inc.	Bonneville Power Administration	DYN	Dassault Systemes S.A.	ETAP	EasyPower LLC	PowerCad Software Pty. Ltd.	Pserc	Powersim Software AS
Země původu	Kanada	USA	USA	Česká republika	Francie	USA	USA	Austrálie	USA	Norsko
Jazyk	EN	EN	EN	CZ	EN	EN	EN	EN	EN	EN
Zaměření	EMTDC, Přechodné jevy, Elektrotechnika a Elektroenergetika	Analýza, výzkum, algoritmizace	EMTP - šíření elektromagnetických vln	simulace dynamických vlastností různých fyzikálních systémů se zaměřením na využití ve školách	modelování a simuování dynamických vlastností elektrických a jiných systémů	analýza a simulace jevů a průběhů v rozvodných sítích a jejich řízení	analýza a simulace jevů a průběhů v rozvodných sítích a jejich řízení	simulace jevů a průběhů v rozvodných sítích	simulace jevů a průběhů v rozvodných sítích	Analýza, simulace, výpočty
Použití	výuka, výzkum	výuka, výzkum, vývoj	výuka, výzkum	výuka, vývoj	výuka, výzkum, vývoj	výuka, výzkum, vývoj, řízení	výuka, výzkum, vývoj, řízení	výuka, vývoj	výuka, vývoj	výuka, vývoj
Podpora	návody, příklady	návody, příklady	pouze oficiální komunita	návody, příklady	návody, příklady	návody, příklady	návody, příklady	návody, příklady	návody, příklady	wiki octave
Licence	Komerční	Komerční	Komerční	Freeware (Vyžaduje registraci)	Komerční	Komerční	Komerční	Komerční	GNU GPL	GNU GPL
Verze k vyzkoušení (zdarma	Ano	Ano	Ne	-	Ano	Ano	Ano	Ne	-	-
Časově omezená verze	Ne	30 dní	-	-	Ne	n/a	Ne	-	-	-
Funkčně omezená verze	Ano	Ne	-	-	Ano	n/a	Ano	-	-	-
Poslední verze	4.5	R2013a	2012	n/a	2014	12.5	9.0	5.0.75.2	4.1	3.6.4
Modul/Modulární SW	Ne	Modul	Ne	Ne	Modulární	Modulární	Modulární	Ne	Modul	Modulární
Cena	1650$ (single user educational version)	90000Kč (17000Kč školní verze)	n/a	n/a	5900$ Standard, 2900$ Light, 1200$ Simulation	od 2500$	65$ (Home & Personal version)	n/a	Zdarma	Zdarma
Univerzálnost	Jednoúčelový	Univerzální	Jednoúčelový	Jednoúčelový	Univerzální	Univerzální	Univerzální	Jednoúčelový	Jednoúčelový	Univerzální
Architektura	n/a	Úplný programovací jazyk	n/a	n/a	Využívá programovací jazyk Modelica	n/a	n/a	n/a	knihovny (m-files)	n/a
Propojení s jinými SW	Matlab	MS Office, C, Java, .NET...	k vykreslování grafů využívá knihovny Matlabu	export do M-files	kompatibilita s CATIA v6	SKM, Siemens PSS, EasyPower, Neplan, DIgSILENT, CYME, DCSDM, EDSA	n/a	n/a	pro svou činnost potřebuje Matlab nebo Octave	C++, Matlab
Systémové požadavky	procesor architektury x86 nebo x64, 256MB RAM, 100MB volného místa na HDD, MS Windows	procesor architektury x86 nebo x64, 2GB RAM, 4GB volného místa na HDD, MS Windows, Linux nebo MAC OS	procesor architektury x86, 32MB RAM, 10MB volného místa na HDD, MS Windows	procesor architektury x86, 256MB RAM, 60MB volného místa na HDD, MS Windows 2000 a vyšší	procesor architektury x86 nebo x64 (dual coore), 2GB RAM, 1GB volného místa na HDD, MS Windows XP a vyšší + C/C++ kompilátor, Linux	procesor architektury x86 nebo x64 (dual core), 2GB RAM, max. 80GB volného místa na HDD, MS Windows XP SP3 a vyšší, .NET 3.5	procesor architektury x86 nebo x64, 512MB RAM, 300MB volného místa na HDD, MS Windows XP a vyšší	n/a	procesor architektury x86 nebo x64, 2GB RAM, 4GB volného místa na HDD, MS Windows, Linux nebo MAC OS	procesor architektury x86 , , Linux,MS Windows, Mac OS
Knihovna modelů ES	Ano	Ano	Ano	Ano	Ano	Ano	Ano	Ano	Ano	Ne
Nastavení počátečných podmínek	Ano	Ano	Ano	Ano	Ano	Ano	Ne	Ne	Ano	Ano
Modelování chování okolí	Ano	Ano	Ano	Ano	Ano	Ano	Ne	Ne	Ano	Ano
Zobrazení hodnot libovolných proměných	Ano	Ano	Ano	Ano	Ano	Ano	Ano	Ano	Ano	Ano
Konverzační režim	Ano	Ano	Ano	Ano	Ano	Ano	Ano	Ano	Ano	Ano
Hlášení o chybách	Ano	Ano	Ano	Ano	Ano	Ano	Ano	Ano	Ano	Ano

4.3 Analýza ferorezonančního obvodu s využitím softwarového nástroje PSCAD

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

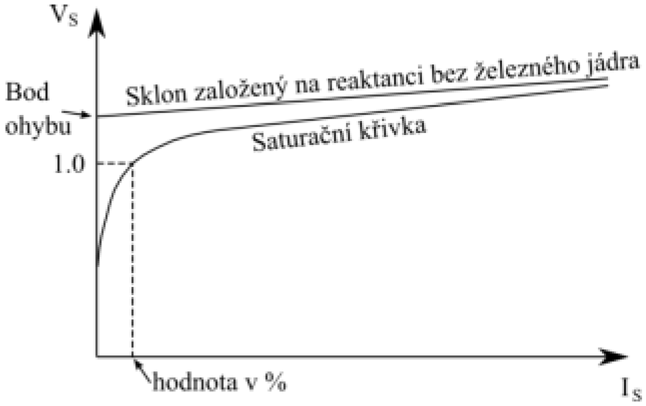
4.3.1 Model transformátoru v programu PSCAD

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. Každý typ lze zobrazit ve třech variantách dle obr. 4.17.



Obr. 4.17 Schematické znázornění modelu dvouvinuťového transformátoru v programu PSCAD

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.

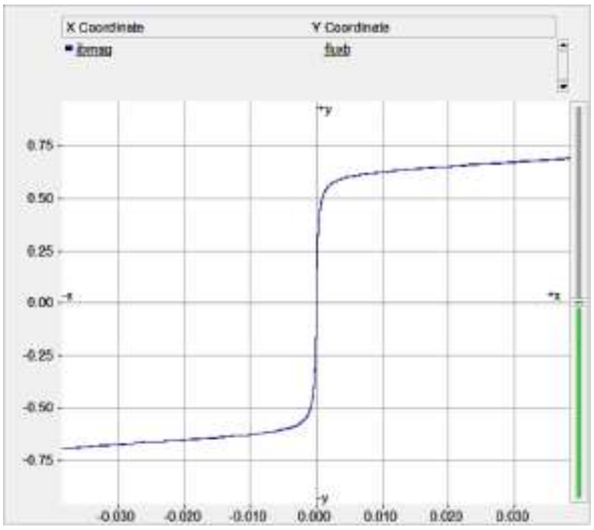


Obr. 4.18 Nastavení vlastnosti saturace

Dle obr. 4.18 je potřeba nadefinovat parametry pro saturaci transformátoru v parametrizačním dialogovém oknu, viz obr. 4.19. 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 $U_S = 1pj$ síťového napětí. To znamená, že zvětšující se hodnota magnetizačního proudu vede k méně ostrému kolenu saturační křivky.

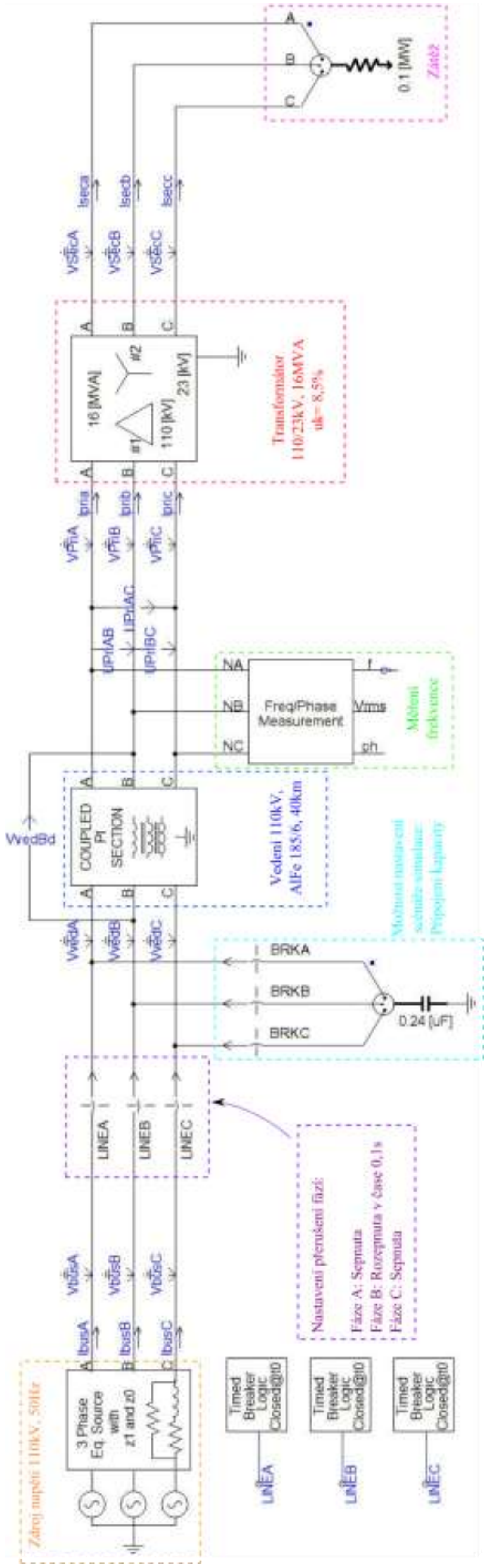
Obr. 4.19 Nastavení vlastnosti saturace



Obr. 4.20 Průběh saturační křivky

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

Teoreticky byla tato situace podrobně popsána v kapitole 4.1.6. Pro praktickou simulaci využijeme softwarový nástroj PSCAD. Na obr. 4.21 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. 4.21 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.

Součástí schématu jsou i měřicí prvky, jako například ampérmetr a voltmetr, určené pro měření fázového a sdruženého napětí a dále měřič frekvence. Některé modely umožňují sledovat i jejich „vnitřní“ veličiny a následně je zobrazit v grafické závislosti, nebo numericky. Konkrétně v uvedeném případě budou tímto způsobem zobrazeny hodnoty magnetického toku a magnetizačního proudu. Zpracování výstupu z měřícího prvku je řešeno dle obr. 4.22. Výstup z měřicího prvku se graficky přivede do výstupního kanálu, který zaznamená průběh měřené veličiny. Záznam lze pak vykreslit graficky nebo nahrát do souboru a exportovat.

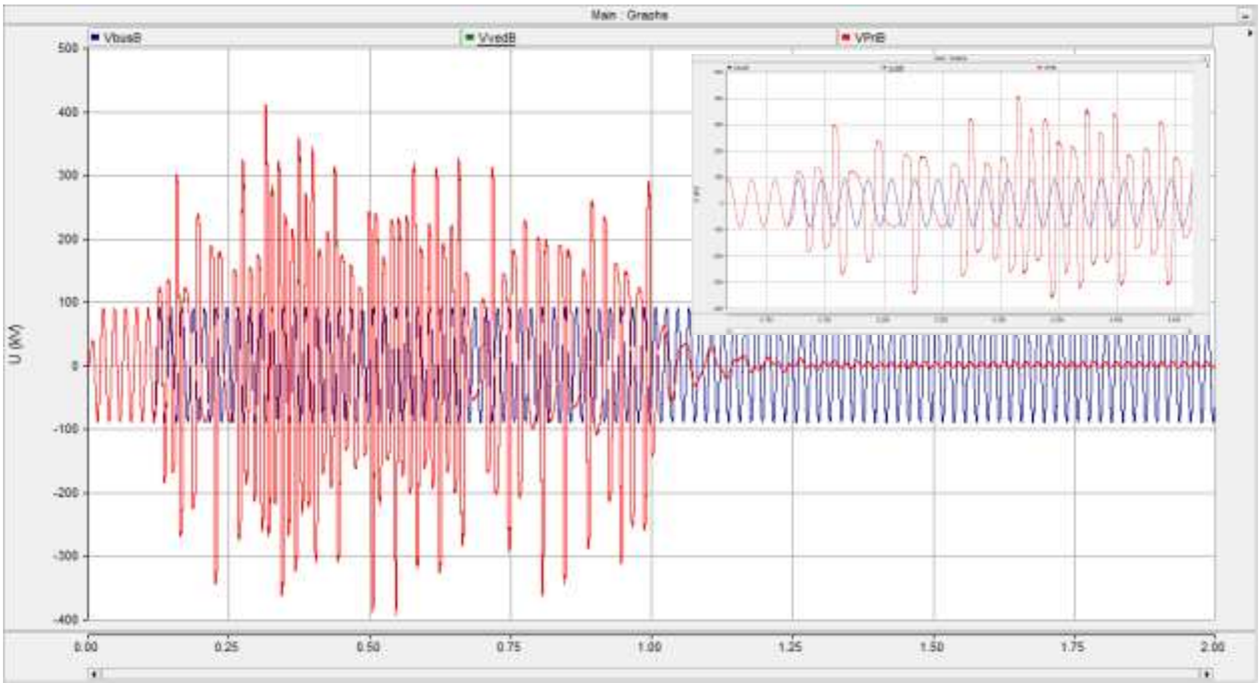
Signál lze dále libovolně matematicky upravovat, analyzovat a zobrazovat, podobně jako v programu MATLAB simulink.

Obr. 4.22 Definice výstupných proměnných v PSCADu

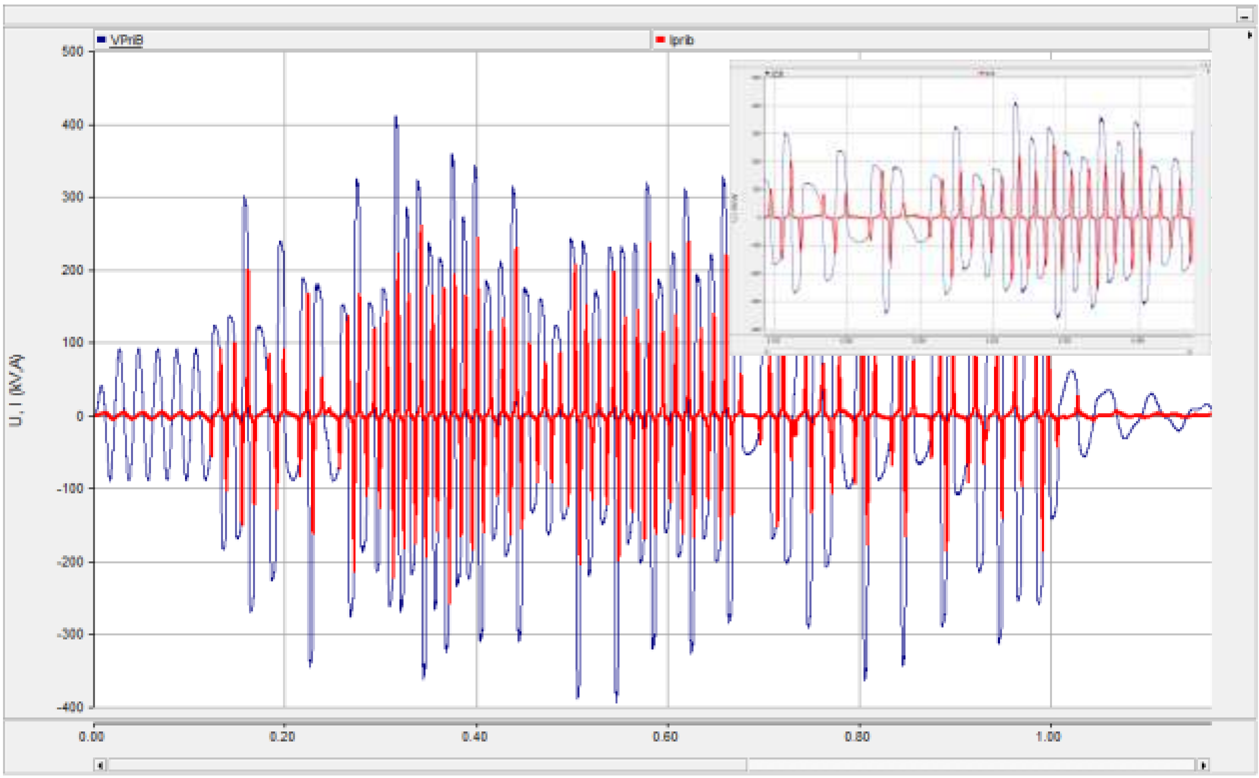
V prvním kroku bude provedena analýza výchozí konfigurace a nastavení zmíněné experimentální sítě. Nastavení parametrů je voleno tak, aby došlo k naplnění podmínek pro vznik ferorezonančního jevu, tj. systém obsahuje zdroj napětí, kapacitu, indukčnost s feromagnetickým jádrem a také nízké ztráty minimalizují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

Na obr. 4.23 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.



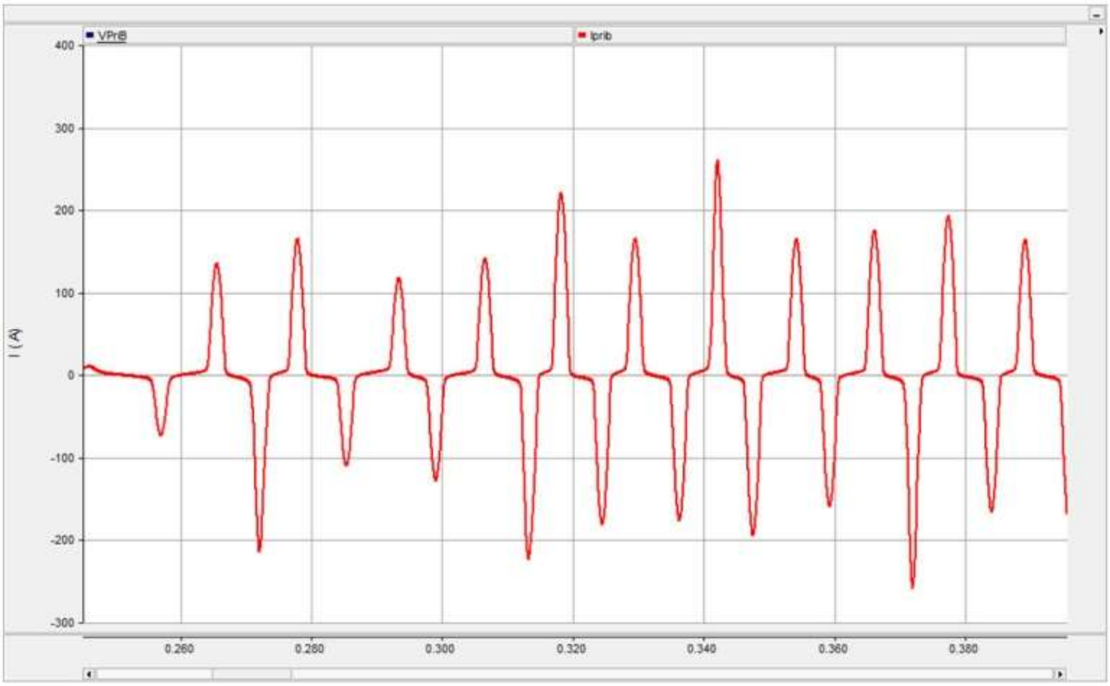
Obr. 4.23 Průběh napětí při ferorezonančním jevu (červená křivka) a jeho srovnání s harmonickým průběhem napětí (modrá křivka)



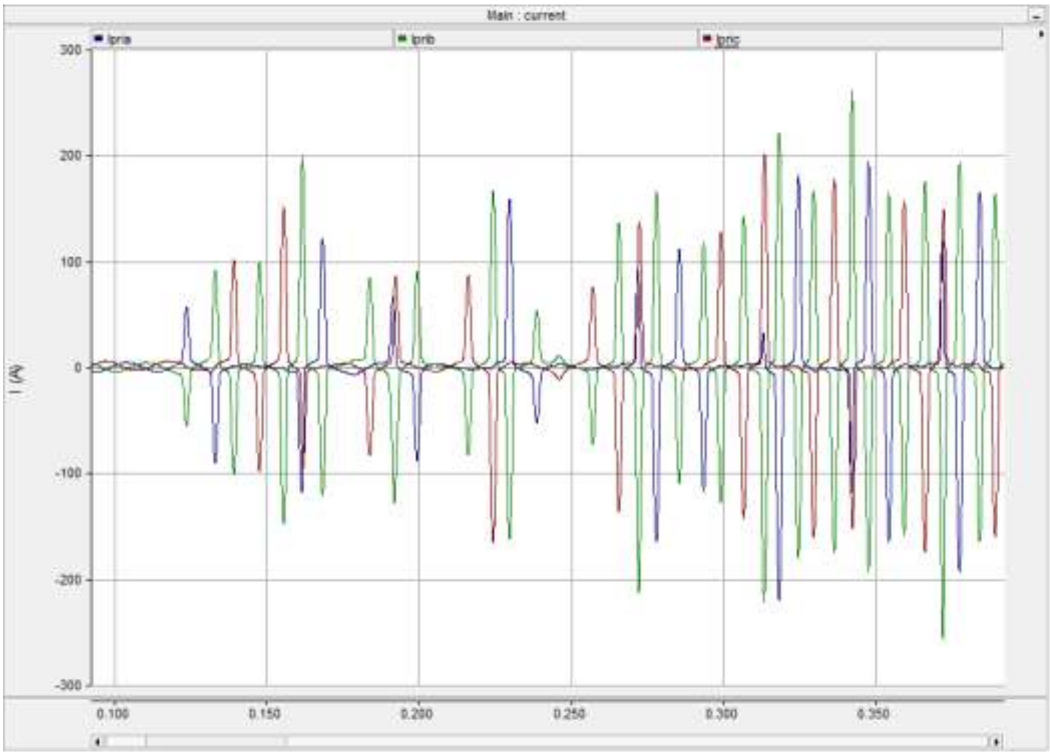
Obr. 4.24 Průběh proudu (červená křivka) a napětí (modrá křivka) na primární straně transformátoru

Srovnání průběhu napětí a proudu je zobrazeno na obr. 4.24. 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

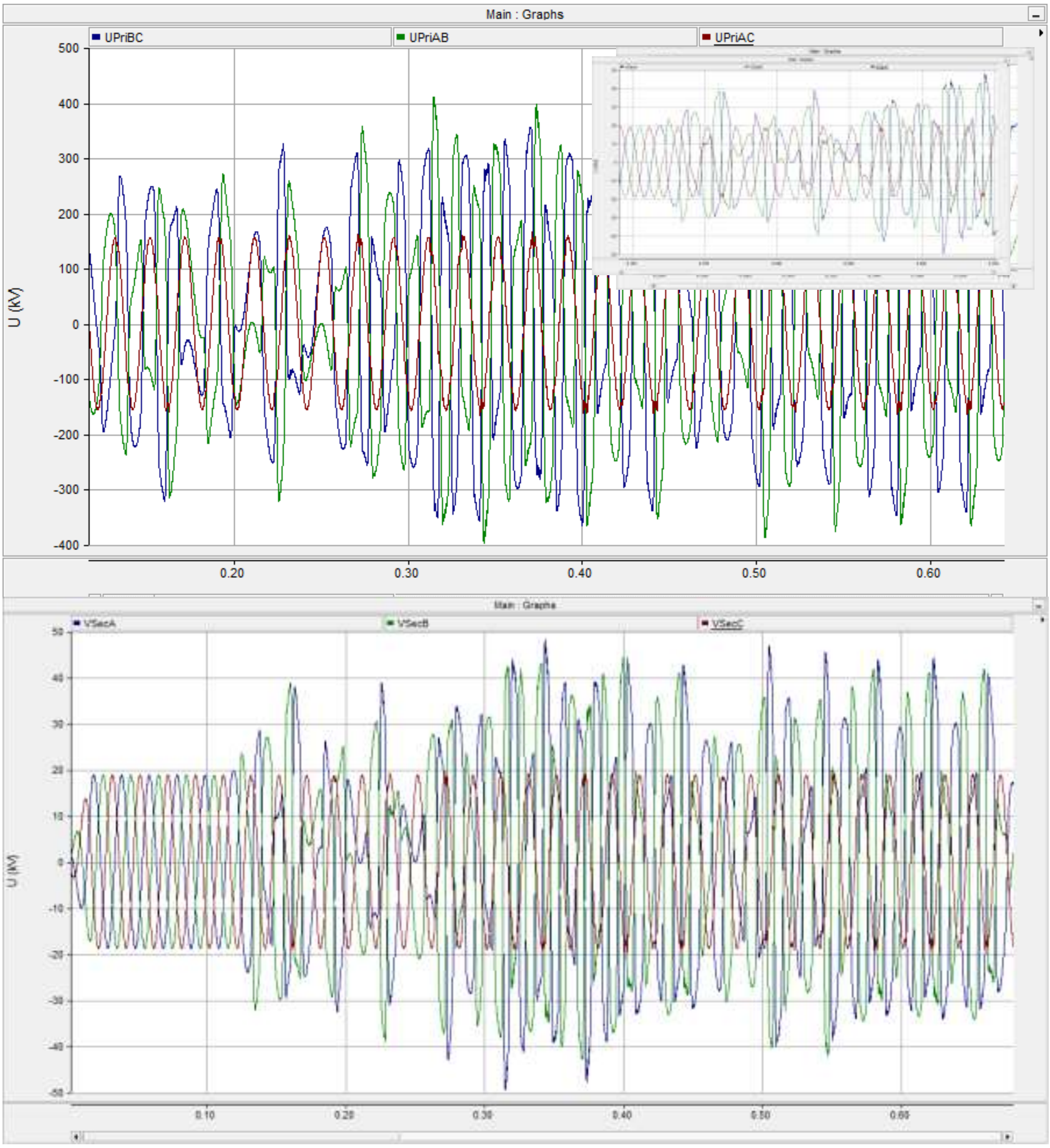
deformace průběhu proudu nelze tvrdit, že o stejnou hodnotu se zvýší i energie neboli účinek tohoto proudu. Na obr. 4.25 lze detailně vidět průběh proudu při ferorezonanci a jeho deformaci. Proudy všech fází jsou následně znázorněny na obr. 4.26.



Obr. 4.25 Deformace průběhu proudu způsobená nelinearitou indukčnosti.

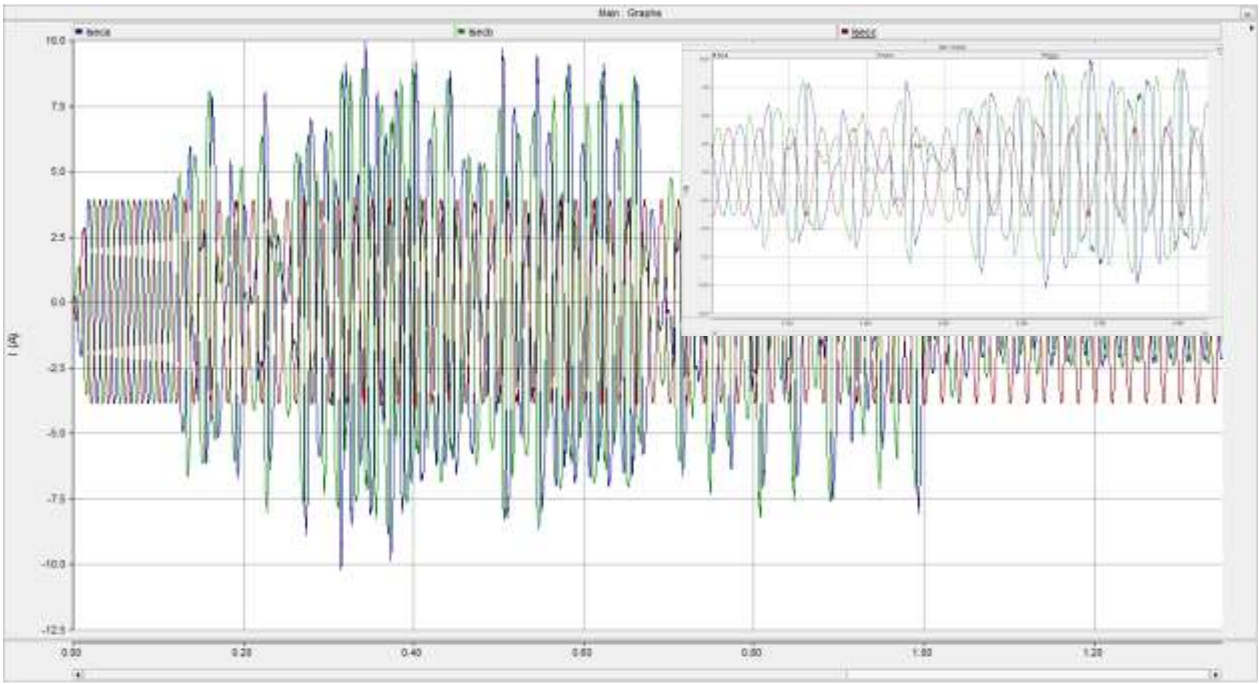


Obr. 4.26 Průběh proudů ve všech fázích na VVN straně(L1 – modrá,L2 – zelená, L3 – červená křivka)

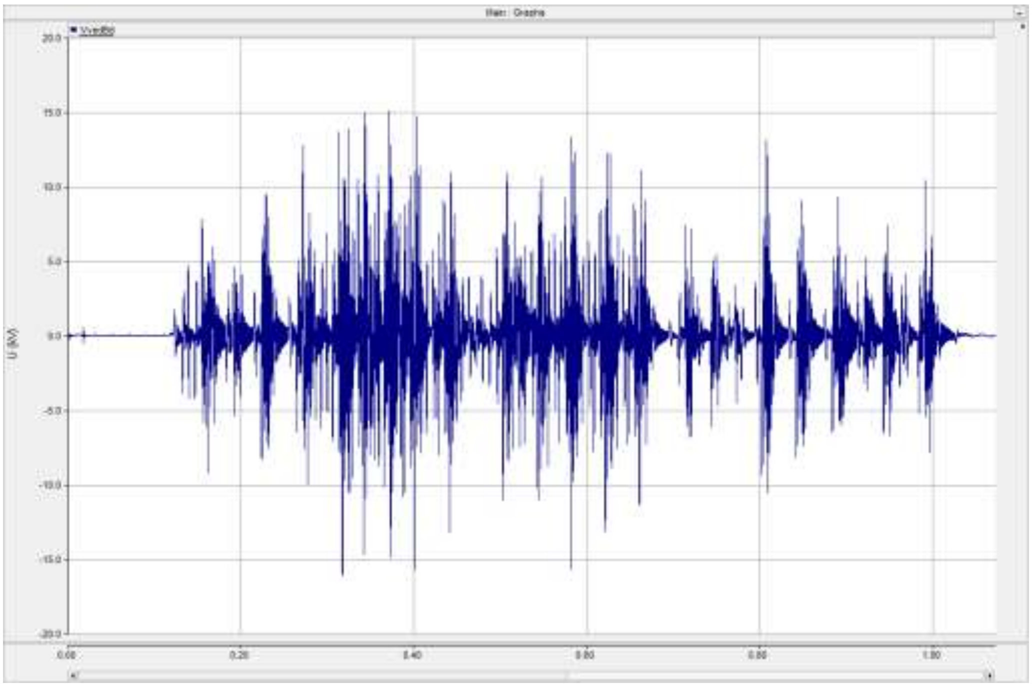


Obr. 4.27 Průběh sdružených napětí na primární straně (UPriBC – modrá, UPriAB – zelená, UpriAC – červená) a fázových napětí na sekundární straně transformátrou (VSecA – modrá, VSecB – zelená, VSecC – modrá) a jejích detailní zobrazení.

Na obr. 4.26 a obr. 4.27 jsou znázorněny průběhy ferorezonančního přepětí. Napětí, mezi fázemi A a C (L1 a L3) na VVN, je ferorzonancí ovlivněno nejméně. Je to způsobeno tím, že k vyvolání poruchy dochází rozpojením fáze B (L2). Na VVN straně dosahují maximální hodnoty sdruženého ferorezonančního přepětí až 2,6 násobek jmenovité hodnoty a na VN straně fázové napětí dosahuje taky 2,6 násobek jmenovité hodnoty. Obdobně pak lze posoudit změnu hodnot proudu na straně VN. Maximální hodnoty dosahují až 2,7 násobek jmenovitého proudu.



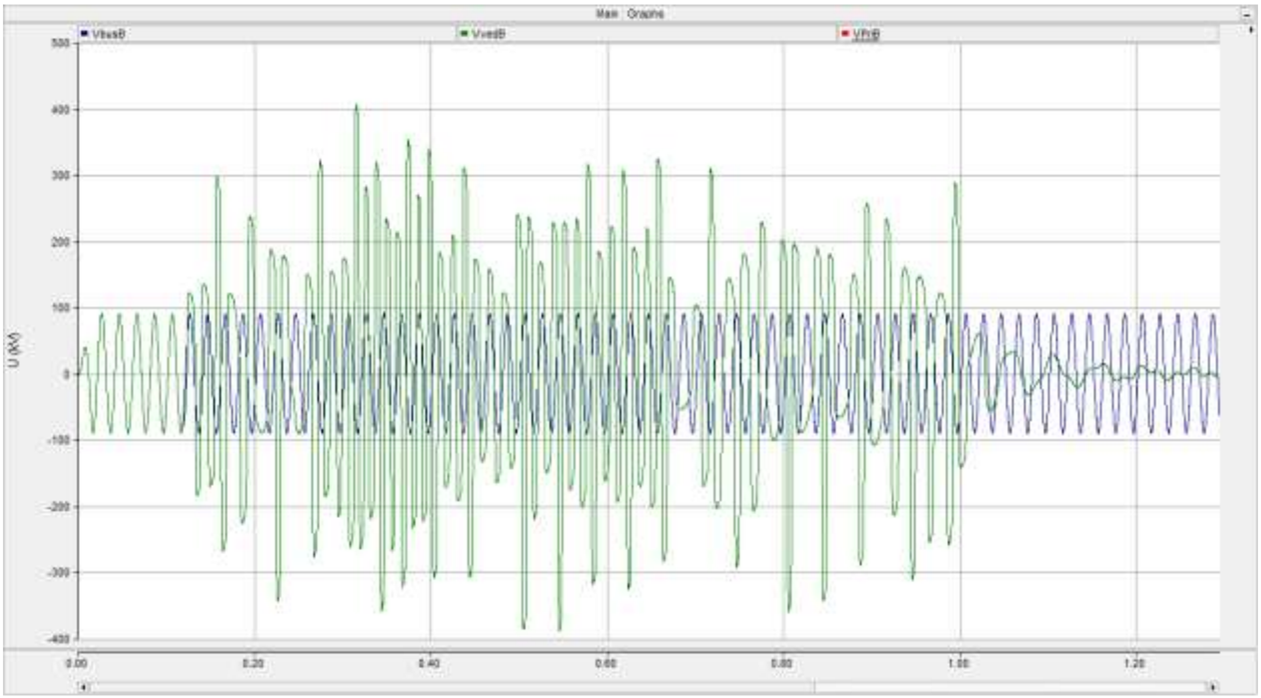
Obr. 4.28 Průběh proudů na VN straně a jejích detailní zobrazení (Iseca – modrá, Isecb – zelená, Isecc – červená)



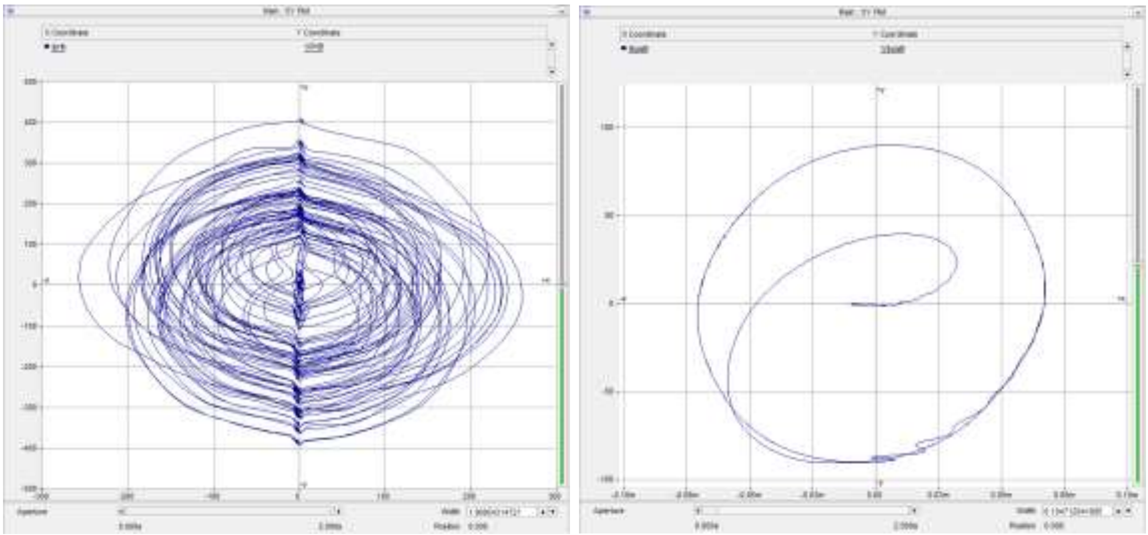
Obr. 4.29 Úbytek napětí na vedení 110 kV fáze B (L2)

Obr. 4.29 znázorňuje průběh úbytku napětí na vedení 110 kV na fázi B (L2). Vzhledem k tomu, že transformátor je téměř nezatížen, nevytvoří malý proud ve vedení za normálního stavu (do 0,1 s) velký úbytek napětí. V případě ferorezonance deformace proudu umožňují výrazné navýšení úbytku napětí v maximálních hodnotách až přes 15 kV, což představuje pouze 3,75 % z maximálních hodnot ferorezonančního přepětí na začátku vedení (obr. 4.30). Nízký úbytek

napětí na vedení je přitom jedna z počátečních podmínek pro vznik ferorezonance. Rezonanční oscilace nemohou být dostatečně tlumeny a proto se ferorezonance může rozvinout.

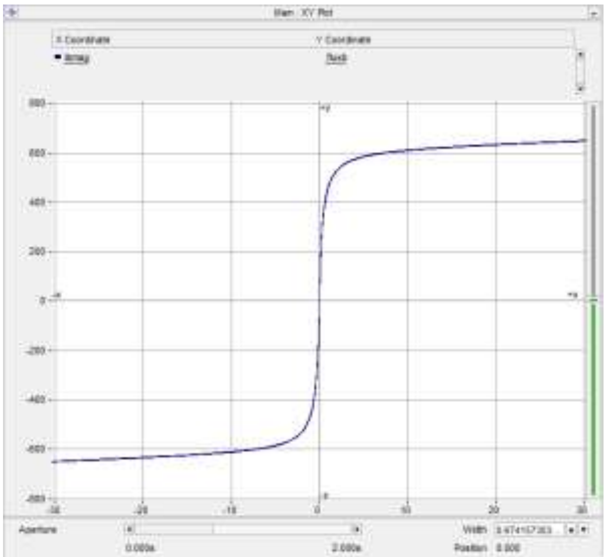


Obr. 4.30 Srovnání napětí zdroje(modrá) a napětí na začátku vedení(zelená)

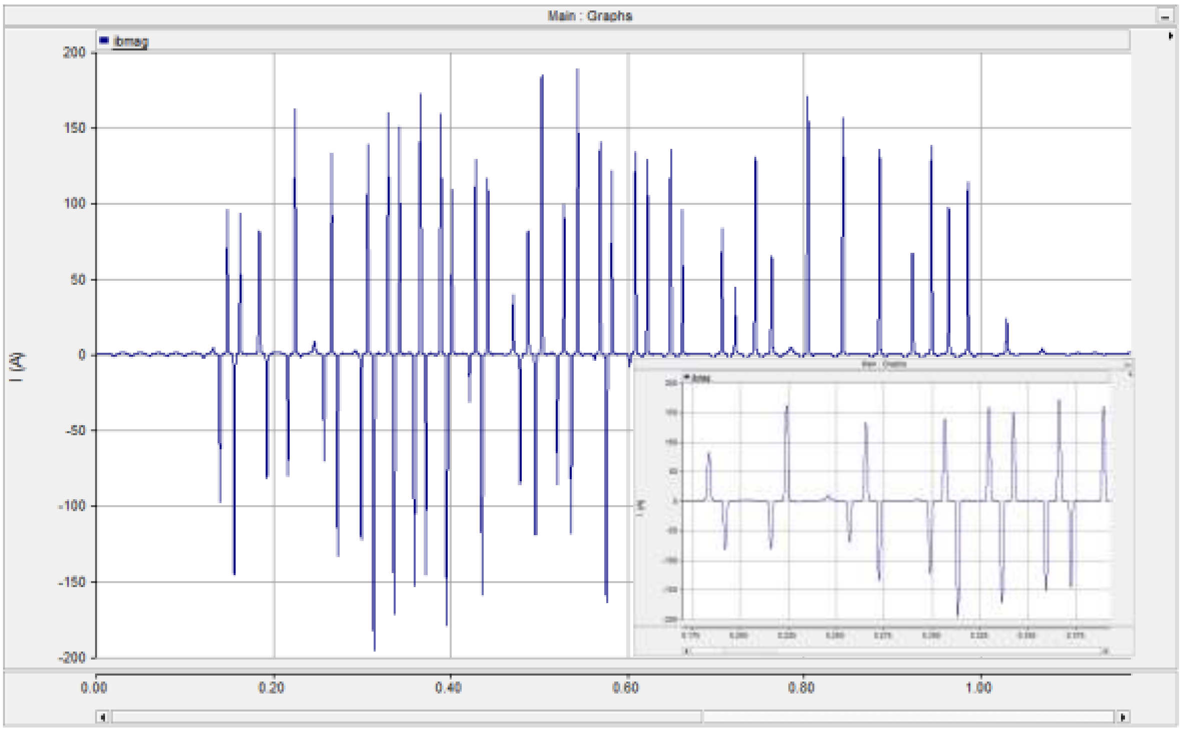


Obr. 4.31 Srovnání vývoje fázového prostoru při ferorezonančním jevu (vlevo) a bez ferorezonance (vpravo)

Pro kvalitativní posouzení dynamického systému lze použít mimo jiné i zobrazení fázového prostoru (obr. 4.31). 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. 4.31 je zobrazen fázový prostor při ferorezonančním jevu. Simulovaný případ ferorezonance je stabilní, pouze dochází k zvětšení fázového prostoru a jeho deformaci.

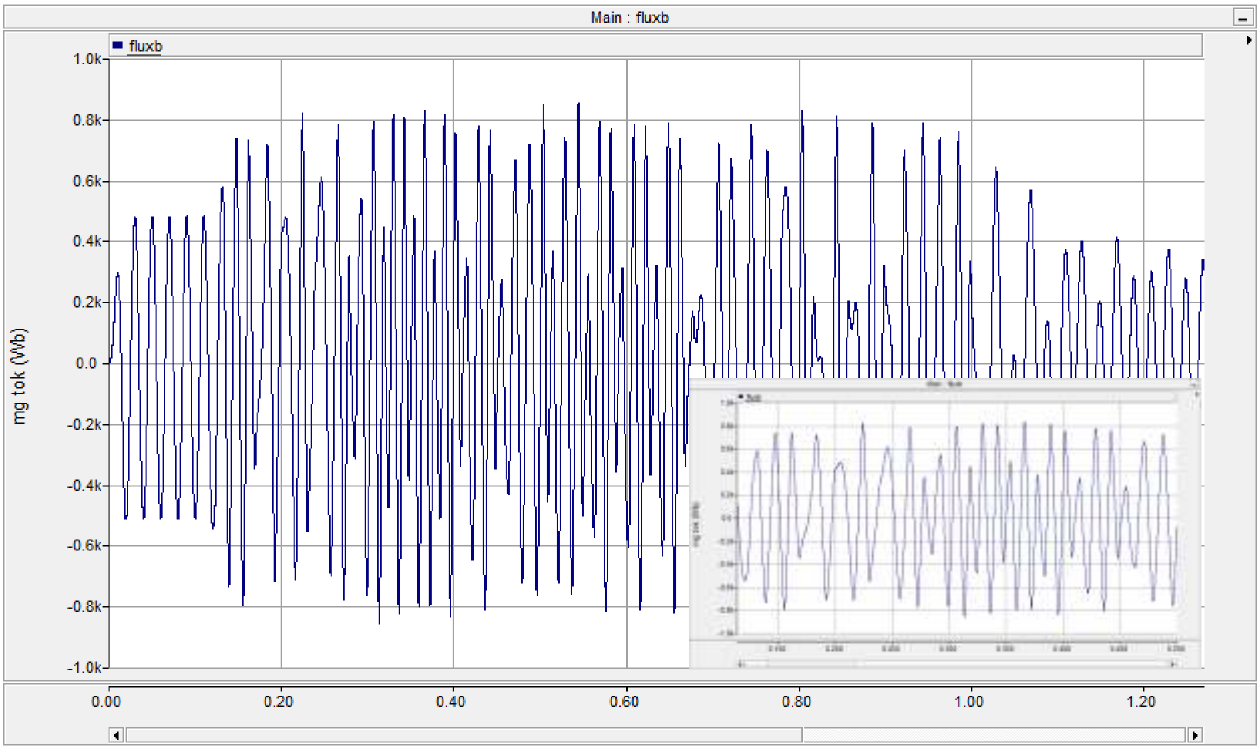


Obr. 4.32 Magnetizační charakteristika transformátoru

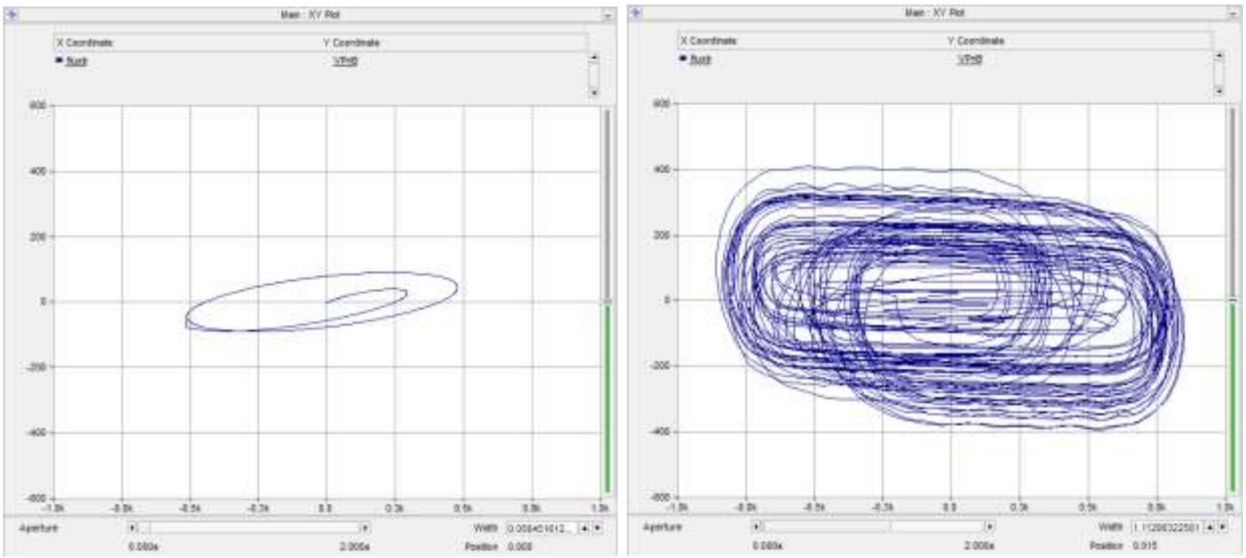


Obr. 4.33 Průběh magnetizačního proudu transformátoru

Tvar magnetizační charakteristiky je znázorněn na obrázku obr. 4.32. Její tvar má za následek deformaci magnetizačního proudu (obr. 4.33). Na obrázku je zřetelně vidět nárůst magnetizační charakteristiky při ferorezonanci.



Obr. 4.34 Průběh magnetického toku vztaženého k primárnímu vinutí



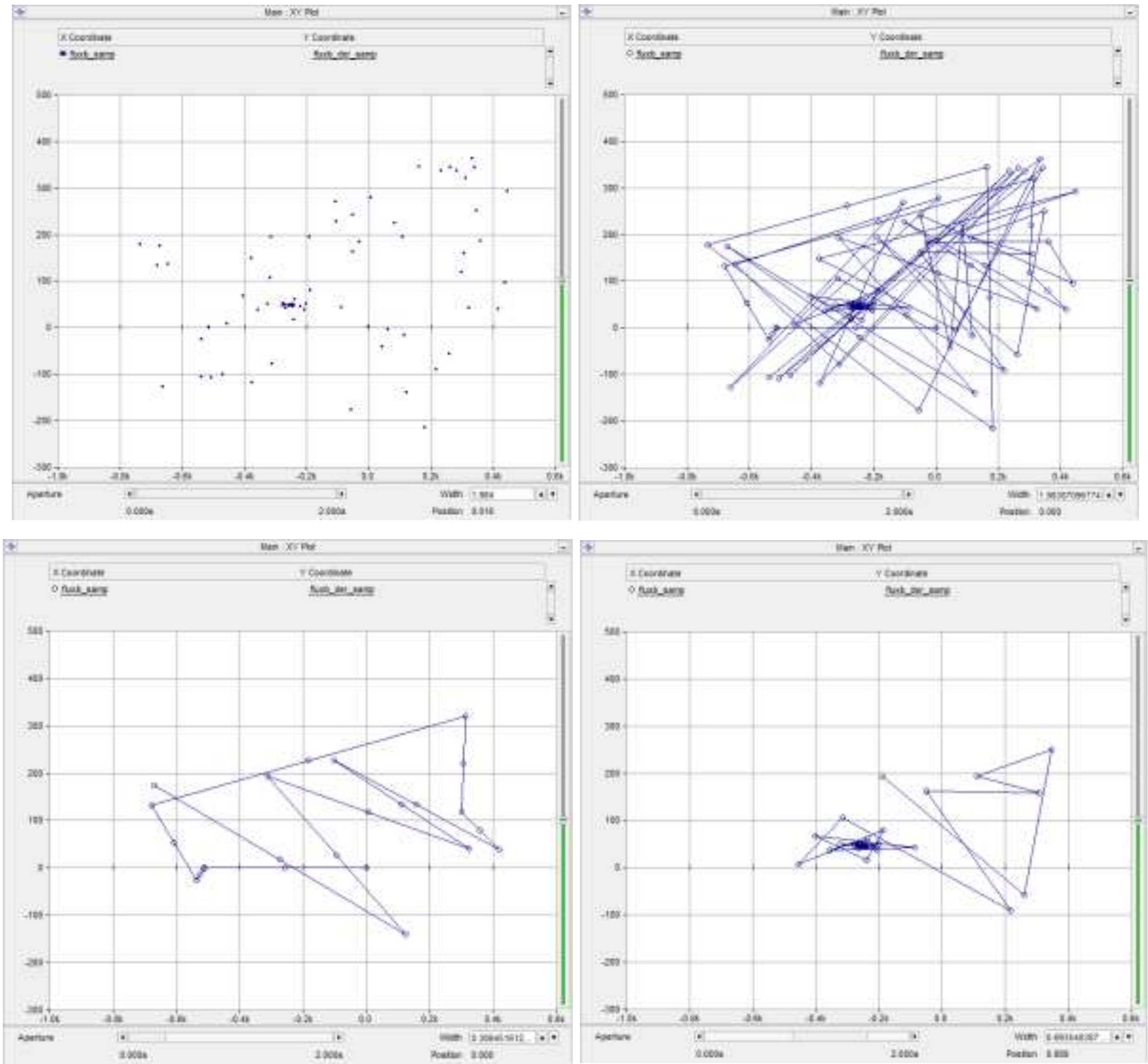
Obr. 4.35 Zobrazení vývoje fázového prostoru bez ferorezonance (vlevo) a s ferorezonancí (vpravo)

Nelinearita způsobená saturací se samozřejmně projeví i na magnetickém toku v jádru transformátoru (obr. 4.34). Podobně jako u fázového prostoru (závislost napětí a proudu) lze znázornit i závislost magnetického toku na napětí (obr. 4.35). Pro sinusový průběh magnetického toku má fázový prostor tvar elipsy, jak je vidět na obrázku vlevo. Ferorezonance fázový prostor deformuje a po odeznění ferorezonančních socilací 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.

4.36. První obrázek vlevo nahoře znázorňuje celkové zobrazení průběhu simulace (od 0 do 2 s). Následně obrázek vpravo znázorňuje jeho postupný vývoj. Obrázek vlevo dole znázorňuje počáteční fázi ferorezonance a vývoj poincarého zobrazení (v intervalu od 0 do 0,3 s) a konečně obrázek vpravo dole ustálení ferorezonance (v intervalu od 0,9 do 1,6 s).

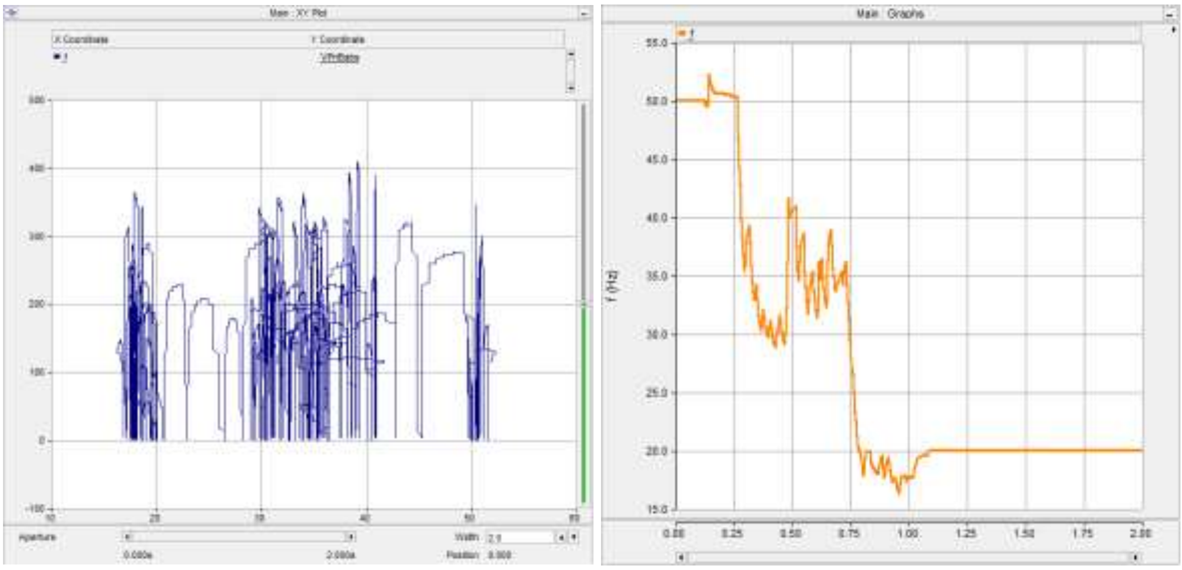
Z poinacarého zobrazení lze usoudit, že se jedná o kvaziperiodické až chaotické oscilace následně utlumené do nového stabilního stavu. Jejich rozkmit má strmý nárůst (do 2 period) a útlum je pozvolnější (8 period).



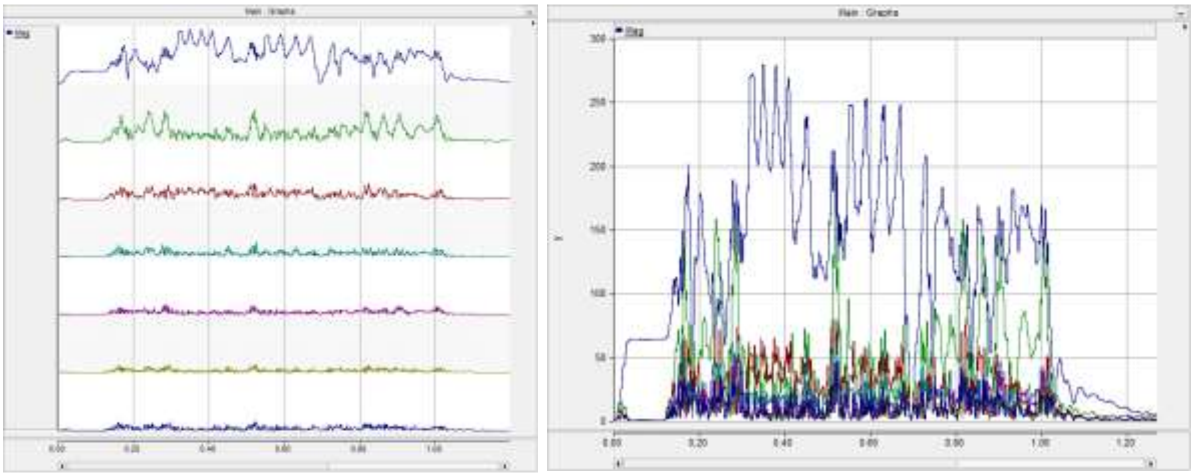
Obr. 4.36 Poincaré zobrazení

Vzhledem k přítomnosti subharmonických a kvaziperiodických oscilací, je vhodné zobrazit i vývoj frekvence ferorezonančního přepětí (obr. 4.37). Na obrázku vlevo je zobrazena závislost amplitudy napětí na frekvenci. Z této závislosti je patrné, že největší oscilace mají frekvenci mezi 30 až 40 Hz a pod 20 Hz. Časový vývoj frekvence je znázorněn na obrázku vpravo. 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. 4.38

znázorňuje průběh prvních 7 harmonických a to obrázek vlevo samostatně (seřazené postupně se zhora směrem dolů)a obrázek vpravo současně pro názornější srovnání amplitud.



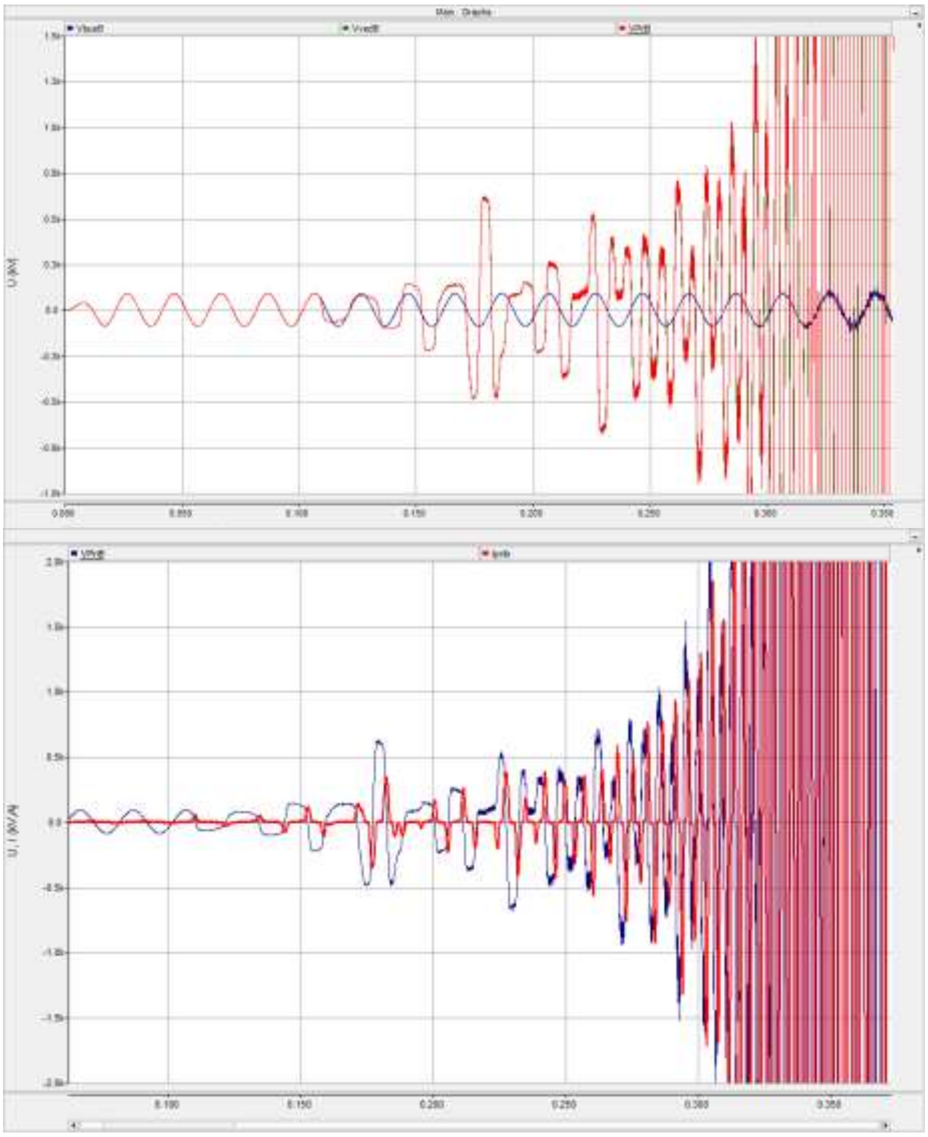
Obr. 4.37 Vývoj frekvence napětí při ferorezonanci



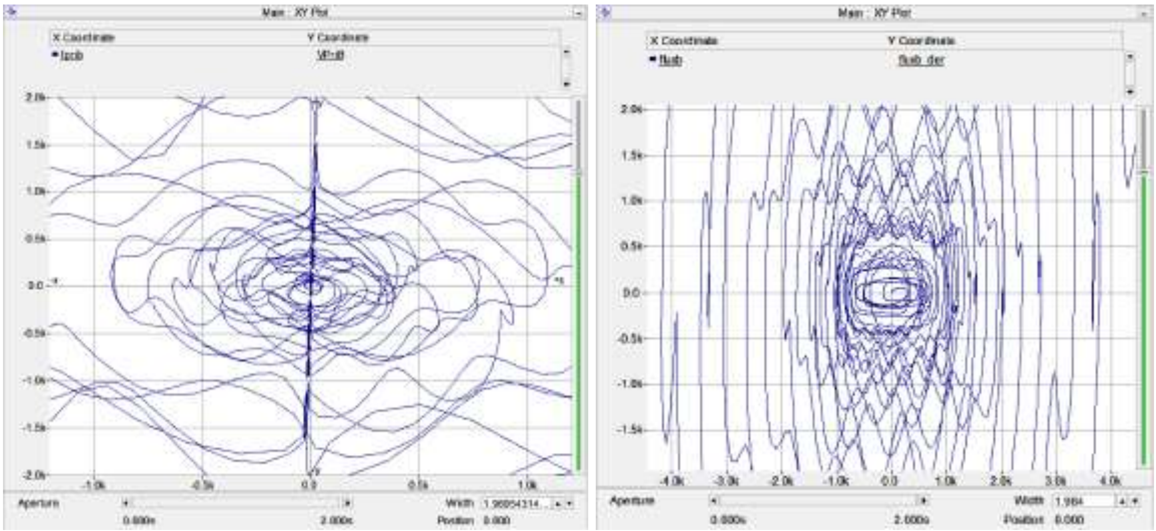
Obr. 4.38 Průběh prvních 7 harmonických při ferorezonanci

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.

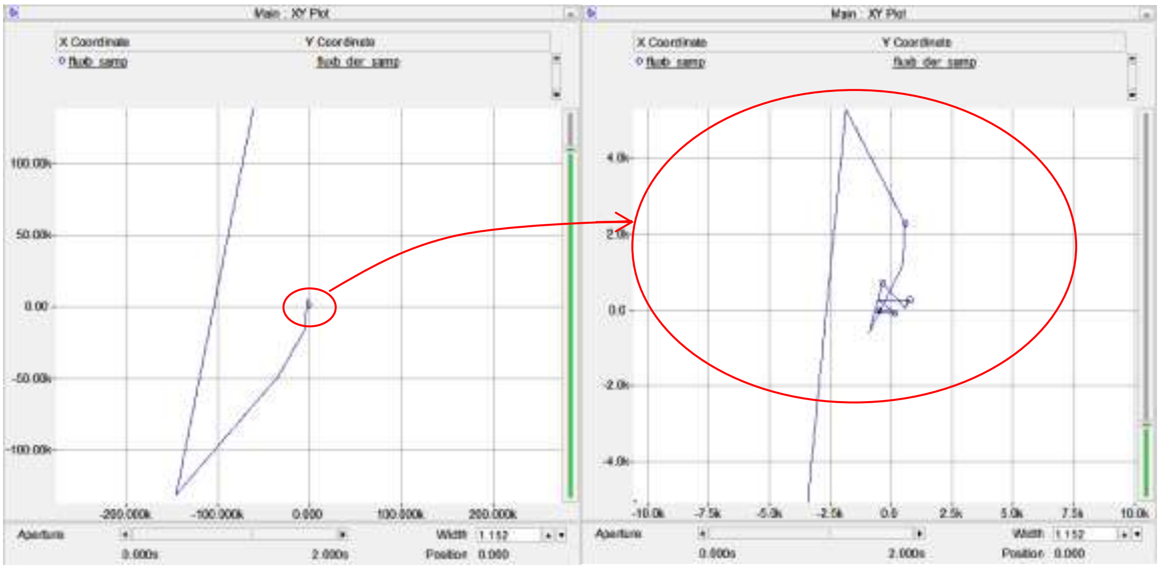
Parametry sítě zůstávají stejné. Pouze v čase 0,1 s trvání simulace dojde k rozpojení fází A a B (L1 a L2). Dle průběhů napětí a proudu (obr. 4.39) lze usoudit, že nárůst amplitud je exponenciální po uplynutí 0,15 s od rozepnutí fází. Obr. 4.40 znázorňuje vývoj fázového prostoru. V případě závislosti proudu a fázového napětí na VVN straně ve fázi B (L2), i v případě závislosti magnetického toku a jeho derivace, je vidět nárůst oscilace a vývoj při netlumení ferorezonance. Prostor není zobrazen celý z důvodu exponenciálního nárůstu. Poincarého zobrazení na obr. 4.41 nejlépe znázorňuje vývoj ferorezonance. Vývoj frekvence je znázorněn na obr. 4.42. Ta při neodpojení obvodu osciluje kolem hodnoty 400 Hz.



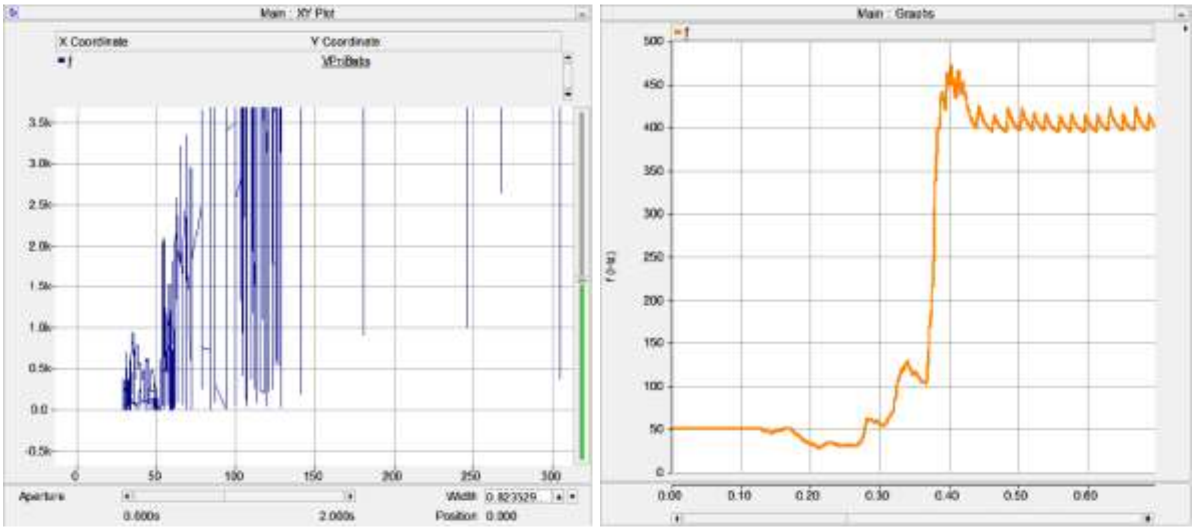
Obr. 4.39 Časový vývoj napětí a proudu při ferorezoanci



Obr. 4.40 Vývoj fázového prostoru při netlumené ferorezonanci



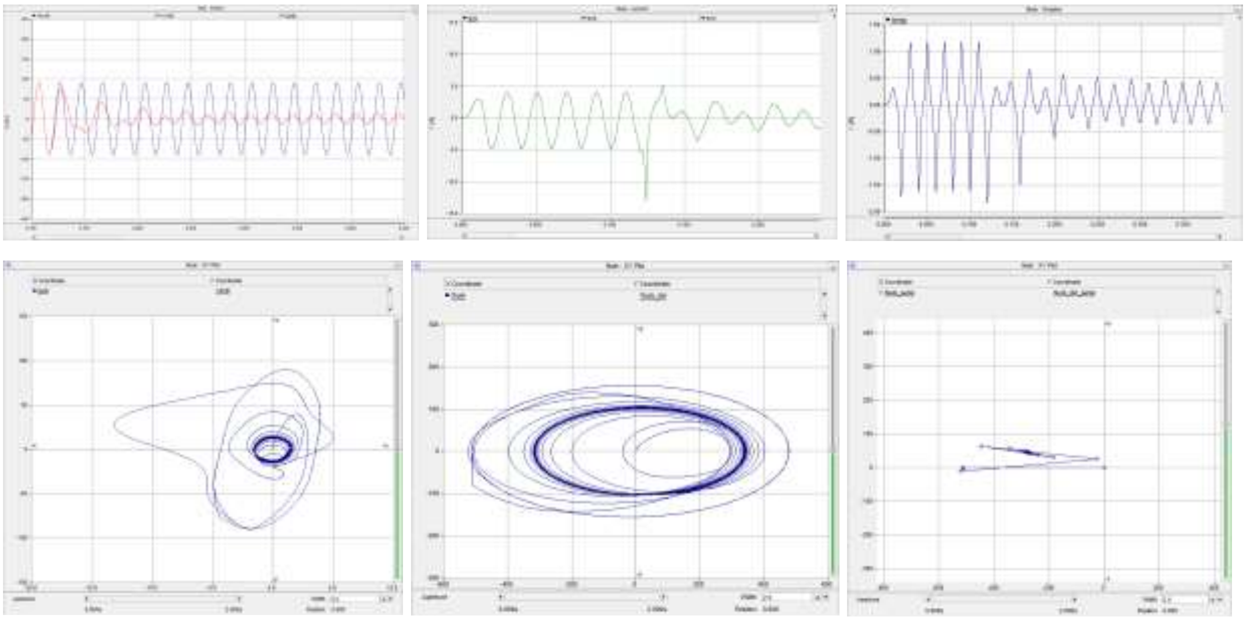
Obr. 4.41 Časový vývoj poinceréno zobrazení



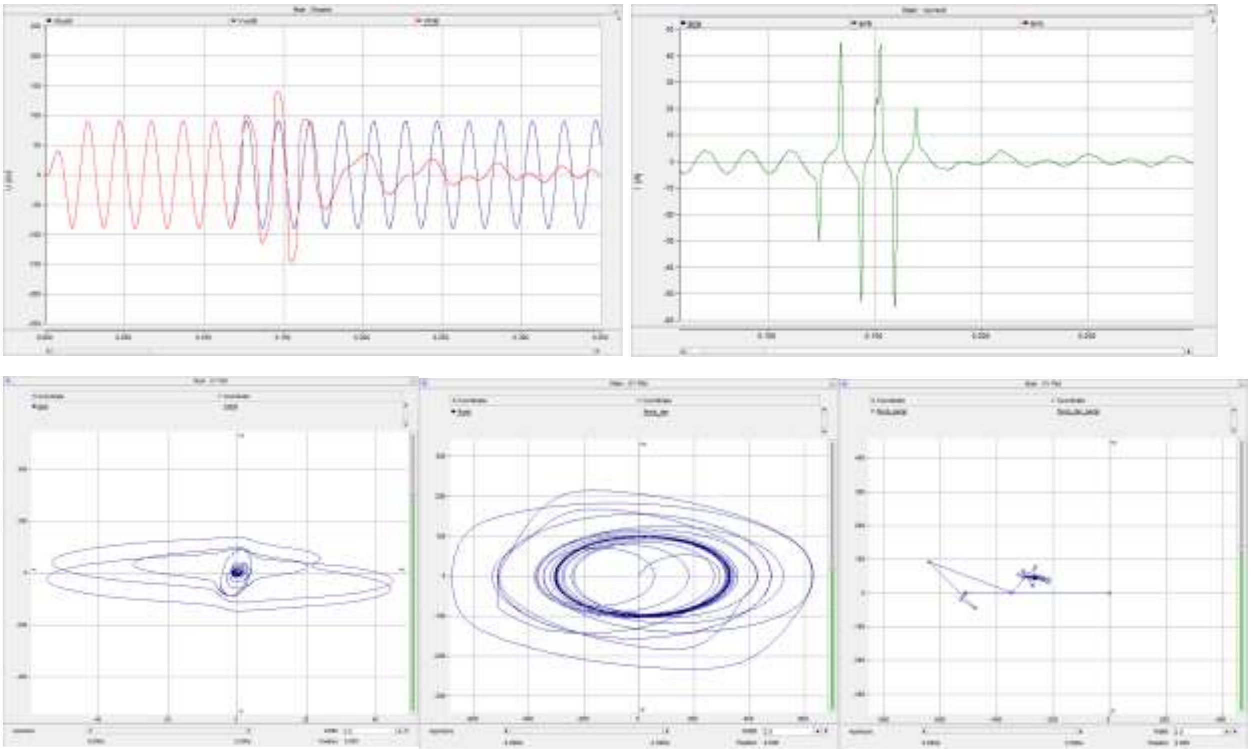
Obr. 4.42 Frekvenční charakteristika napětí a vivin rezonančních oscilací v závislosti na frekvenci

Další analýza ferorezonančního obvodu bude provedena z pohledu vlivu parametrů elektrické sítě na vznik a vývoj ferorezonančního jevu. Elektrické vedení a jeho parametry lze z pohledu ferorezonance vnímat ve dvou rovinách. První je rezistivita vedení, která závisí na materiálu, průřezu a délce vedení. Tento parametr se projevuje formou útlumu ferorezonančních oscilací. Teoreticky tedy při daném vedení má jeho délka vliv na schopnost systému samostatně tlumit ferorezonanci. Další rovinou je reaktance vedení, ve které je zahrnuta jak induktivní tak kapacitní složka. Induktivní, stejně jako rezistivita, působí útlum. Kapacita vedení se za určitých počátečních podmínek může dostat do rezonance s nelineární indukčností transformátoru. V případě neuvažování kapacity by platila úměra, že čím delší vedení, tím větší útlum a nižší pravděpodobnosti vzniku ferorezonance. Z důvodu kapacity vedení se ale za určitých podmínek může vyskytnout stav, kdy i při delším vedení dojde k výraznějším ferorezonančním oscilacím, než u kratšího vedení.

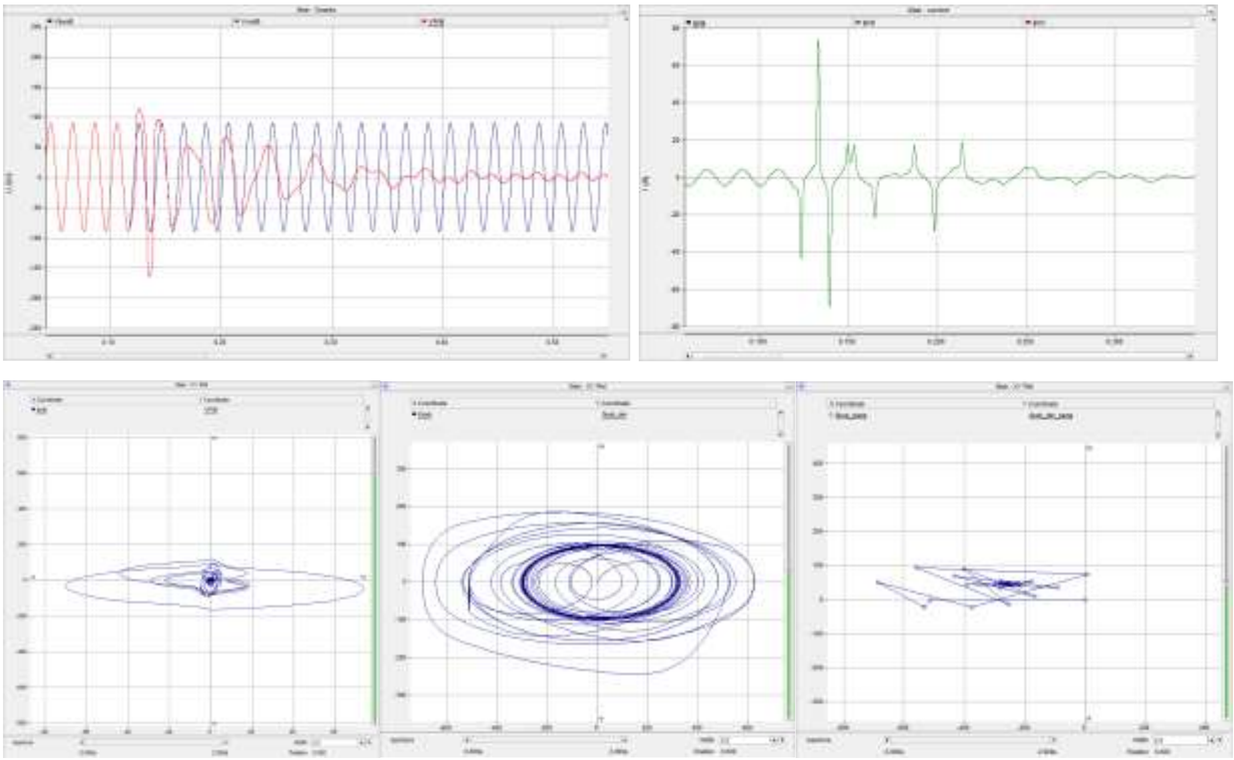
Tato situace byla nasimulována a zobrazena pro různé délky vedení na Obr. 4.43 až Obr. 4.49. U každého obrázku jsou znázorněny časové průběhy napětí (červená křivka) a proudu (zelená křivka) na straně VVN a dále zobrazení fázového prostoru a poincarého zobrazení pro analýzu časového vývoje ferorezonančního jevu. Fázový prostor *U, I* je na obrázcích vlevo, fázový prostor ϕ', ϕ je uprostřed a poincarého zobrazení vpravo.



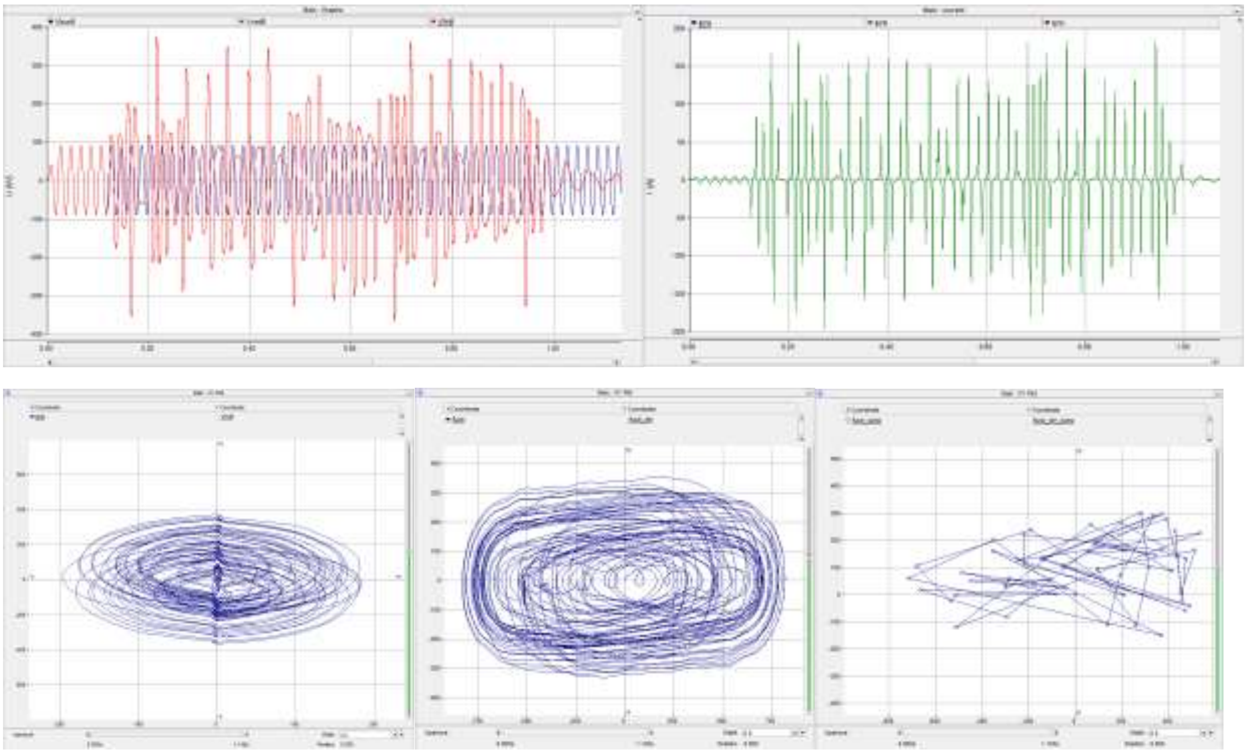
Obr. 4.43 Délka vedení 10 km



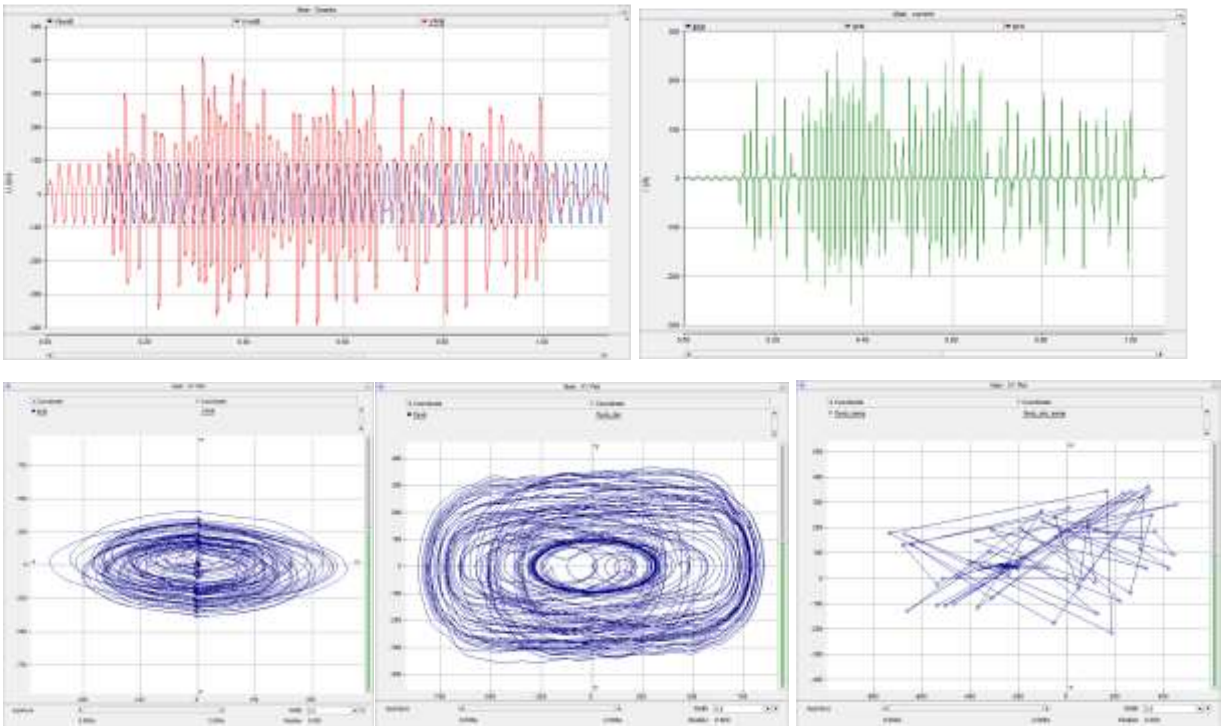
Obr. 4.44 Délka vedení 20 km



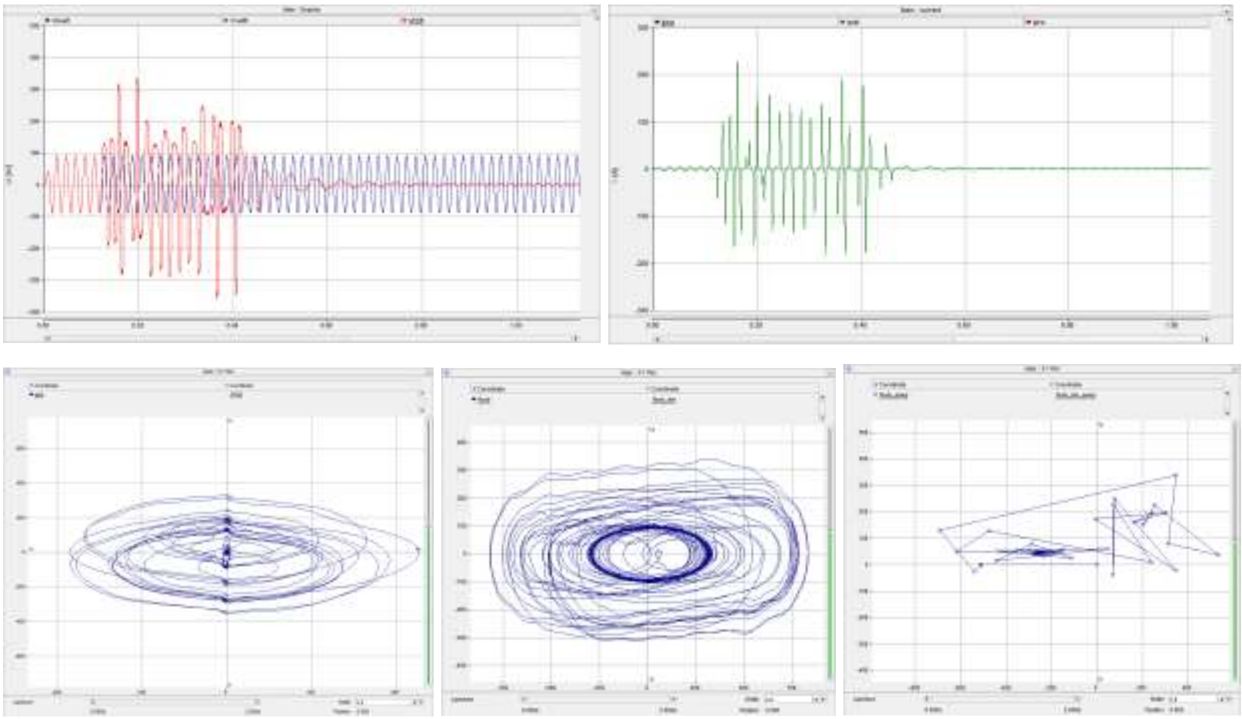
Obr. 4.45 Délka vedení 30 km



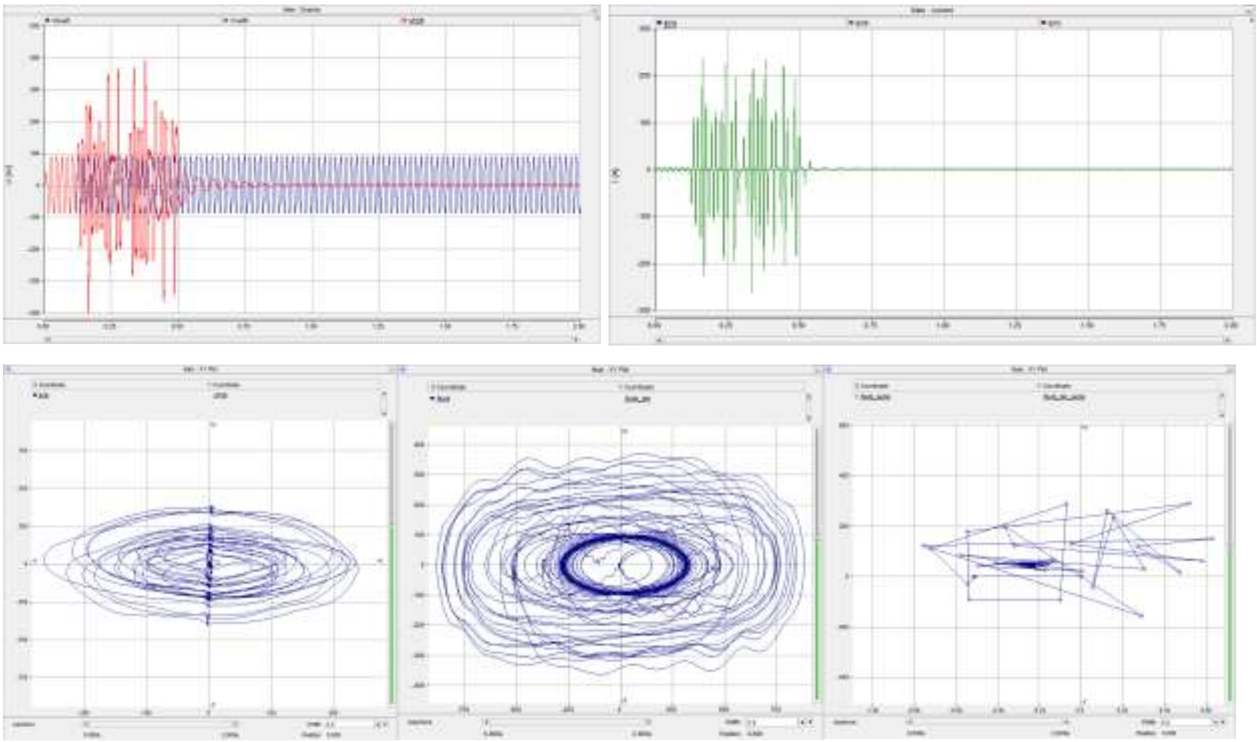
Obr. 4.46 Délka vedení 35 km



Obr. 4.47 Délka vedení 40 km



Obr. 4.48 Délka vedení 50 km

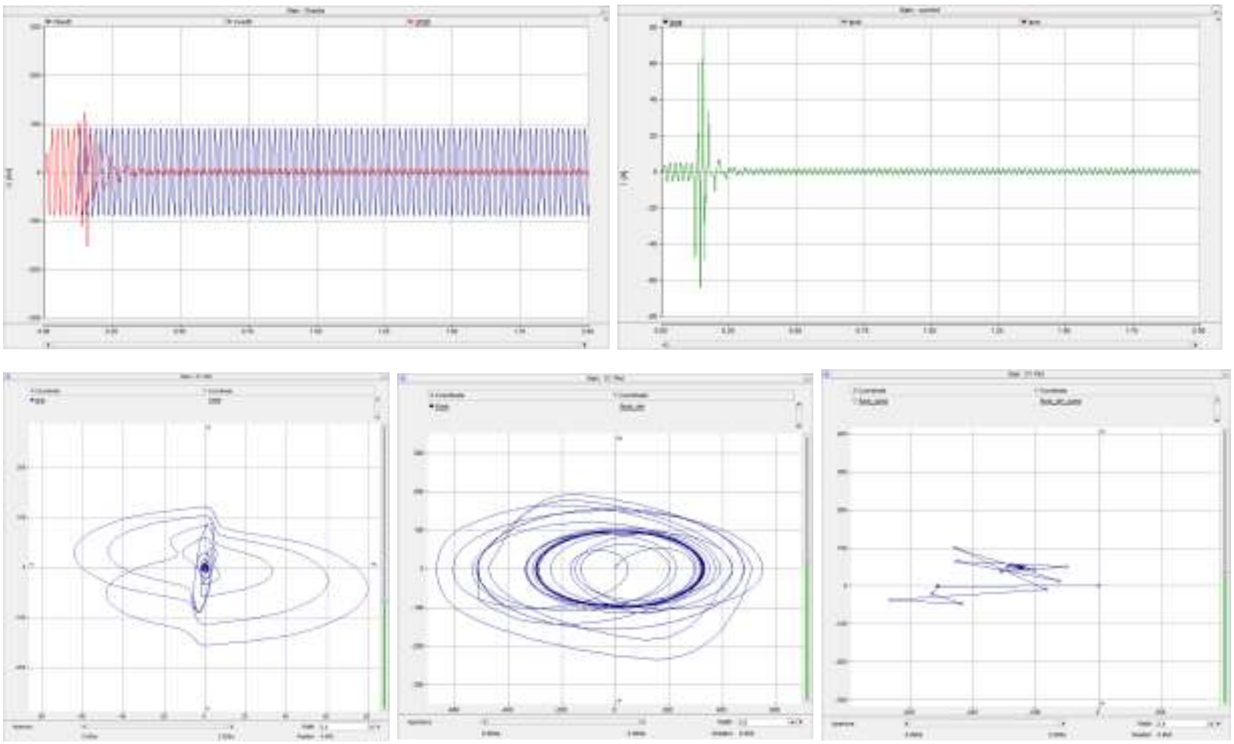


Obr. 4.49 Délka vedení 60 km

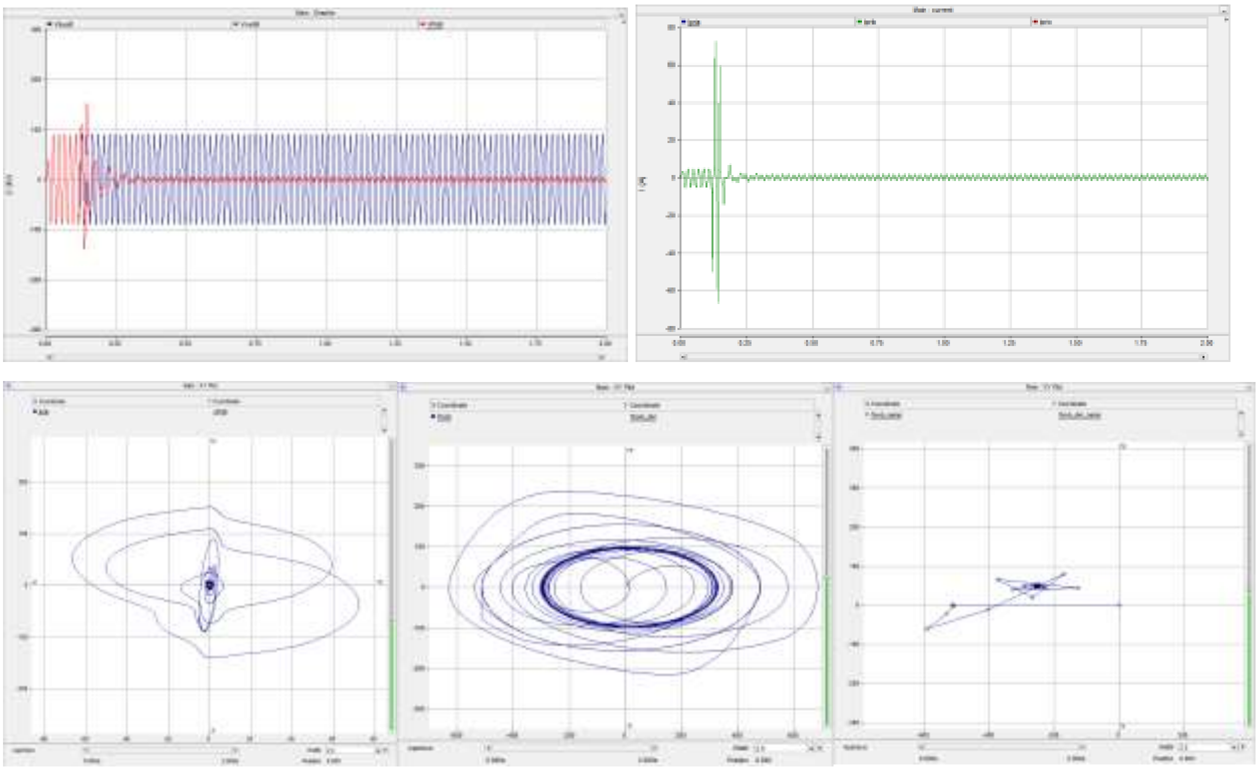
V uvedených obrázcích je znázorněn vývoj ferorezonance v závislosti na délce vedení. U kabelových vedení je tento jev ještě výraznější z důvodu jejich vyšší kapacity. V uvedené situaci počítá model s venkovním vedením 110 kV, které většinou dosahují několik desítek kilometrů. Proto z praktického hlediska není nutné analyzovat systém s delším vedením než 60 km. I když všechny uvedené situace více nebo méně vykazují přítomnost ferorezonančních oscilací, lze usoudit, že nejvýraznější je tento jev při 35 km a 40 km délce vedení. U kratších vedení se v tomto případě dostatečně neprojevila kapacita vedení a nedošlo k rezonančnímu rozkmitu. U delších vedení dochází vlivem rezistance k částečnému útlumu.

Dále bude uvedena situace, kdy dochází k postupnému snižování zátěže na sekundárním obvodu transformátoru. Zatížení transformátoru v uvedené konfiguraci, dle řady studií, má největší vliv na vznik ferorezonance. V případě jmenovité zátěže dochází k rychlému útlumu a ferorezonance se neprojeví. Kritická situace ale nastane v případě výrazného odlehčení transformátoru, kde výkon zátěže klesne přibližně pod 1 % jmenovitého výkonu transformátoru, co je typické pro postupné najíždění sítě po blackoutu. Takto malá zátěž již nedokáže tlumit ferorezonanční oscilace a dochází k výraznému navýšení amplitud napětí a proudů. V případě dalšího snižování zátěže transformátoru může dojít až k nekontrolovatelné-mu nárůstu oscilací a následně destrukci prvků elektrické sítě. Tato situace je znázorněná na obr. 4.50 až obr. 4.54.

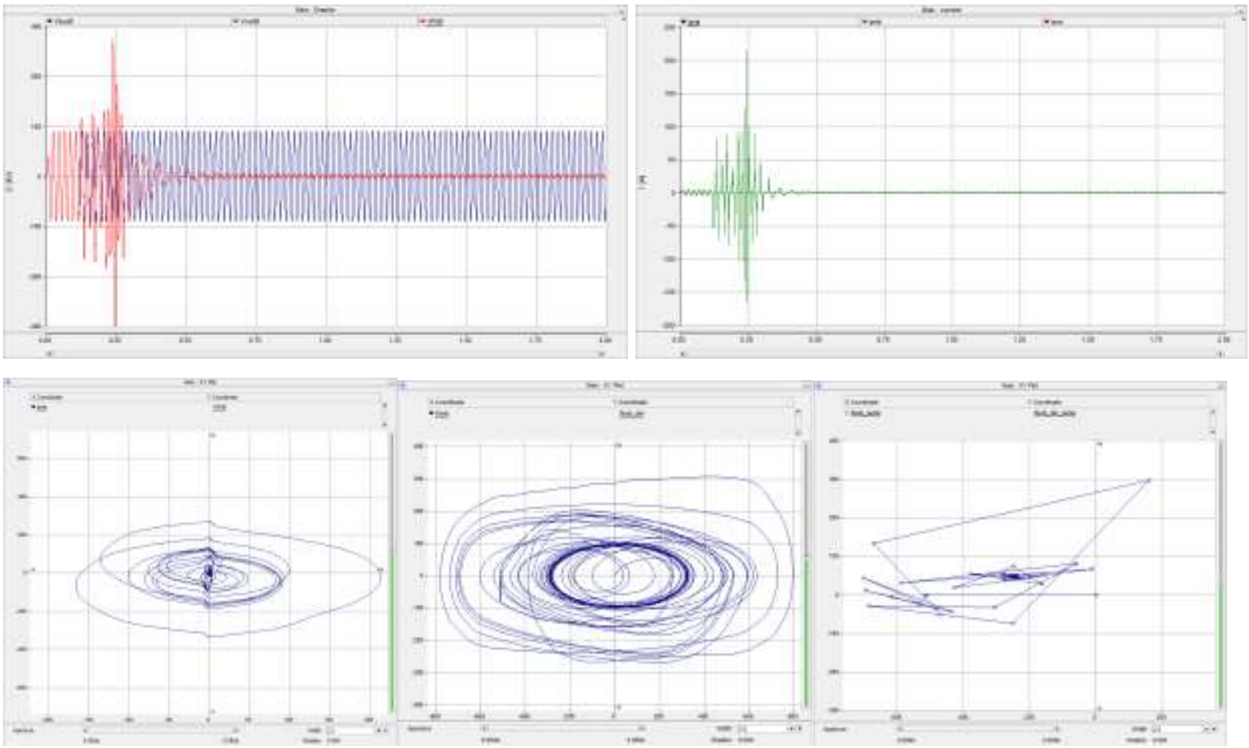
U každého obrázku jsou znázorněny časové průběhy napětí (červená křivka) a proudu (zelená křivka) na straně VVN a dále zobrazení fázového prostoru a poincarého zobrazení pro analýzu časového vývoje ferorezonančního jevu. Fázový prostor *U, I* je na obrázcích vlevo, fázový prostor ϕ',ϕ je uprostřed a poincarého zobrazení vpravo.



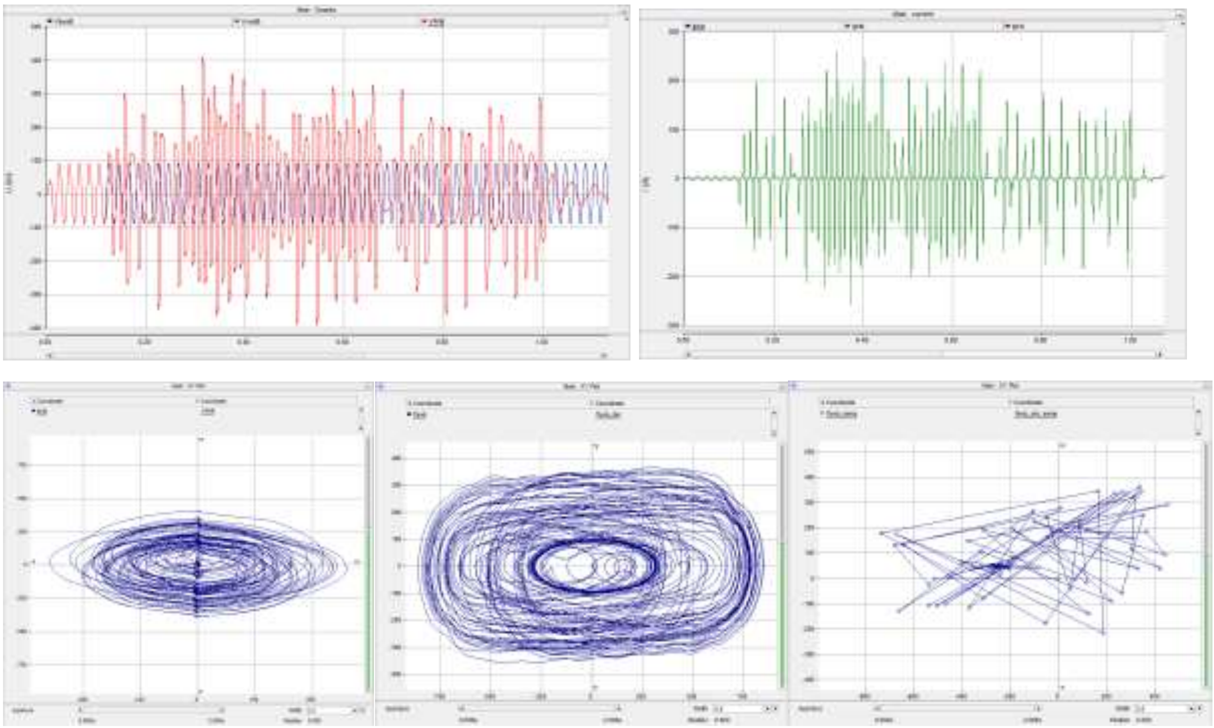
Obr. 4.50 Zatížení transformátoru 0,25 MW



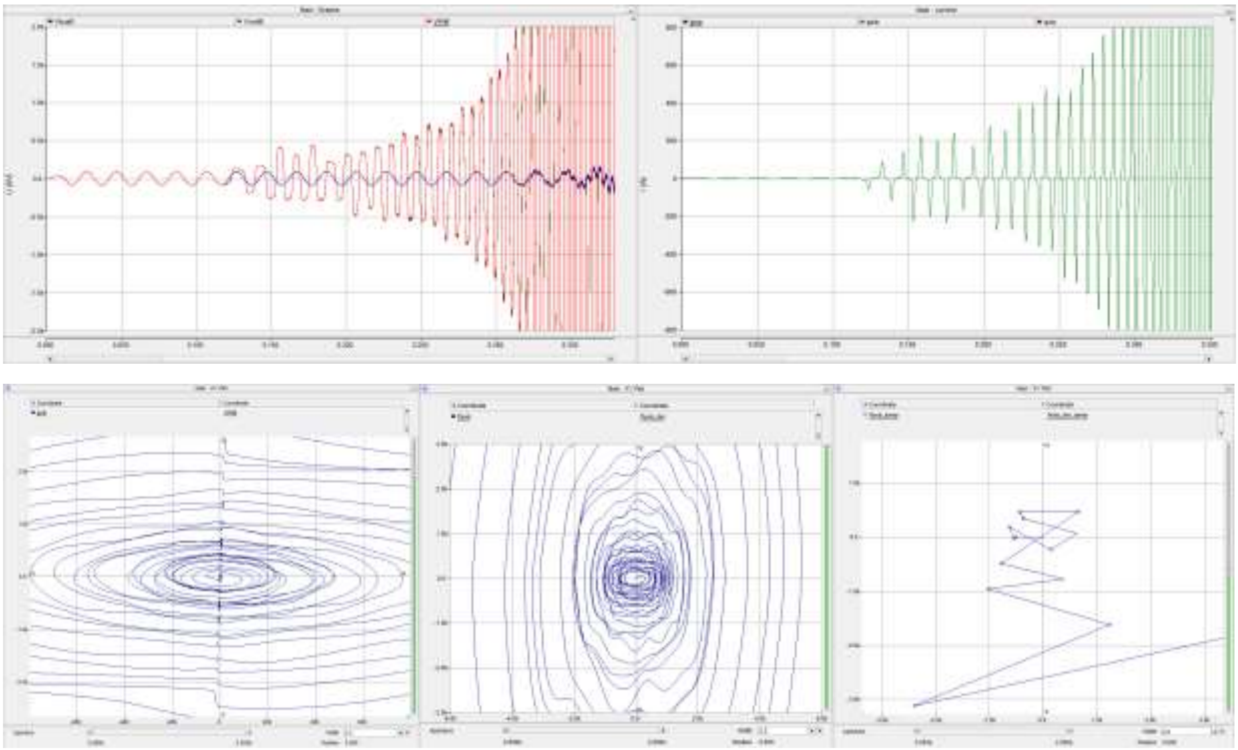
Obr. 4.51 Zatížení transformátoru 0,2 MW



Obr. 4.52 Zatížení transformátoru 0,15 MW



Obr. 4.53 Zatížení transformátoru 0,1 MW



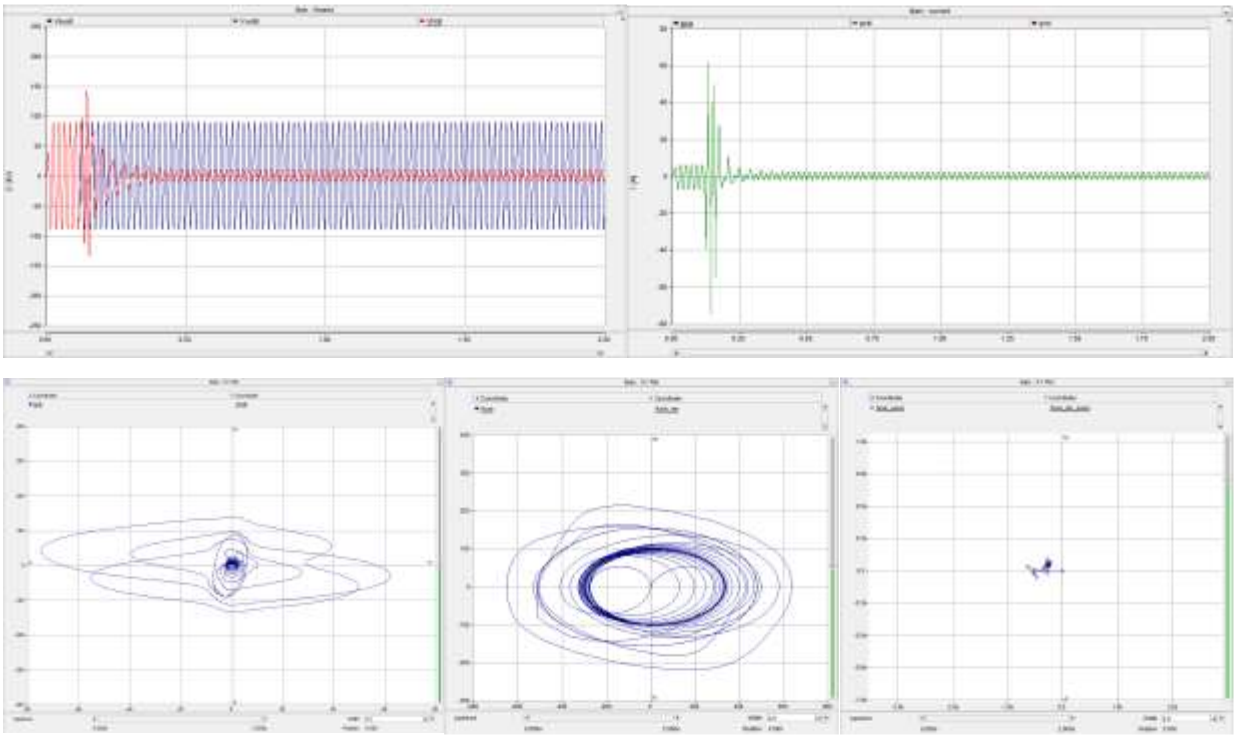
Obr. 4.54 Zatížení transformátoru 0,05 MW

V případě posledního obrázku (obr. 4.54) je vidět exponenciální nárůst napětí a proudu. To, že systém ztratil stabilitu, je patrné i z poincarého zobrazení. Z výsledků simulací lze usoudit, že čím je zátěž nižší, tím se jev ferorezonance více uplatňuje, až může dojít k „neomezenému“ nárůstu napětí a proudu.

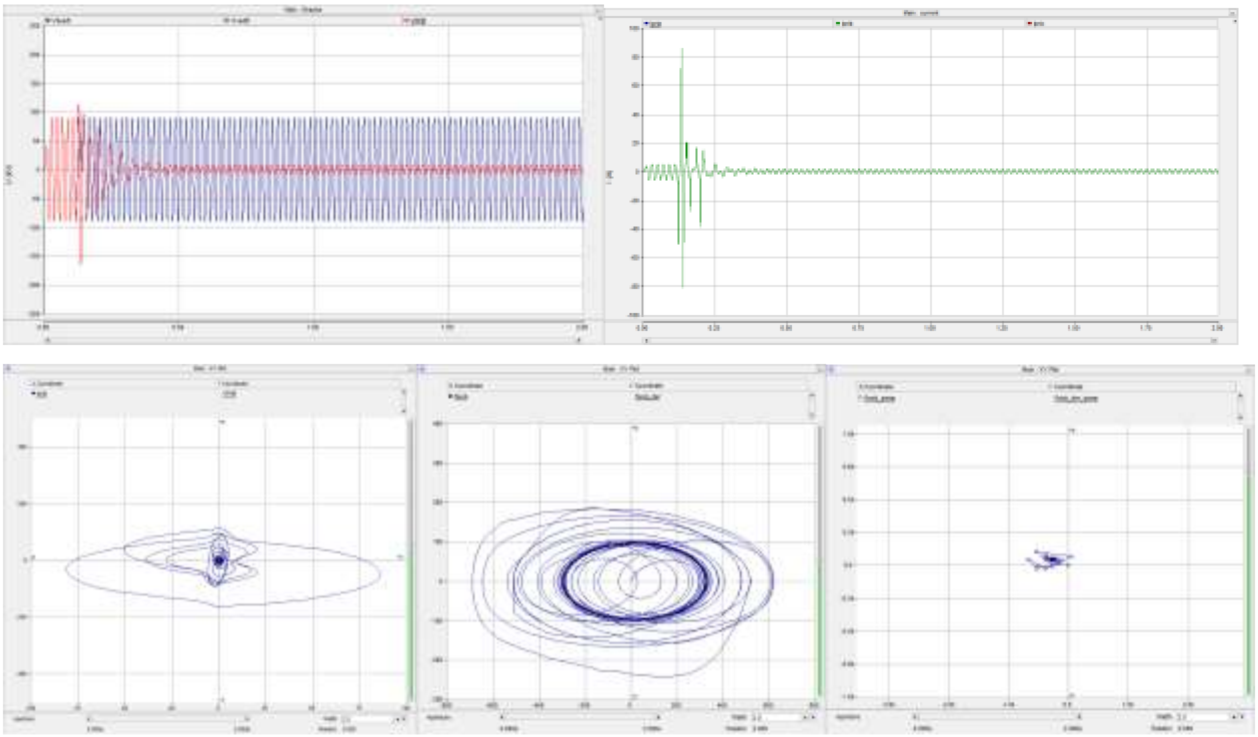
Další série obrázků (obr. 4.55 až obr. 4.61) znázorňuje vývoj ferorezonance při změně výkonu transformátoru. I když některé simulace jsou zobrazeny pro výkony transformátorů, které nejsou v jejich jmenovité řadě, tak zobrazení umožňují pohled na závislost výkonu transformátorů na výskytu ferorezonančního jevu. Ve všech případech zátěž zůstává konstantní (0,1 MW) a mění se výkon transformátoru od 25 MVA do 10 MVA. Při uvedené změně výkonů bude zátěž představovat 0,4 % až 1 % z výkonu transformátoru.

Teoreticky by se dalo očekávat, že čím nižší bude zátěž v poměru s výkonem transformátoru, tím menší bude schopnost účinně utlumit ferorezonanci. Z níže uvedených průběhu je patrné, že v případě transformátoru s vyšším výkonem (u dané konstantní konfigurace), jsou rezonanční oscilace nižší jako u transformátoru s nižším výkonem, přičemž zátěž zůstává stejná a mění se pouze poměr výkonu zátěže a výkonu transformátoru. V tomto případě nedochází k výraznému jevu rezonance s kapacitou vedení, a proto i velmi malé zatížení transformátoru dokáže rezonanci utlumit. V případě dalšího snižování výkonu transformátoru vznikají silnější rezonanční oscilace, až do okamžiku, kdy zátěž bude v poměru k výkonu transformátoru dostatečně velká, aby účinně utlumila ferorezonanční oscilace.

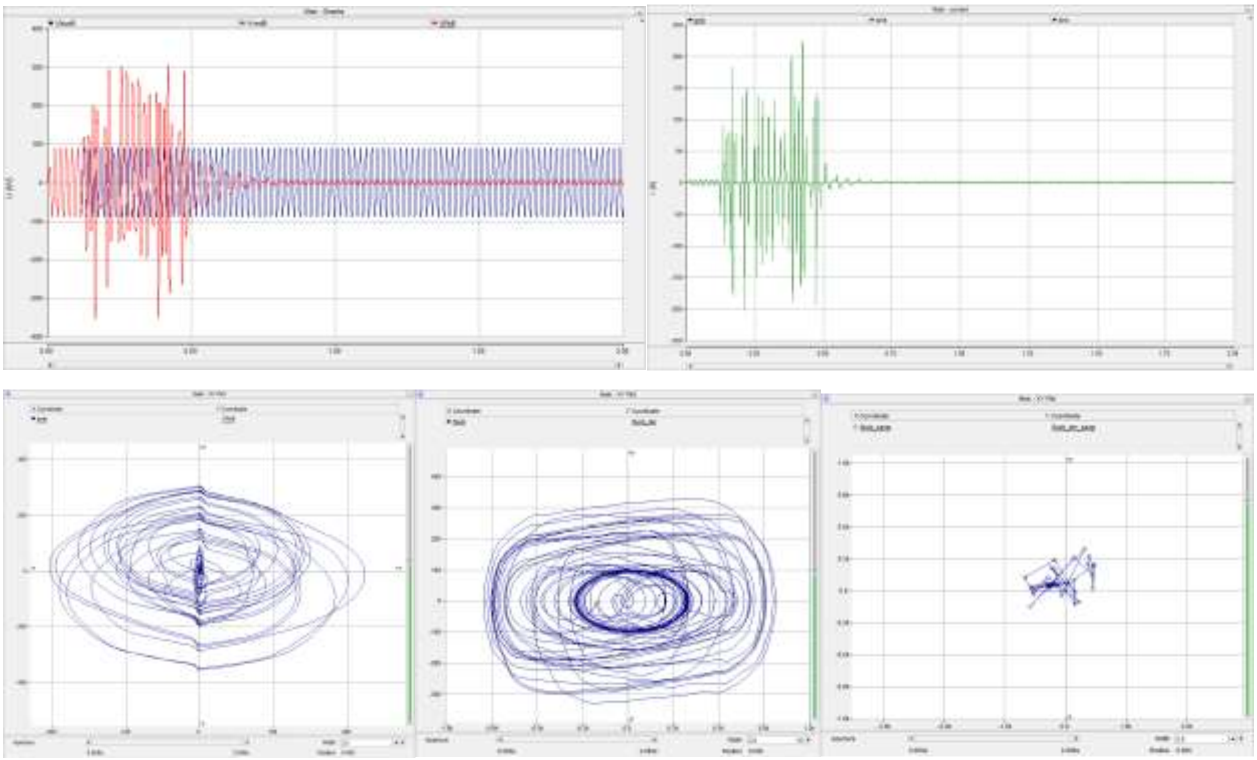
U každého obrázku jsou znázorněny časové průběhy napětí (červená křivka) a proudu (zelená křivka) na straně VVN a dále zobrazení fázového prostoru a poincarého zobrazení pro analýzu časového vývoje ferorezonančního jevu. Fázový prostor *U*, *I* je na obrázcích vlevo, fázový prostor ϕ',ϕ je uprostřed a poincarého zobrazení vpravo.



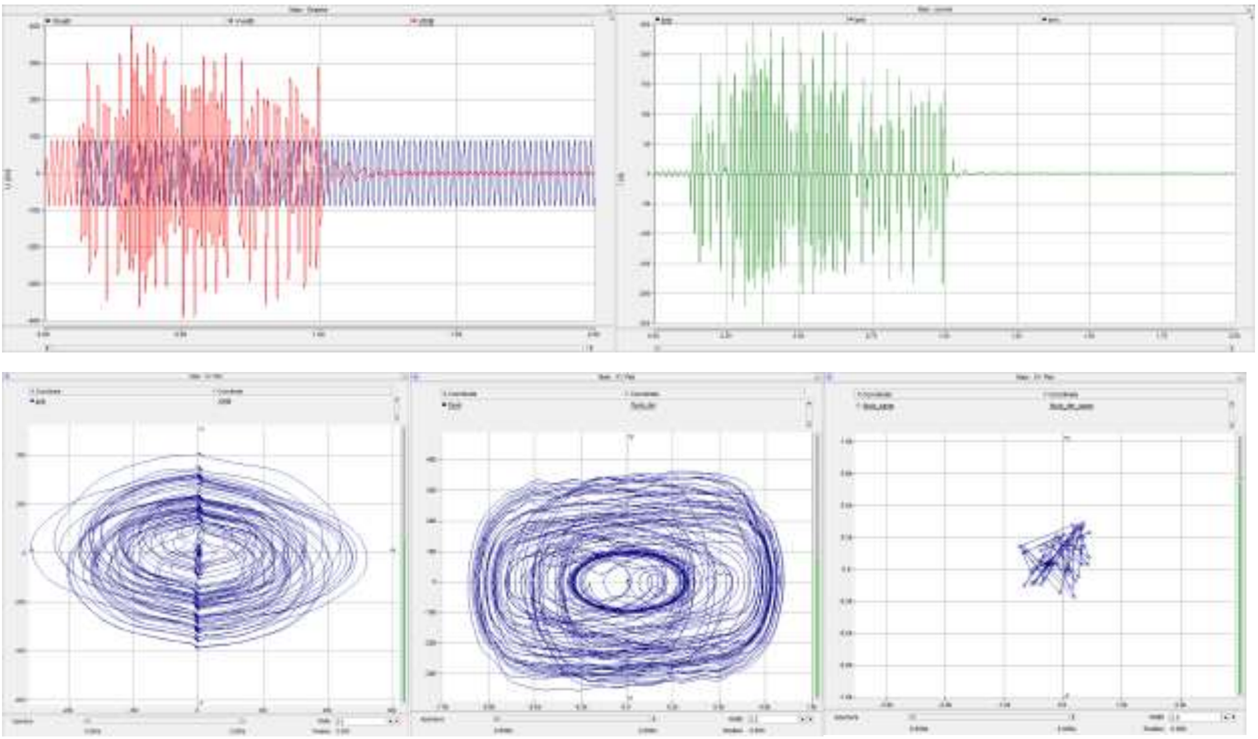
Obr. 4.55 Výkon transformátoru 25 MVA



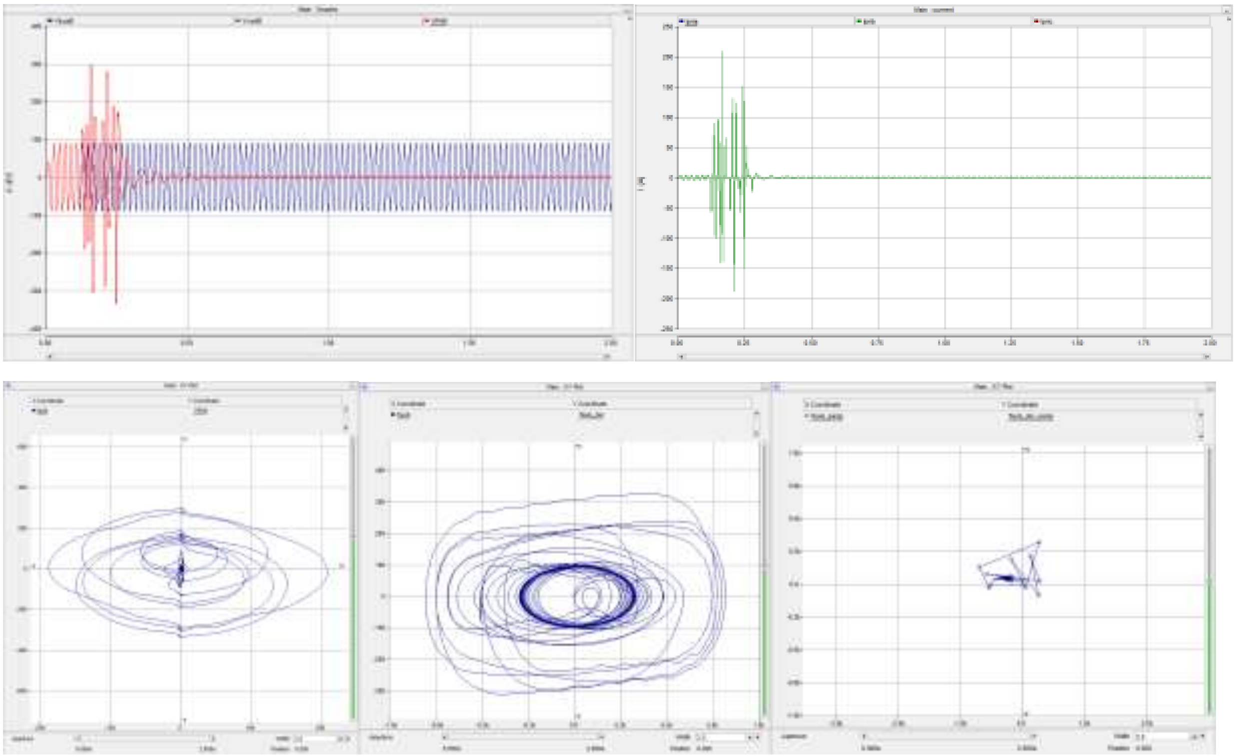
Obr. 4.56 Výkon transformátoru 20 MVA



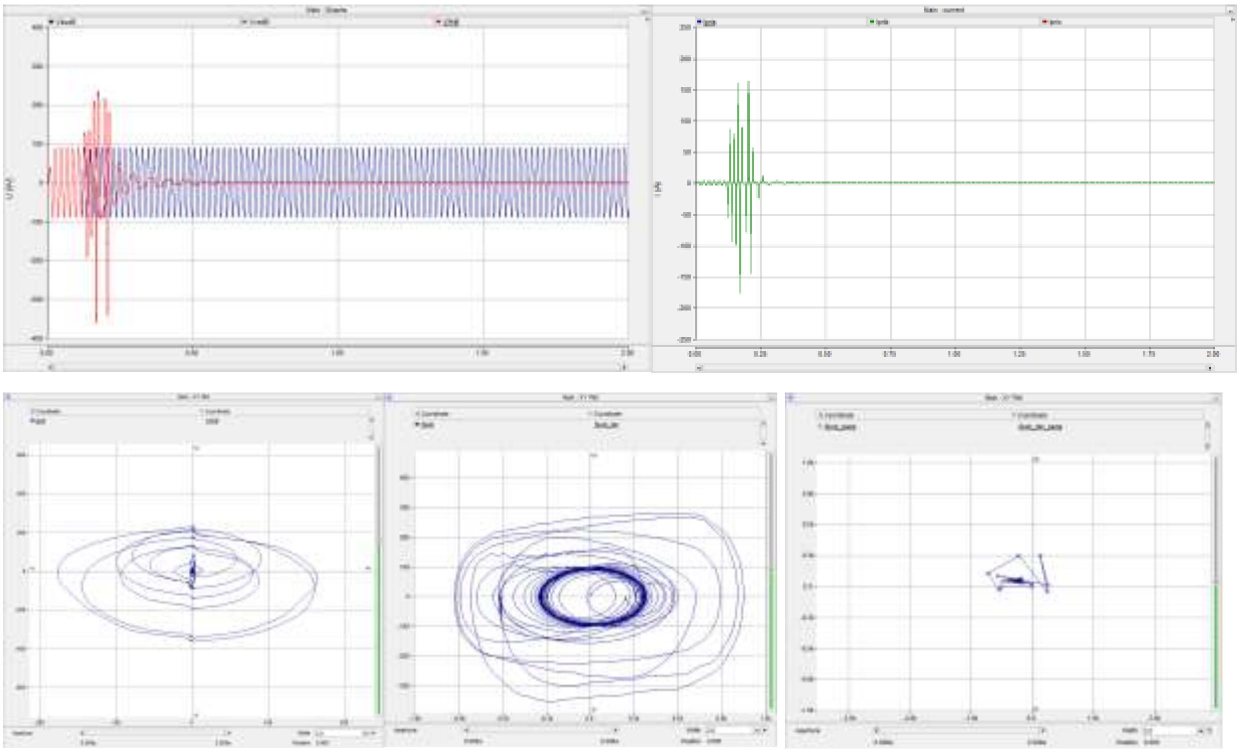
Obr. 4.57 Výkon transformátoru 18 MVA



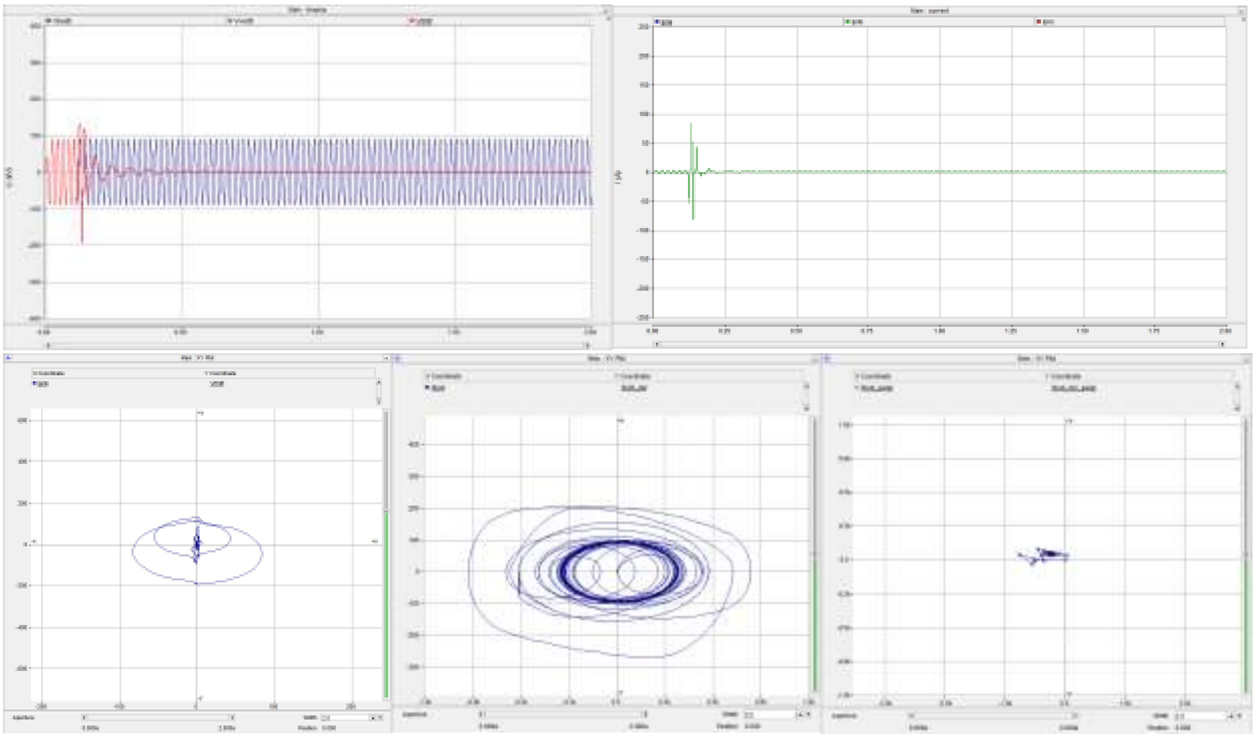
Obr. 4.58 Výkon transformátoru 16 MVA



Obr. 4.59 Výkon transformátoru 14 MVA



Obr. 4.60 Výkon transformátoru 12 MVA



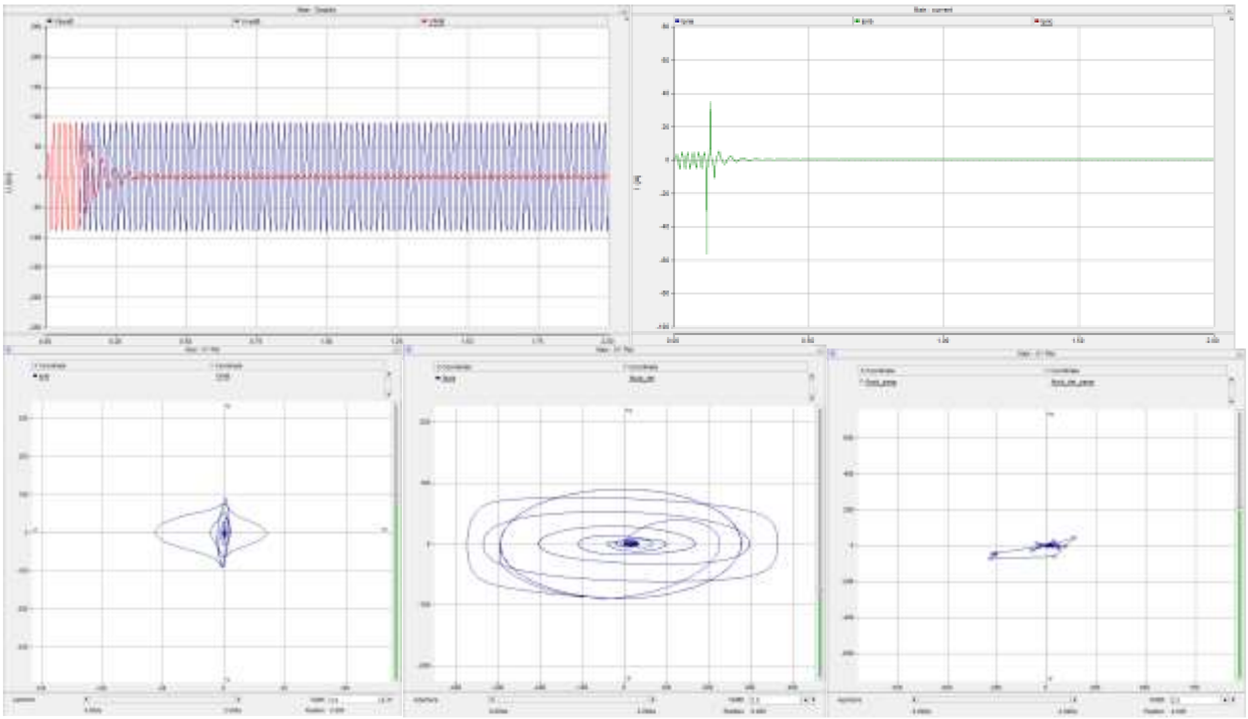
Obr. 4.61 Výkon transformátoru 10 MVA

Další část studie se týká vlivu zapojení vinutí transformátoru na vznik a průběh ferorezonance. Obr. 4.62 až obr. 4.66 znázorňují průběh ferorezonančního jevu, při různých zapojeních vinutí transformátoru, přičemž konfigurace a parametry soustavy zůstávají stejné.

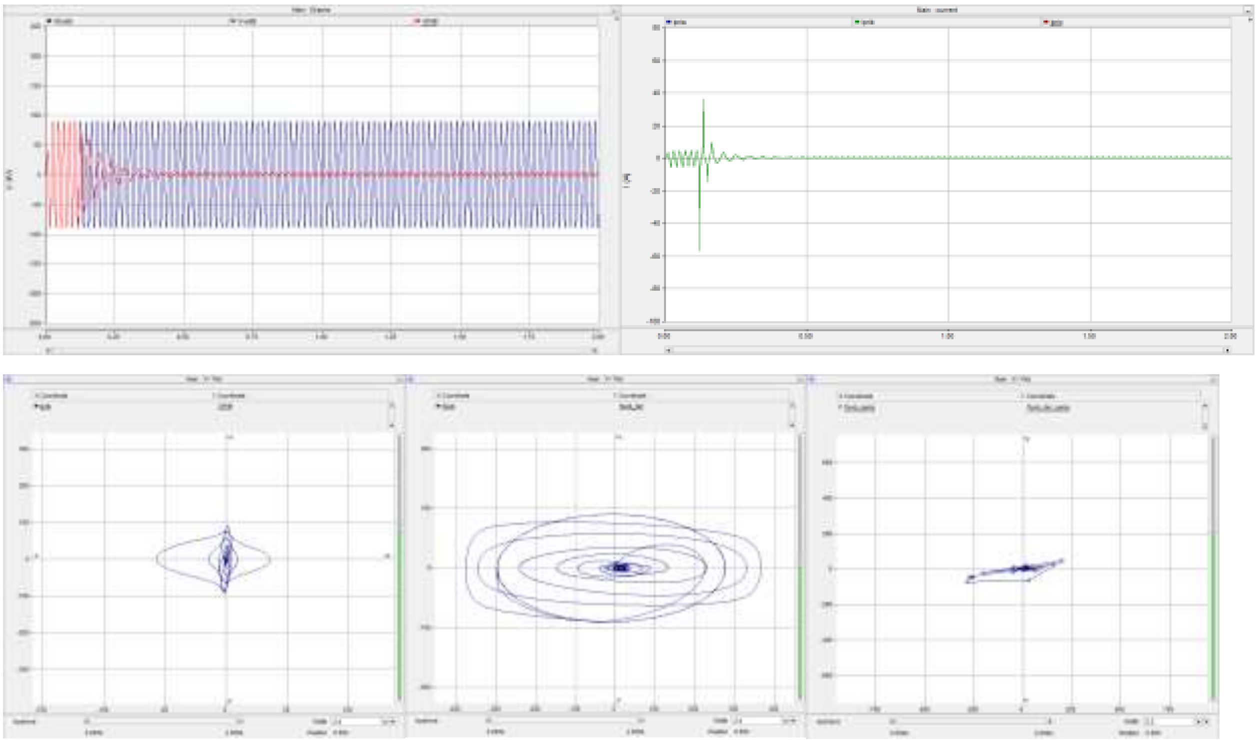
Již v předchozí kapitole 4.1.6, byly uvedeny zapojení vinutí transformátorů, která jsou náchylná k vzniku ferorezonance. Zapojení Y_N/y_N a Y_N/y při uvedené konfiguraci účinně tlumí ferorezonanci. U zapojení D/d, D/y a D/y_N se ferorezonance rozvinula, přičemž nejvýraznějším oscilacím dochází při zapojení D/y_N.

Vznik a průběh ferorezonančního jevu výrazně ovlivňuje i velikost napětí. Tato závislost je znázorněna na obr. 4.67 až obr. 4.71. Se zvyšujícím napětím se ferorezonance více projevuje. Tato závislost ale není lineární. To znamená, že oscilace vyvolané ferorezonancí nemusí dosahovat vyšších amplitud po zvýšení napětí. Simulace byly provedeny pro úrovně napětí soustavy na straně VVN od -10 % po +10 % jmenovité hodnoty s krokem 5 %, což představuje hraniční hodnoty pro přepětí a podpětí. Při zvýšení napětí +10 % U_N dochází k prudkému nárůstu napětí a proudu vlivem ferorezonance, který soustava není schopna utlumit. Pokud by nedošlo k včasnému odpojení, mohlo by dojít k poškození prvků soustavy.

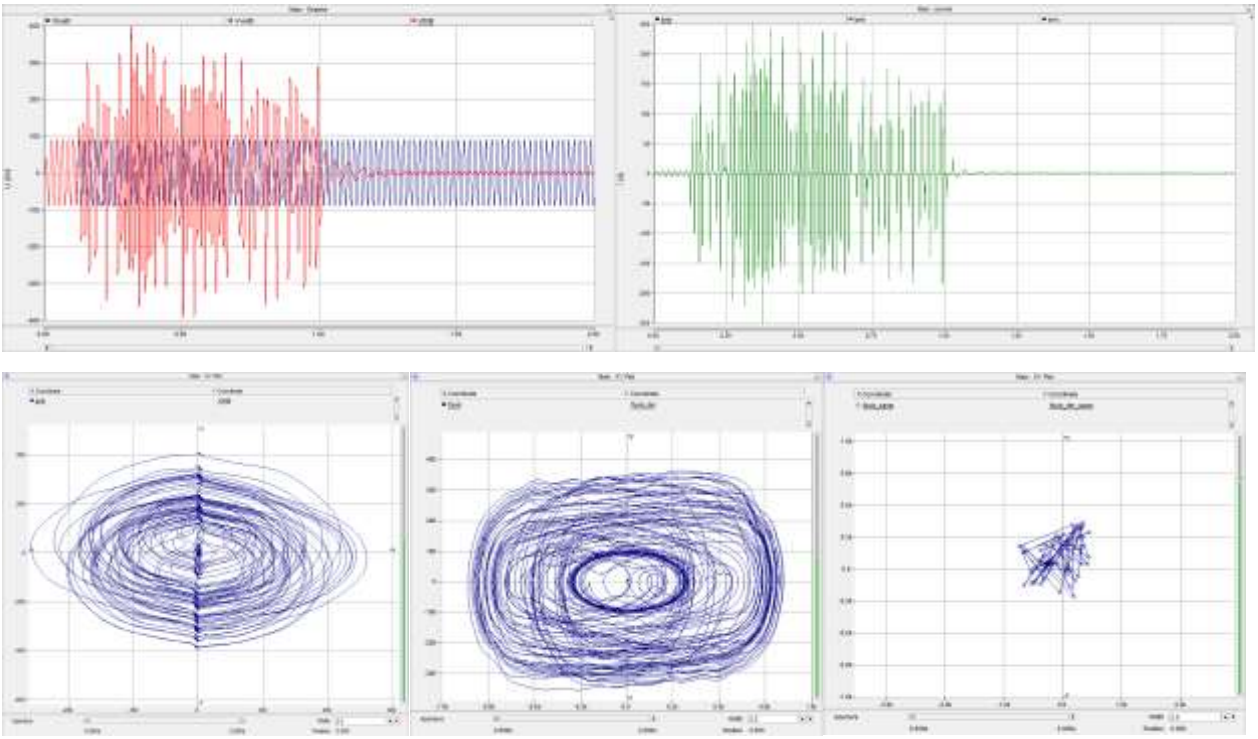
U každého obrázku jsou znázorněny časové průběhy napětí (červená křivka) a proudu (zelená křivka) na straně VVN a dále zobrazení fázového prostoru a poincarého zobrazení pro analýzu časového vývoje ferorezonančního jevu. Fázový prostor *U, I* je na obrázcích vlevo, fázový prostor ϕ',ϕ je uprostřed a poincarého zobrazení vpravo.



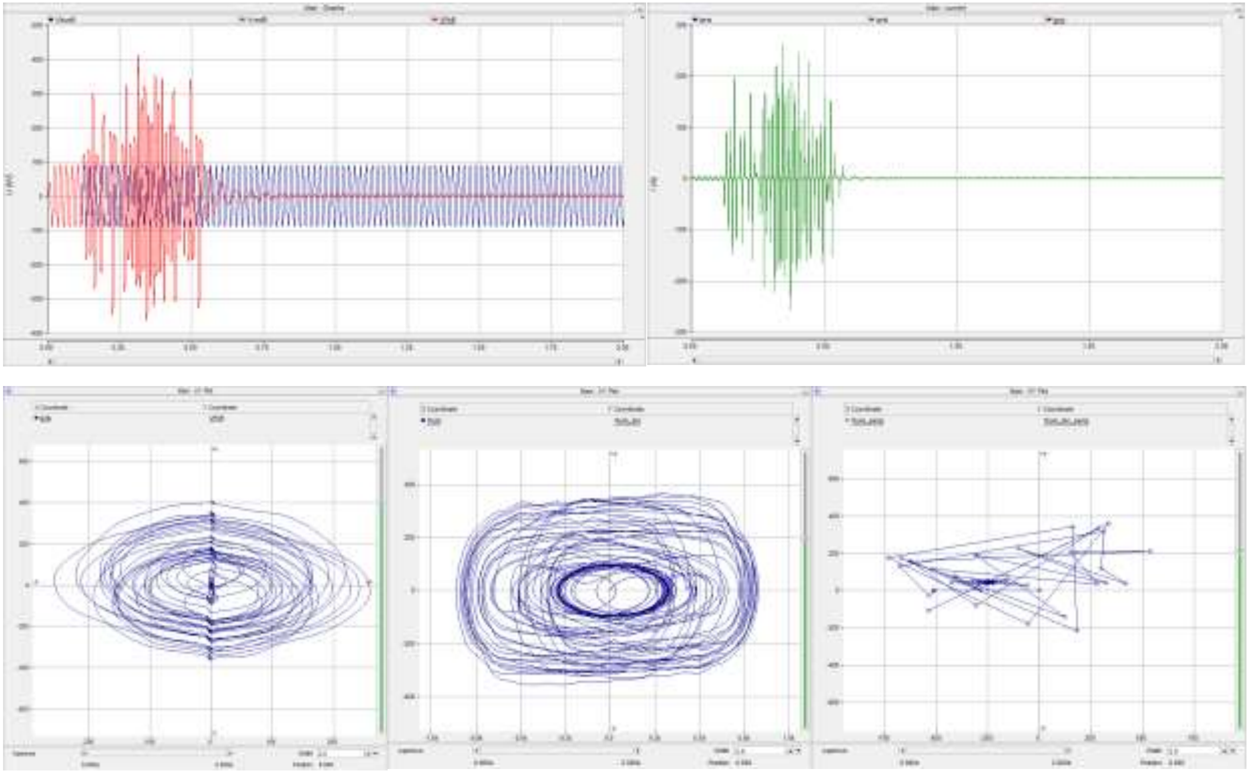
Obr. 4.62 Zapojení vinutí transformátoru Y_N/y_N



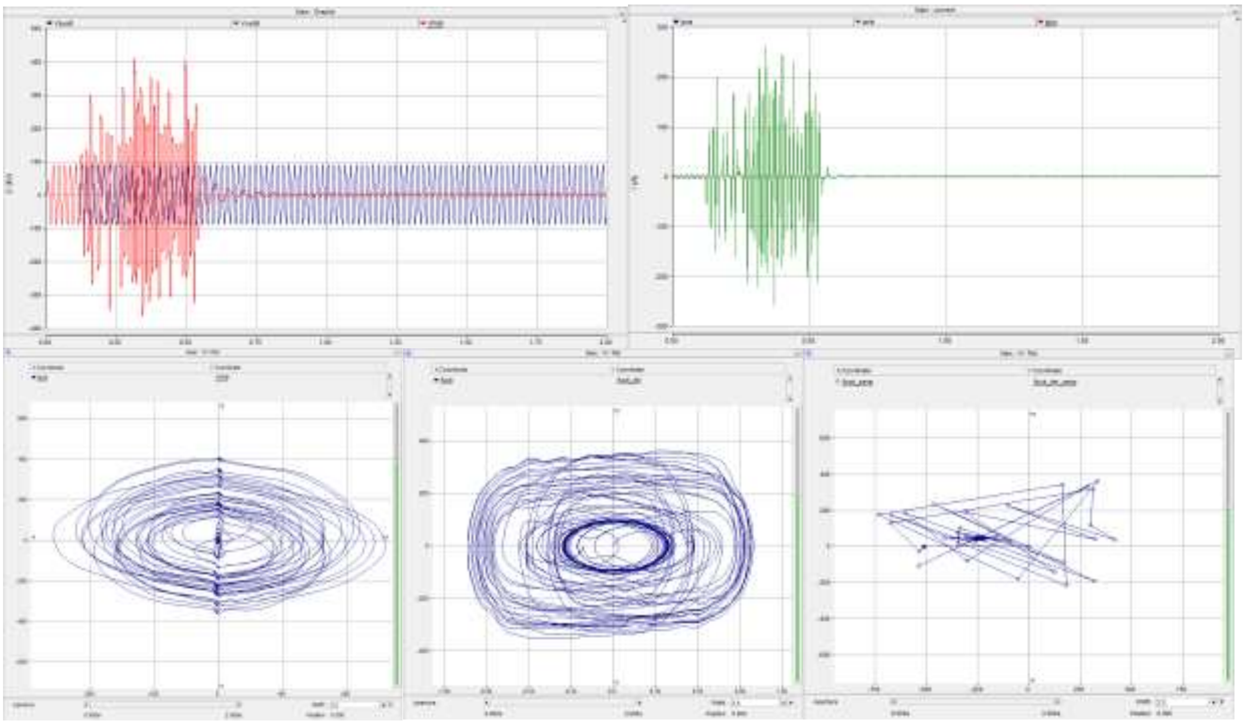
Obr. 4.63 Zapojení vinutí transformátoru Y_N/y



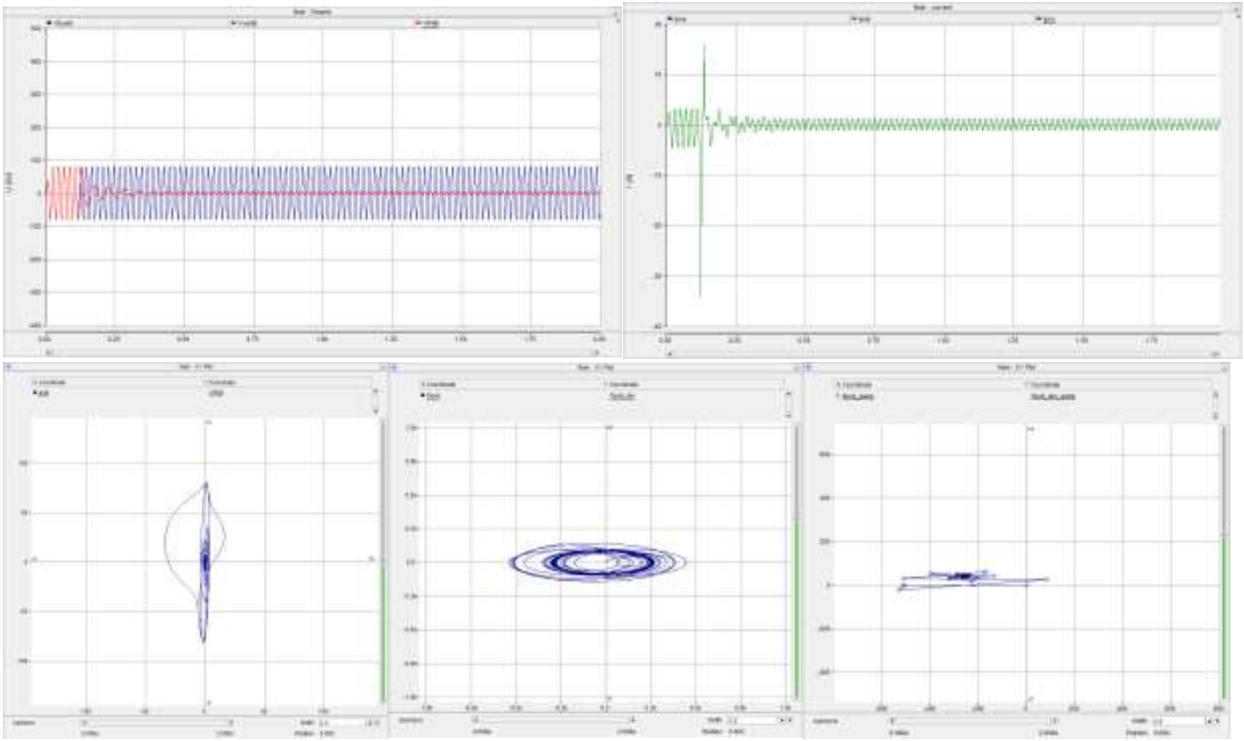
Obr. 4.64 Zapojení vinutí transformátoru D/y$_N$



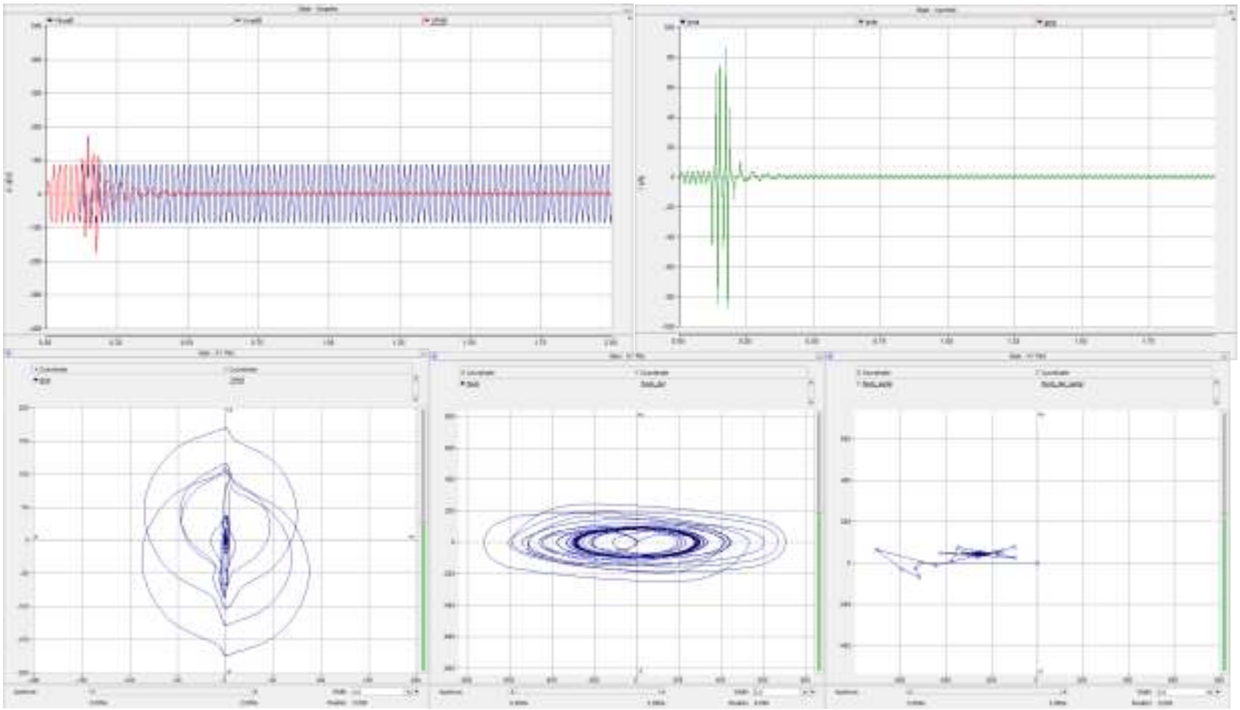
Obr. 4.65 Zapojení vinutí transformátoru D/y



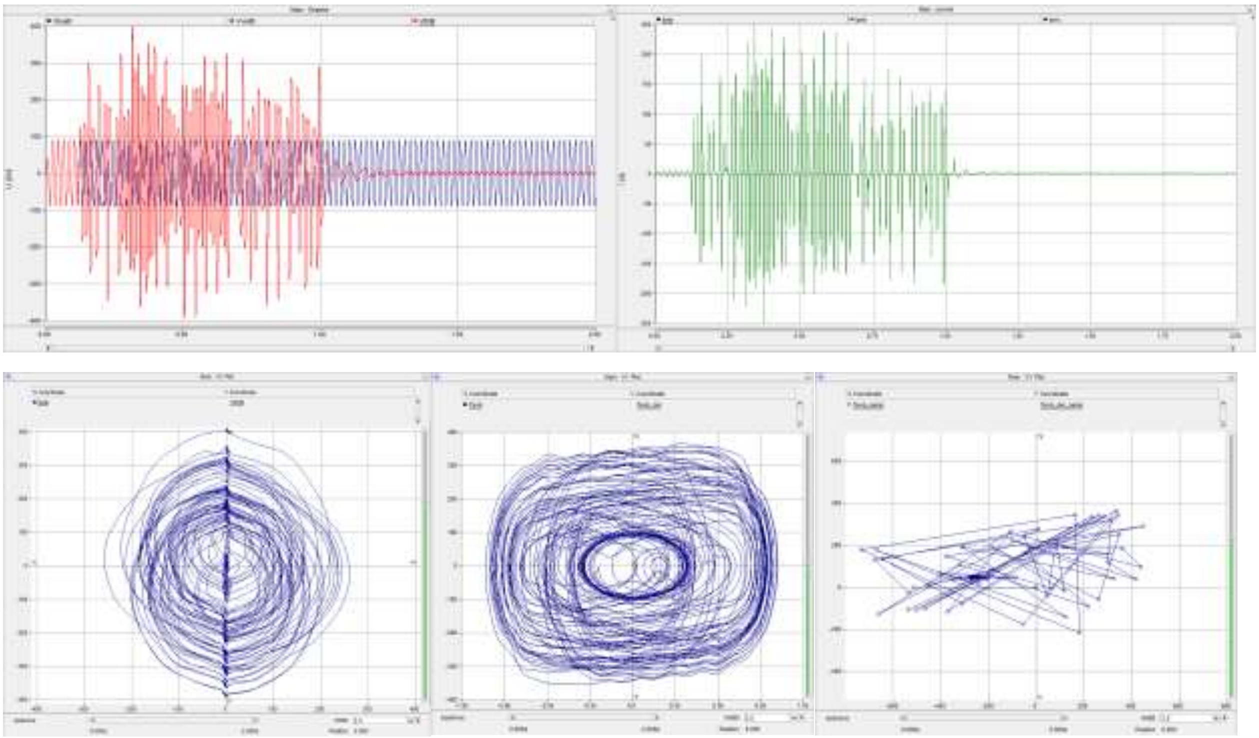
Obr. 4.66 Zapojení vinutí transformátoru D/d



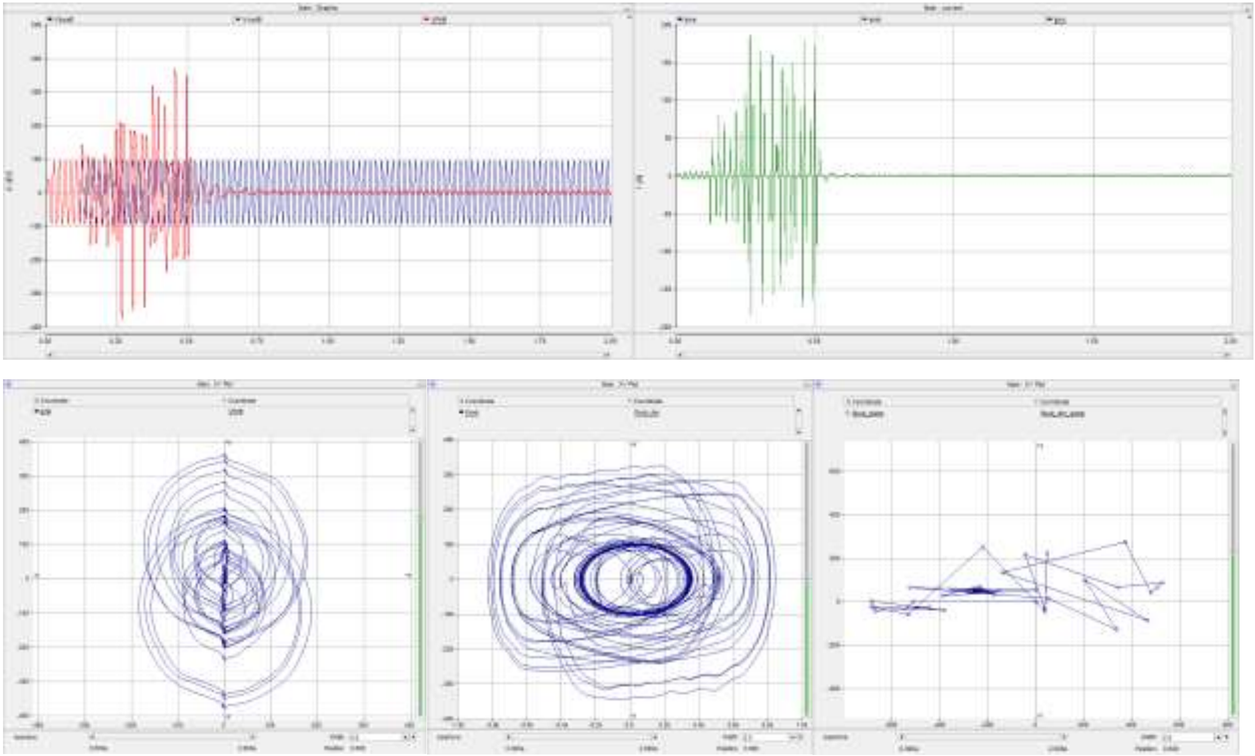
Obr. 4.67 Vývoj při napětí zdroje -10 % U_N



Obr. 4.68 Vývoj při napětí zdroje -5 % U_N



Obr. 4.69 Vývoj při jmenovitém napětí zdroje U_N =110 kV



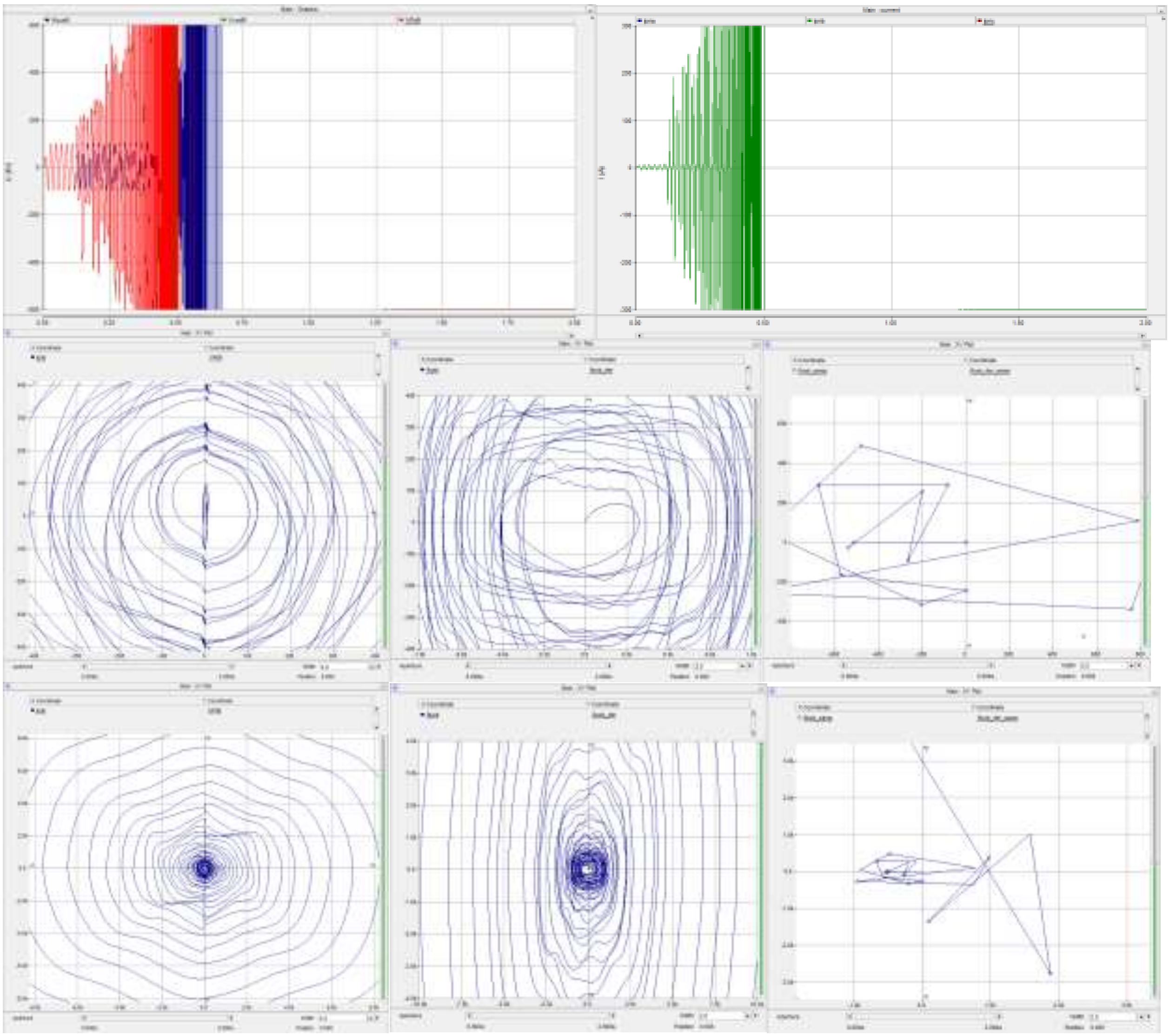
Obr. 4.70 Vývoj při napětí zdroje +5 % U_N

Z důvodu rozvinutí ferorezonančního stavu při napětí +10 % U_N byli k obr. 4.71 připojeny i širší pohledy na vývoj fázových prostorů a poincarého zobrazení. Lze jednoznačně tvrdit, že uvedená konfigurace se samostatně netlumí.

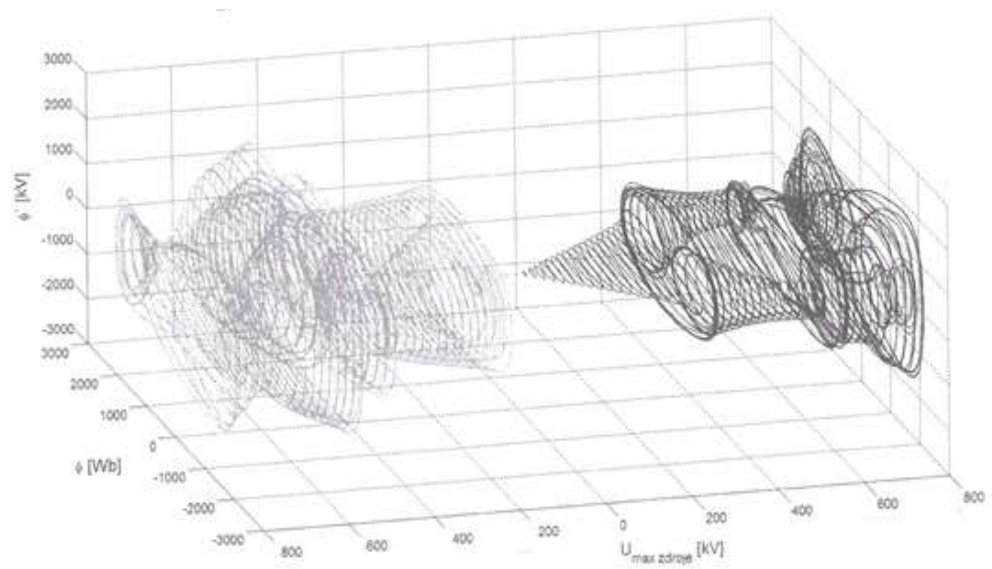
U každého obrázku jsou znázorněny časové průběhy napětí (červená křivka) a proudu (zelená křivka) na straně VVN a uprostřed se nachází zobrazení fázového prostoru a poincarého zobrazení pro analýzu časového vývoje ferorezonančního jevu. Fázový prostor *U, I* je na obrázcích vlevo, fázový prostor ϕ', ϕ je uprostřed a poincarého zobrazení vpravo. V spodní řadě jsou vygenerovány stejné průběhy vzdáleného pohledu.

Jak již bylo uvedeno, závislost na výskytu ferorezonančního jevu na velikosti amplitudě napětí není lineární, i když je možné tvrdit, že se zvýšeným napětím se pravděpodobnost výskytu ferorezonance zvyšuje. Možný vývoj fázového prostoru v závislosti na napětí systému znázorňuje obr. 4.72.

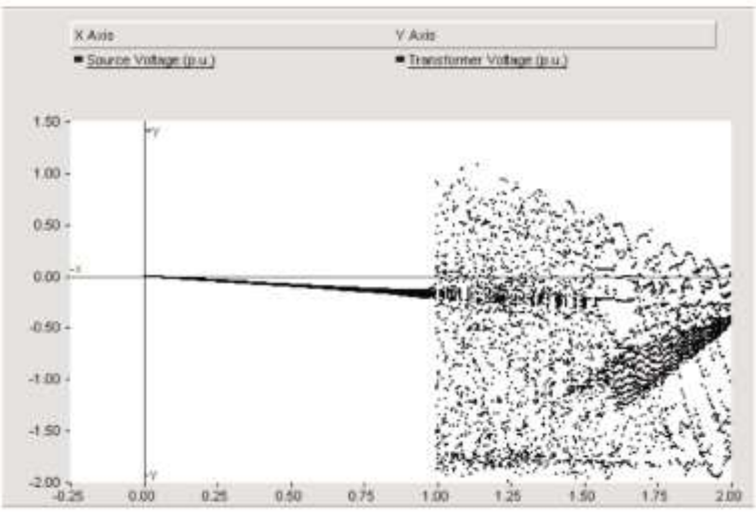
Bifurkační diagram (obr. 4.73) zobrazuje oblast nestability v závislosti na napětí zdroje.



Obr. 4.71 Vývoj při napětí zdroje +10% U_N



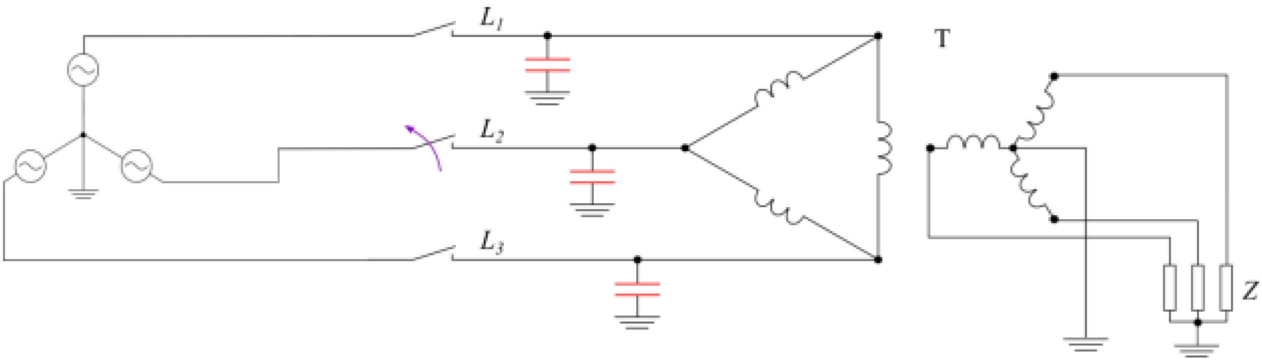
Obr. 4.72 Příklad zobrazení fázovéhoprostoru v závislosti na velikosti napětí [10]



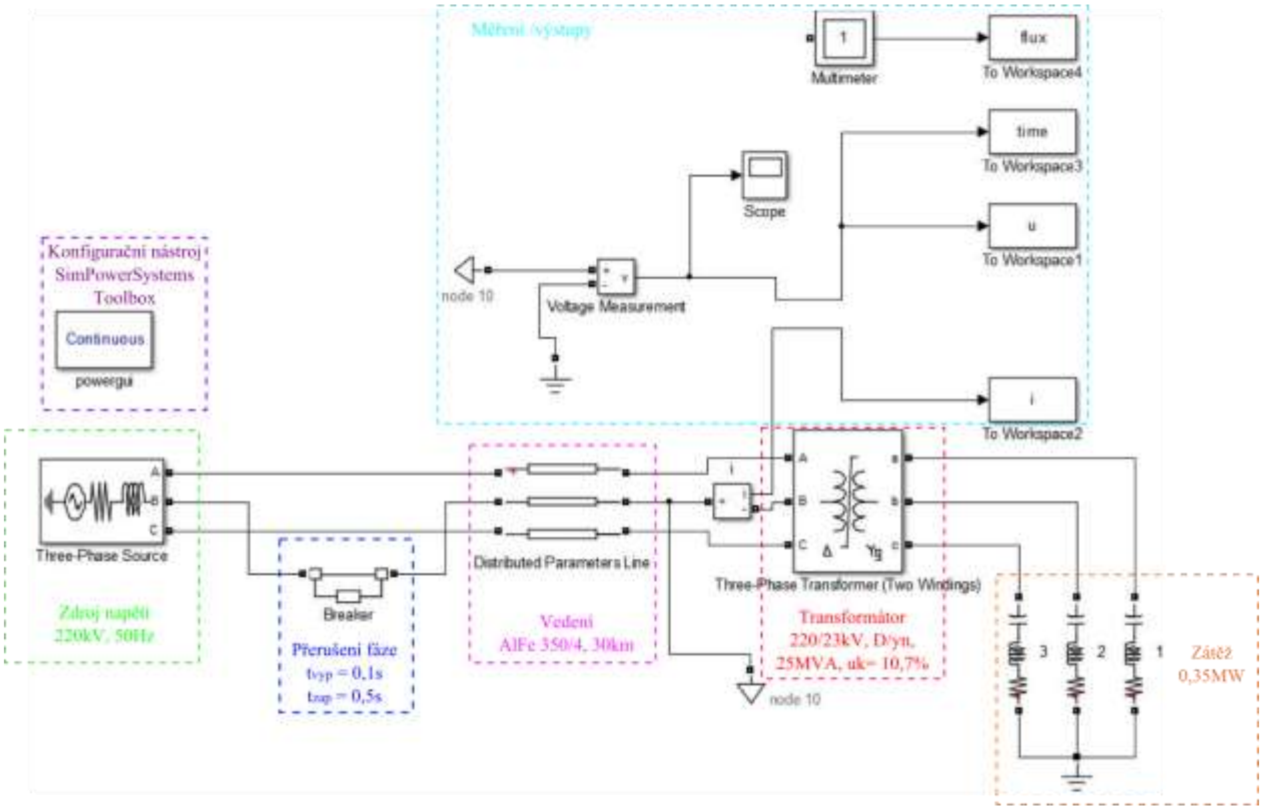
Obr. 4.73 Bifurkační diagram: Napětí na transformátoru v závislosti na napětí zdroje [66]

4.4 Analýza ferorezonančního obvodu s využitím softwarového nástroje Matlab 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. Uvedená konfigurace dle obr. 4.74 je teoreticky rozebrána v kapitole 4.1.6 a za určitých podmínek je náchylná na vznik ferorezonančního jevu.



Obr. 4.74 Simulovaný energetický systém – Výkonový nezatížený (příp. minimálně zatížený) trojfázový transformátor napájený přes dvě fáze



Obr. 4.75 Schéma v programu matlab simulink s definovanými výstupy

Obr. 4.75 zobrazuje simulační schéma v programu matlab simulink. Ve fázi B (L2) je zařaren 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. V horní části schematu jsou znázorněny výstupy veličin do „workspace", tj. výstupního datového souboru, se kterým pak lze v prostředí MATLAB dále pracovat a zobrazovat uvedení veličiny v různých závislostech. Obdobně lze exportovat signál různých dalších veličin (např. v sekundárním obvodu transformátoru).

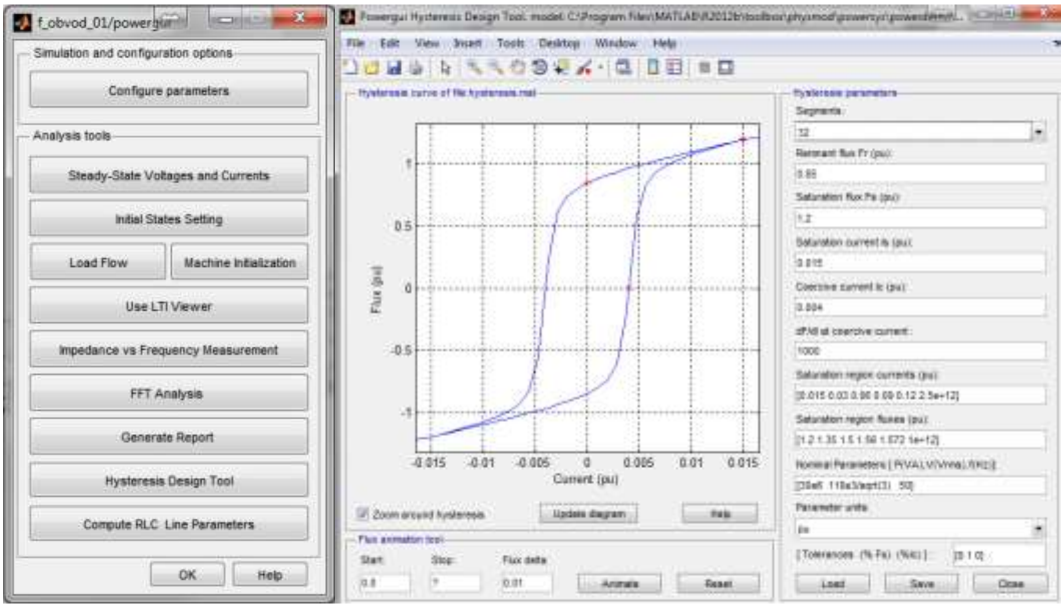
Simlovaný model, je vytvořen z několika modelů elektrických prvků. Z pohledu ferorezonace je nutné použít model, který pokud možno nejefektivněji popisuje prvky soustavy a to hlavně transformátor a vedení. U transformátoru, pro řešení ferorezonance, je nutné definovat saturaci, případně hysterezi. Konkrétní řešení jsou uvedené v následujících kapitolách.

4.4.1 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 a nastavení parametrů „powergui" je znázorněn na obr. 4.76. 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,

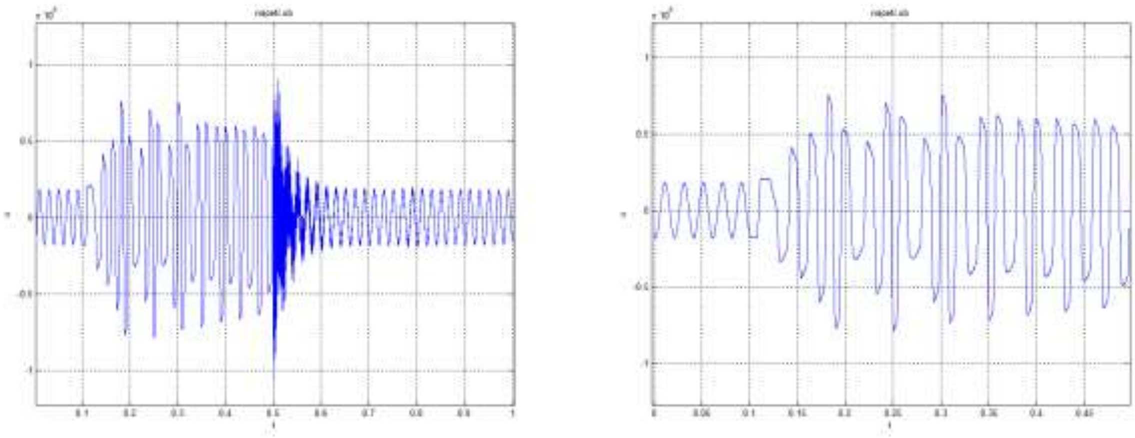
a dále je možné definovat oblast nasycení a další parametry. Případně lze načíst model hystereze z „m-file“. Model hystereze v programu simulink je uveden v příloze 3.

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.

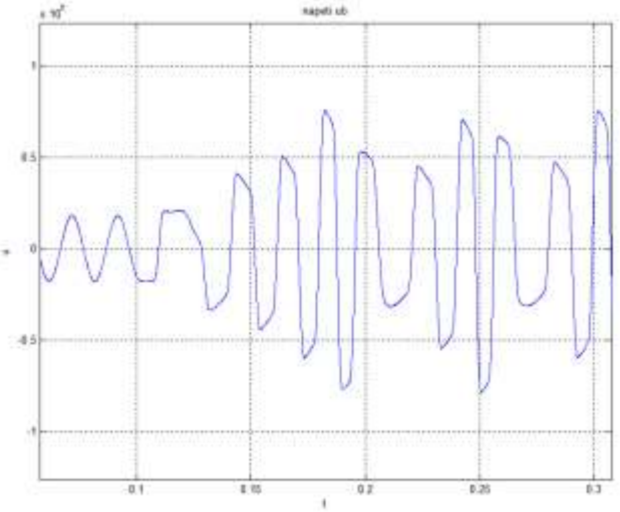


Obr. 4.76 Parametrizační okno nástroje „powergui“ v SIMULINKu - nastavení hystereze

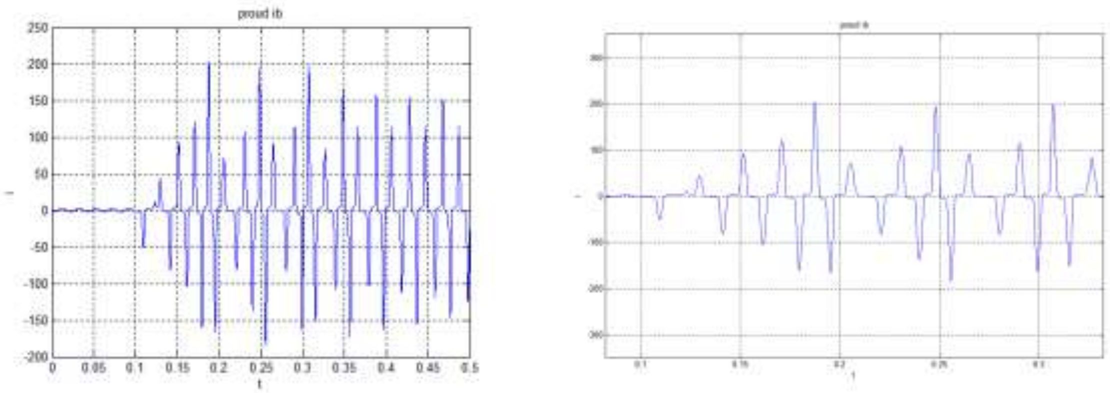
Průběh napětí při simulaci ferorezonance je znázorněn na obr. 4.77 a obr. 4.78. Fáze B (L2) je v čase 0,1 s rozpojena a spojena v čase 0,5 s. V maximálních hodnotách napětí při ferorezonančních oscilacích dosahuje přes 700 kV. Průběh je kvaziperiodický až chaotický. Obr. 4.79 znázorňuje časový průběh proudu. V detailnějším zobrazení je možno pozorovat deformace proudu, způsobené saturací a hysterezí. V maximálních hodnotách dosahuji až 200 A.



Obr. 4.77 Průběh napětí u_b, při ferorezonanci

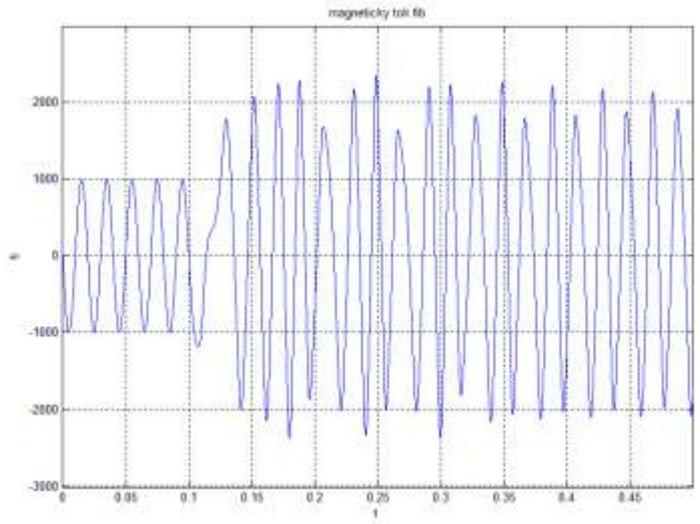


Obr. 4.78 Průběh napětí u_b, při ferorezonanci - detail

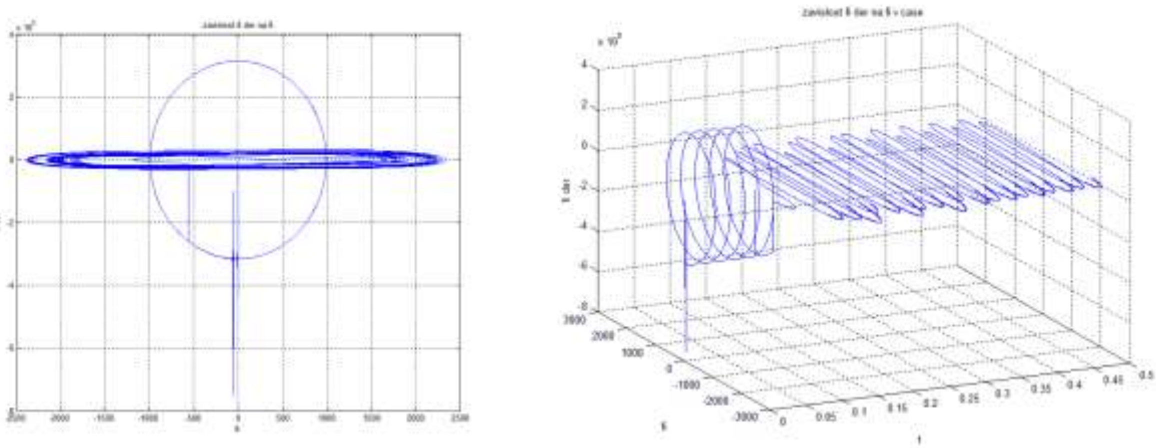


Obr. 4.79 Průběh proudu i_b, při ferorezonanci

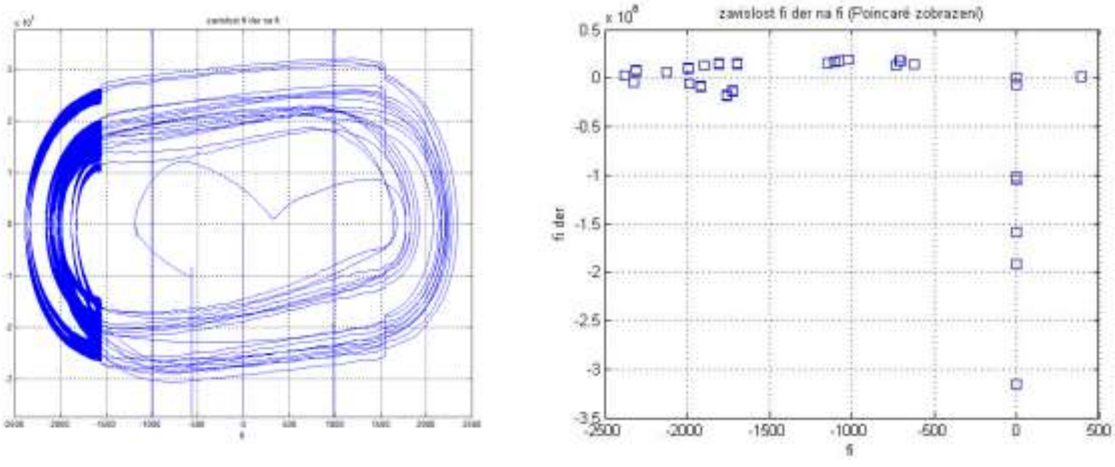
Znázornění průběhu magnetického toku Φ_b je na obr. 4.80. Jeho amplituda se při ferorezonanci zvýšila více než dvounásobně a současně se deformuje jeho průběh. Při pohledu na fázový prostor (obr. 4.81) je vidět kruhový tvar pro sinusový průběh. Po rozepnutí jedné fáze dochází ke vzniku ferorezonance a tím se i deformuje fázový prostor. Vývoj této změny je možné vidět na obr. 4.81 a následně v obr. 4.82, kde je znázorněn detailní pohled včetně poincarého zobrazení. Na základě tohoto zobrazení a jeho vývoje v čase (obr. 4.83), lze usoudit, že kvaziperiodická oscilace je ustálená a nejeví náznak nekontrolovatelného růstu, spíš postupného útlumu. Třírozměrné znázornění vývoje poincarého zobrazení nám nabízí přehlednější pohled na průběh ferorezonančního jevu.



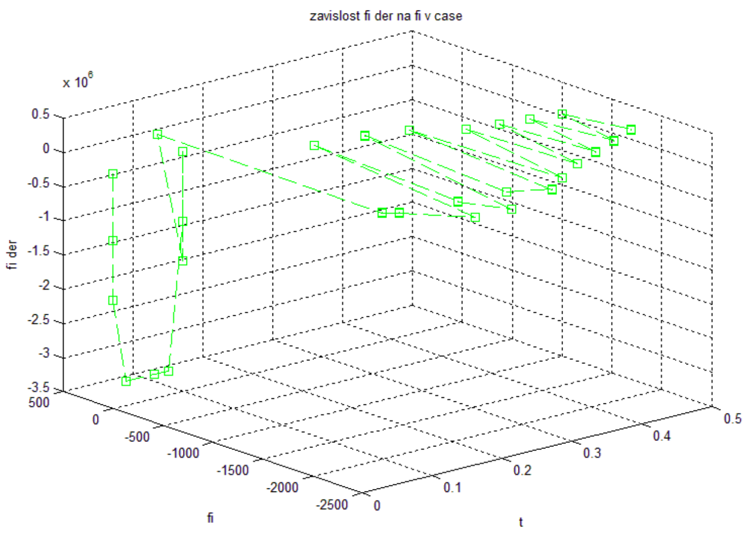
Obr. 4.80 Vývoj magnetického toku Φ_b, při ferorezonanci



Obr. 4.81 Vývoj fázového prostoru *magnetického toku Φ'_b, Φ_b.*

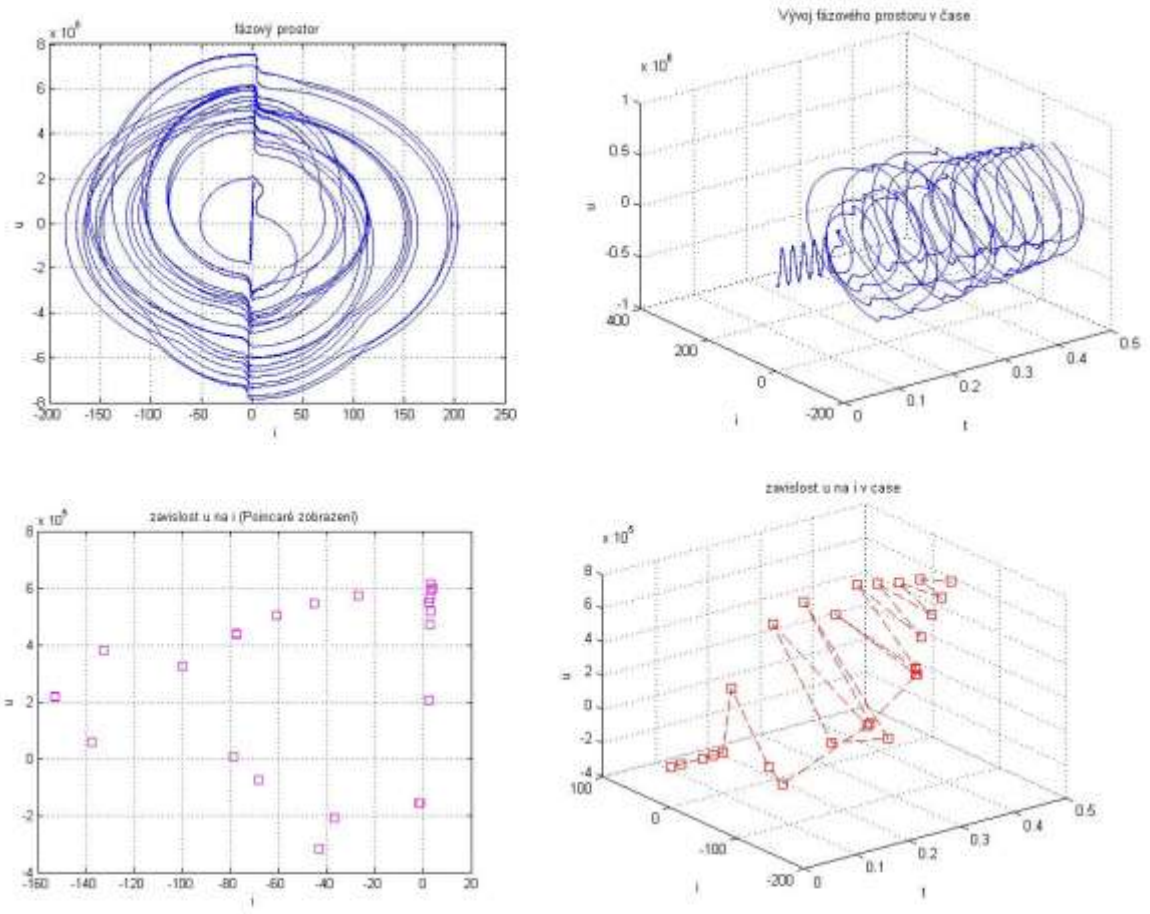


Obr. 4.82 Fázový prostor Φ'_b, Φ_b při ferorezonanci a poincarého zobrazení



Obr. 4.83 Vývoj poincarého zobrazení Φ'_b, Φ_b v čase

Na obr. 4.84 je znázorněn fázový prostor *u* a *i*, dále jeho vývoj v čase a pro analýzu tohoto vývoje poincarého zobrazení. Toto zobrazení naznačuje, že průběh je tlumený a má tendenci se ustálit. Vzhledem k tomu, že plocha křivky znázorněné ve fázovém prostoru je úměrná výkonu neboli energií, je možné srovnat energetické poměry v síti před a při ferorezonančním jevu.

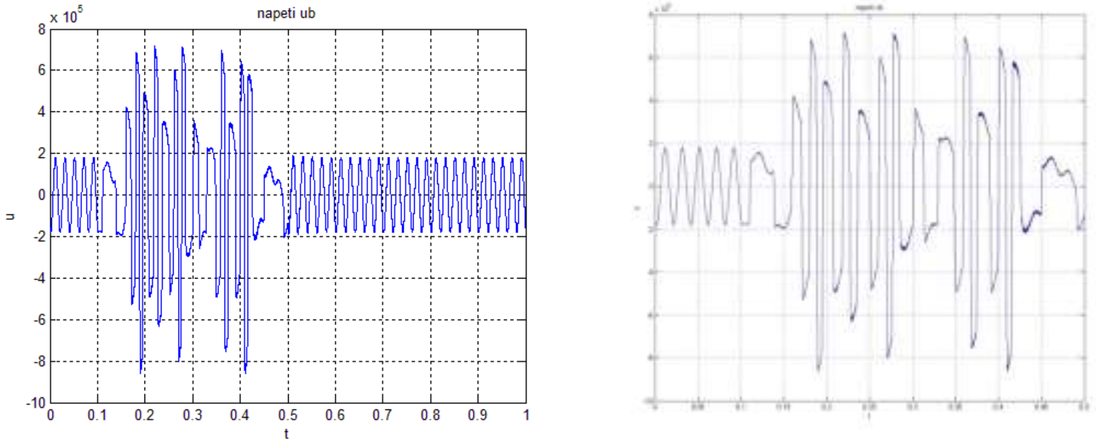


Obr. 4.84 Fázový prostor u a i, jeho vývoj v čase a poincarého zobrazení

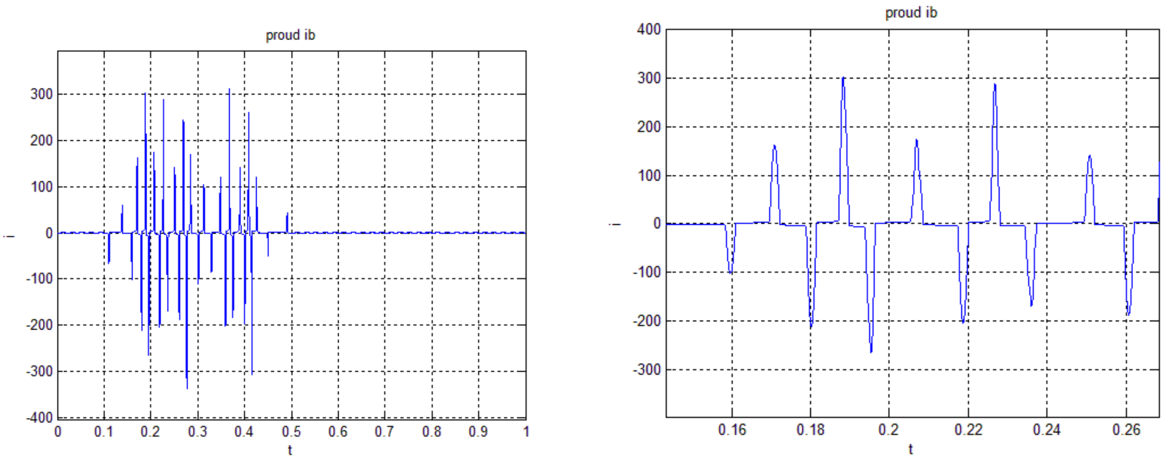
4.4.2 Simulace bez uvažování hystereze transformátoru

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.[65], [76], [80]), kteří se shodují na vhodnosti využití modelu transformátoru bez uvažování hystereze pro praktické simulace.

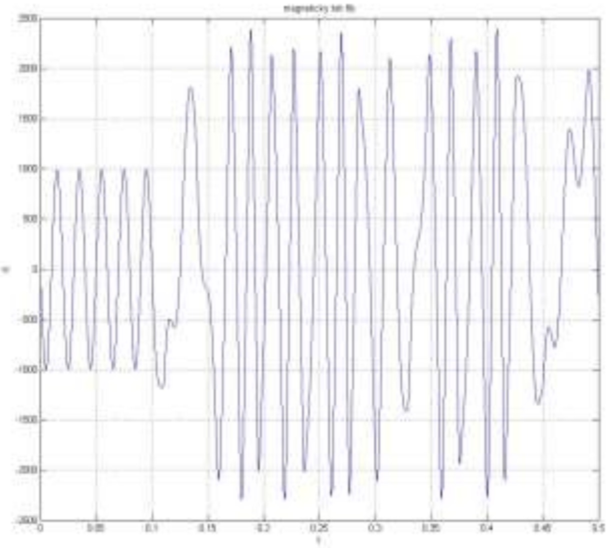
Pro možnost srovnání byly simulace provedeny se stejnou konfiguraci a parametry prvků soustavy jako v kapitole 4.4.1. Průběh napětí je znázorněn na obr. 4.85. Amplituda napětí dosahuje hodnot téměř 700 kV. K utlumení oscilací dojde přibližně po 0,4 s. Průběh proudu vykazuje typické deformace, jak je vidět v obr. 4.86. Maximální hodnoty proudu dosahují při největších oscilacích přibližně 300 A. V případě magnetického toku, je jeho průběh znázorněn na obr. 4.87. Amplituda magnetického toku vzrostla 2,5 krát a vykazuje kvaziperiodické oscilace.



Obr. 4.85 Průběh napětí u_b, při ferorezonanci bez uvažování hystereze



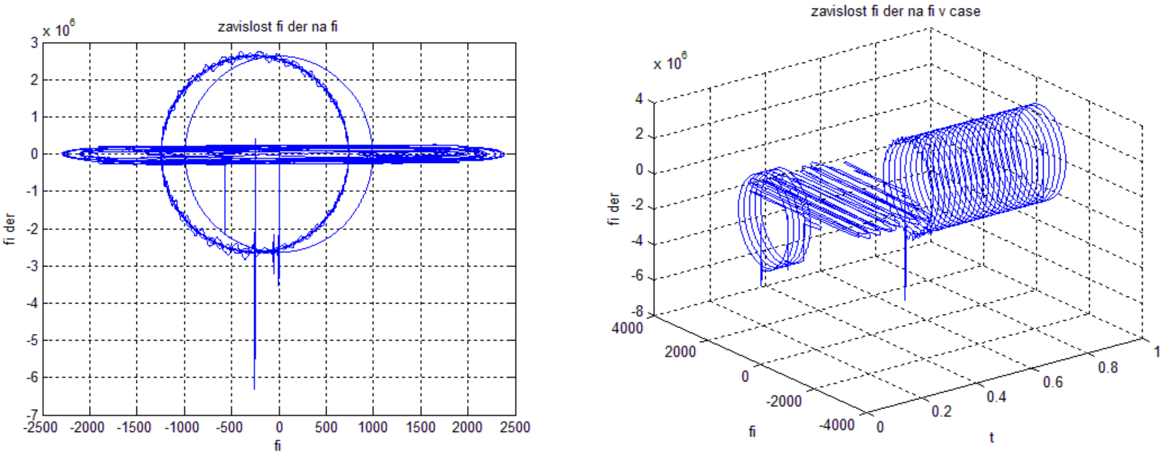
Obr. 4.86 Průběh proudu i_b, při ferorezonanci bez uvažování hystereze



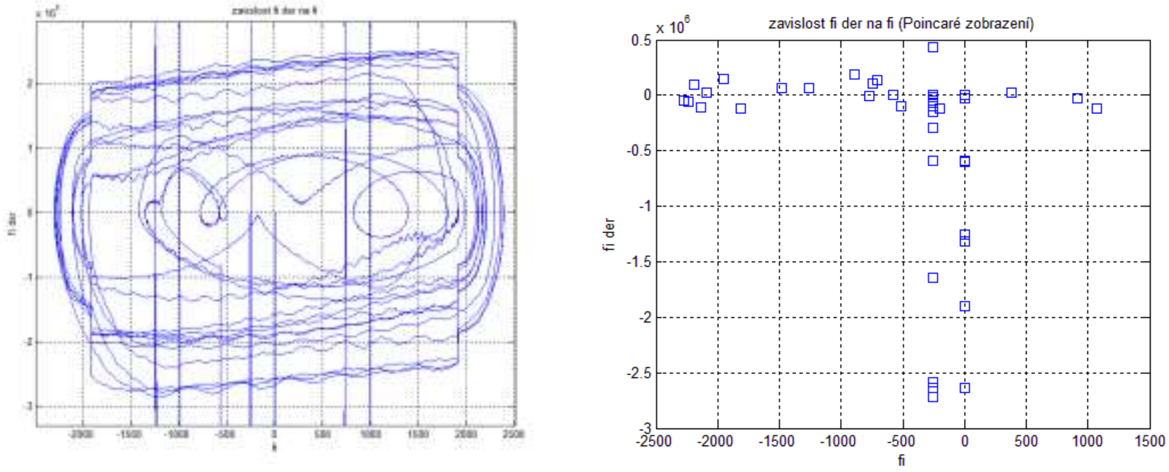
Obr. 4.87 Vývoj magnetického toku Φ_b, při ferorezonanci bez uvažování hystereze

Deformace průběhu magnetického toku je velmi podobná jako u modelu s uvažováním hystereze. Fázový prostor a jeho evoluci v čase je možné vidět na obr. 4.88. Znázorněný detail na obr. 4.89 představuje průběh při ferorezonančním jevu. Dle poincarého zobrazení (obr. 4.89 a obr. 4.90) 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.

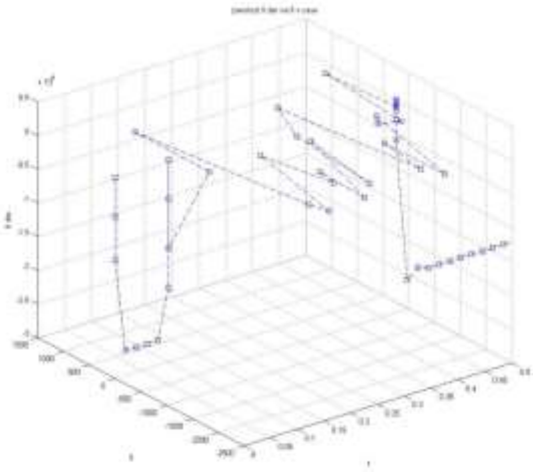
Obdobnou analýzu vývoje nám umožňuje pohled na fázový prostor a jeho časovou evoluci (obr. 4.91). Poincarého zobrazení a jeho vývoj v čase zobrazuje obr. 4.92. Ferorezonanční jev, při uvedené konfiguraci, způsobí oscilace, které energetický systém dokáže utlumit bez zásahu omezovacích prvků.



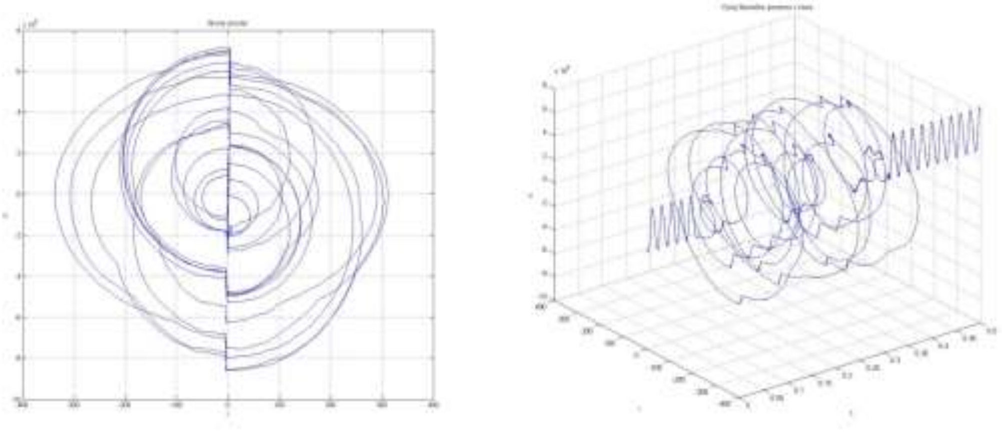
Obr. 4.88 Vývoj fázového prostoru magnetického toku Φ'_b, Φ_b. bez uvažování hystereze



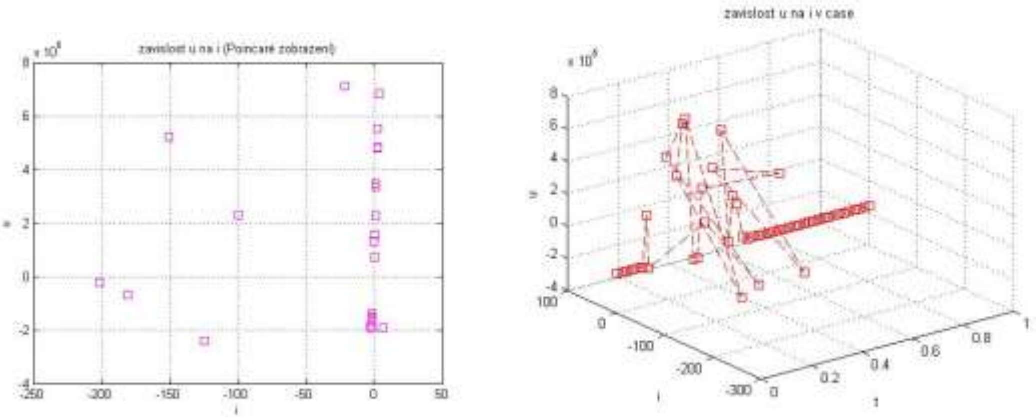
Obr. 4.89 Fázový prostor Φ'_b, Φ_b při ferorezonanci a poincarého zobrazení bez uvažování hystereze



Obr. 4.90 Vývoj poincarého zobrazení Φ'_b, Φ_b v čase bez uvažování hystereze



Obr. 4.91 Fázový prostor u a i, jeho vývoj v čase bez uvažování hystereze



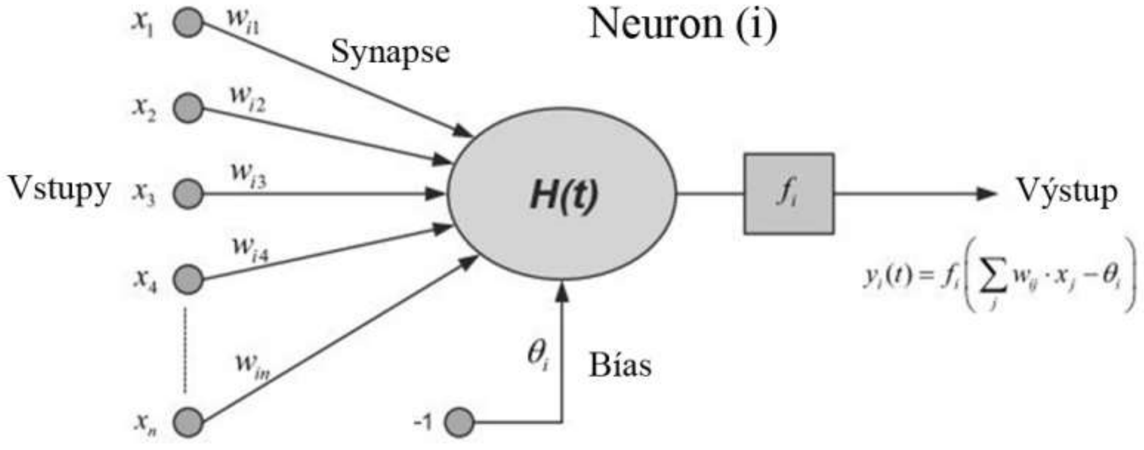
Obr. 4.92 Fázový prostor zobrazen v poincarého zobrazení a jeho vývoj v čase bez uvažování hystereze

4.5 Možnosti využití umělých neuronových sítí pro vyhodnocení ferorezonančního jevu

4.5.1 Umělé neuronové sítě (UNS)

Umělé neuronové sítě jsou modely založené na nervových strukturách mozku. Skládají se z velkého počtu hustě propojených výpočetních komponent. Základní jednotkou jsou neurony neboli nody, které se snaží pomocí četných propojení (synapsí) napodobit základní funkce mozku distribuovaným paralelním zpracováním dat. Získávají tak zkušenosti a mají kapacitu se učit z reprezentativních příkladů řešeného problému.

Umělé neurony jsou seskupeny ve vrstvách s typickou strukturou vstupní vrstvy, výstupní vrstvy a jedné nebo více skrytých vrstev. Každý neuron ve skryté vrstvě přijímá výstupy ze všech neuronů v předchozí vrstvě a předává svůj výstup všem neuronům v následující vrstvě. Vnitřní provoz umělého neuronu je zobrazen na obr. 4.93. Matematický symbol x_n vyjadřuje vstupy do neuronu. Každý z těchto vstupů je násoben synaptickou váhou, označenou w_{in}. Tyto hodnoty jsou zpracovány podle propagačního pravidla *H(t)*. Každý neuron má určitou prahovou úroveň (hodnotu bias) θ_i a přenosovou funkci f_i, která produkuje výstupní signál neuronu, označený jako y_i. Nejběžnějšími aktivačními funkcemi jsou lineární funkce, krokové funkce a sigmoidální funkce [80].



Obr. 4.93 Model umělého neuronu [80]

Když je definována struktura sítě, musí být síť vycvičena podle konkrétní aplikace. Během procesu učení jsou tak dlouho upravovány hodnoty synaptických vah, dokud síť není schopna správně zobecnit cvičná data. Jakmile je síť adaptována, je připravena na přijetí vstupních hodnot, které zpracovává v hodnoty výstupní.

Existují různé typy UNS podle nervového modelu, topologie synapsí a procesu učení. Jedna z nedůležitějších a nejvíce používaných sítí je MLP (vícevrstvý „MultiLayer“ perceptron). Síť MLP je jednosměrná (dopředná) síť trénovaná „s učitelem“. Topologie sítě MLP je tvořena vstupní vrstvou, výstupní vrstvou a nespecifikovaným počtem skrytých vrstev s plným propojením mezi vrstvami, ale bez propojení uvnitř vrstev. Typickým algoritmem učení sítě MLP je tzv. backpropagation (učení se zpětným šířením chyby), což je metoda založená na sestupném gradientu, která upravuje hodnoty vah, aby se minimalizovaly chyby mezi síťovými výstupy a očekávanými výstupy.

4.5.2 Detekce ferorezonance založená na UNS

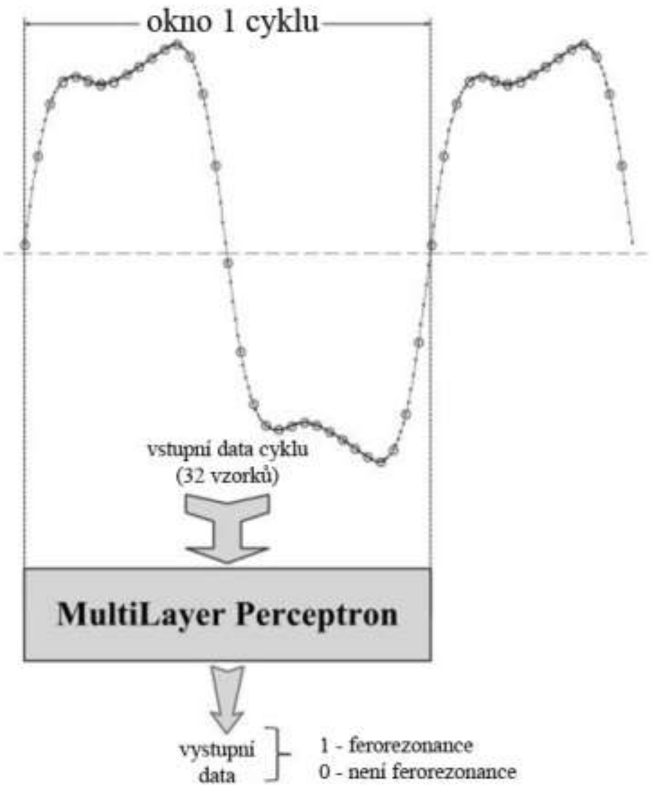
Tato detekční metoda analyzuje přímé vzorkování datového okna úplného cyklu napěťového signálu při základní frekvenci. K určení datového okna úplného cyklu se používá neuronová síť MLP. Jediná úprava dat, která je požadována, je snížení rozsahu vzorků mezi hodnotu 0 a 1.

Množství vstupních dat neuronové sítě je závislé na počtu vzorků v cyklu zachyceného signálu. Výběr vzorkovací frekvence se řídi následujícími třemi kritérii:

- Počet vzorků by měl být dostatečný pro získání spolehlivé reprezentace průběhu napětí.
- Počet vzorků by neměl být příliš vysoký, aby nepřehltil neuronovou síť.

Vzhledem k výše zmíněným třem kritériím se jako nejvhodnější jeví zvolit vzorkovací frekvenci v rozsahu od 30 do 35 vzorků na periodu (cyklus). V konkrétním případě, pokud s využitím vzorkovací frekvence 32 vzorků/cyklus, neuronová síť vyhodnotí signál jako ferorezonanční podle 32 vzorků jakožto vstupních dat, výstupem ze sítě je "1". Pokud signál není vyhodnocen jako

ferorezonanční, výstup se změní na "0". Základní schéma konkrétního případu navržené detekční metody je na obr. 4.94.



Obr. 4.94 Princip detekce ferorezonance [80]

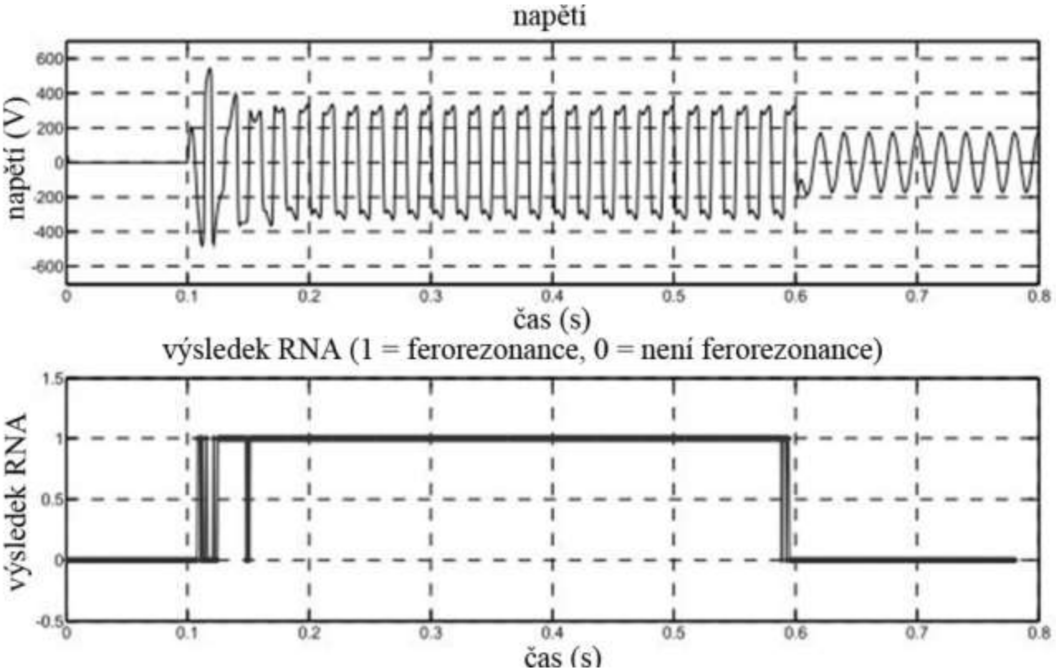
Průběh ferorezonančního napětí na PTN je možné získat pomocí simulace části elektrické sítě v prostředí MATLAB/Simulink. Je nutné simulovat nejen ferorezonanční podmínky, ale i výsledky ne-ferorezonančních oscilací, aby bylo dosaženo dostatečných provozních podmínek pro adaptační (učící) fázi UNS. Standardně lze zahrnout různé provozní podmínky a spínací operace a další situace náchylné na vznik ferorezonance.

Proces učení UNS lze provést pomocí softwarové aplikace SARENEUR [49], vyvinuté nástrojem Neural Network Toolbox v MATLABu.

Pro analýzu ferorezonančního přepětí, je nejlepší použít architekturu sítě MLP s jednou nebo s dvěma skrytými vrstvami. Pro neurony skryté vrstvy je vhodné použít sigmoidální aktivační funkce a v neuronech výstupní vrstvy funkce identity. Proces učení probíhá na základě učících algoritmů. Pro nelineární systémy se ukazuje být vhodnější využití Levenberg-Marquardtovo algoritmu, místo Gauss-Newtnovo algoritmu. Levenberg-Marquardtův algoritmus, jinak také nazývaný Damped least-squares (DLS), hledá numerické řešení lokálního minima nelineární funkce. Jeho výhodou je, že v mnoha případech nalezne řešení, i když iterace začíná velmi daleko od konečného minima.

Dostatečně přesné odezvy na ferorezonanční jev umožňují architektury sítí s více než 20 neurony v první skryté vrstvě a několika málo neurony v druhé skryté vrstvě.

Obr. 4.95 znázorňuje odezvu vycvičené UNS při ferorezonanci v simulovaném obvodu. V tomto konkrétním případě se UNS se skládá z 24 neuronů v první skryté vrstvě a 15 neuronů v druhé skryté vrstvě. Je jasně patrné, že jakmile se ferorezonanční oscilace objeví, UNS ji detekuje a na jejím výstupu se objeví hodnota 1, která představuje ferorezonanci. Následně je pak možné řešit utlumení těchto oscilací, např. vložením paralelního rezistoru do sekundárního obvodu napěťového transformátoru, nebo jinými způsoby popsanými v následující kapitole.



Obr. 4.95 Odezva UNS při ferorezonančním jevu [80]

Tento tlumicí obvod ale může v nerovnovážných podmínkách způsobit selhání nebo narušit přechodné odezvy transformátoru. Proto v poslední době několik autorů navrhovalo selektivní zapojení tlumivého obvodu a vyvíjely se nové metody detekce ferorezonance.

Uvedena metoda byla vyvinuta pomocí simulací ferorezonančních obvodů a zatím nebyla dostatečně prověřena praxí. Představuje ale novou možnost detekovat ferorezonanci v elektrické síti s vysokou přesností [80].

4.6 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:

- Vyhýbat se při návrhu konfiguracím 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 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 národní normě ČSN EN 60099-5 [N7] a mezinárodní normě IEC 71-2 [N12] je uvedeno, že prostřednictvím alespoň jednoho z výše uvedených principů by měly být tlumeny nebo omezeny dočasné ferorezonanční přepětí. Výše uvedené principy by však neměly sloužit pro výchozí volbu svodičů přepětí (jinými slovy bleskojistek), omezovačů přepětí, ba ani pro návrh izolace, pokud nevyhovovaly měření po provedených nápravách. Z toho vyplývá, že úrovně přepětí způsobené ferorezonancí nejsou brány v úvahu při proceduře koordinace izolace. A také následně omezovače přepětí mají zbytkové napětí vyšší než přepětí způsobené ferorezonancí, z čehož vyplývá, že neposkytují ochranu při vzniku ferorezonance. Aplikací výše uvedených principů, určených pro předcházení vzniku ferorezonance, docházíme k doporučení praktických řešení. V této kapitole jsou některé z nich popsány.

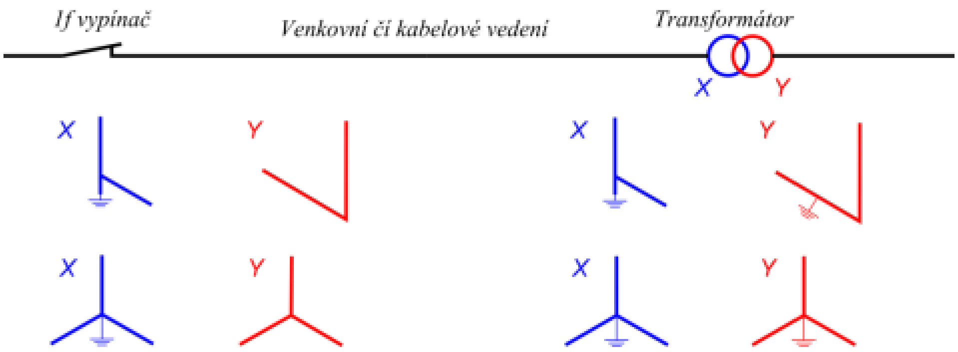
4.6.1 Trojfázový výkonový transformátor napájený z jedné nebo ze dvou fází

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).
- Vyhýbat 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. V zahraničí se používají speciální pojistky s návěstním kolíčkem. Prostřednictvím relé tak může působit na předřazený trojfázový vypínač, čímž dodatečně vypne všechny tři fáze. Odpínač je místo vypínače dosta-

čující, jelikož poruchy vypínají pojistky a provozní zatížení vypíná odpínač až do jmenovitého zatížení.

Použití omezovačů přepětí za účelem eliminace feorezonance nám dává zcela jiný náhled na tuto problematiku. Extrémně velká rezistance pro normální provozní napětí a velmi malá rezistance při zapůsobení omezovače vlivem přepětí, jsou specifické pro takovýto omezovač. K omezení ferorezonančního přepětí navrhuje literatura [23] použití omezovačů na sekundární straně transformátoru. Jelikož na primární straně transformátoru bývají proti vnějším přepětím připojeny omezovače běžně, tak tyto omezovače připojené na sekundární straně transformátoru jsou dalšími omezovači přepětí. Literatura pak uvádí, že jejich použití je ekonomickým a bezpečným řešením v případě použití distribučního transformátoru se sekundárním napětím 280 V nebo 480 V. Na obr. 4.96 je zobrazeno spojení dvou transformátorů, jež budou bránit vzniku ferorezonance za určitých podmínek. Větší měrou se tímto zabývá [N1].



Obr. 4.96 Zapojení vinutí transformátoru, která jsou méně náchylná na vznik ferorezonance

4.6.2 Transformátor napájený díky kapacitní vazbě se souběžným vedením

V případě transformátoru napájeného díky kapacitní vazbě se souběžným vedením je účelné eliminovat rezonanční oscilace rozladěním rezonančního obvodu, což vyžaduje změnu parametrů vedení nebo rychlé uzemnění volných úseků vedení anebo použití svodičů přepětí. Změnou pozice (transpozicí) fázových vodičů na stožáru nebo přídavným zatížením transformátorů, pak může být uskutečněna redukce dodávané energie ze sousedního vedení. Ovšem pro tento případ odpojení transformátoru od vedení, je právě tou nejjednodušší, nejlevnější a zároveň nejjistější variantou, která vede k zamezení vzniku ferorezonance, co nejdříve odpojit kombinaci transformátor-vedení od napájecího elektroenergetického systému.

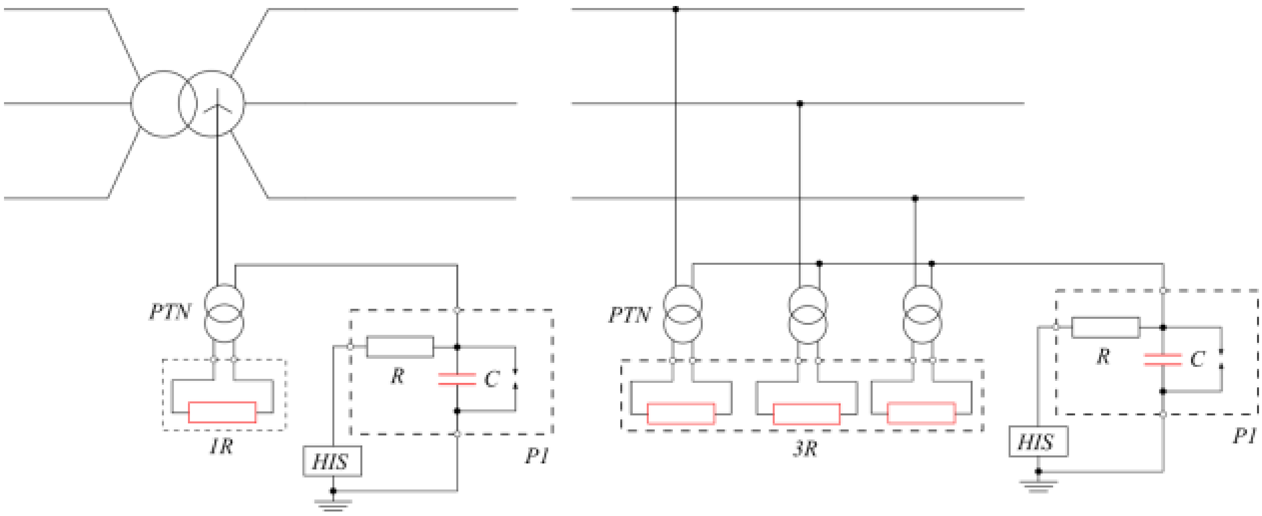
4.6.3 Transformátor v systému s izolovaným uzlem

Pro tento případ se doporučuje předcházet vzniku ferorezonance za pomoci hlídače izolačního stavu (HIS), jež mají velkou indukčnost, zapojením do obvodu další impedance, a to mezi uzel transformátoru a zem. Toto řešení se také nazývá „impedanční uzemnění nulového bodu“.

Použití impedance o čisté rezistanční hodnotě kolem 1500 Ω při 50 Hz, je doporučeno pro krátké NN elektroenergetické systémy napájené z transformátoru VN/NN [39].

HIS injektující stejnosměrný proud jsou vzhledem k napětí připojeny buď k sériově zapojenému rezistoru (Un < 5,5 kV) nebo k PTN zatíženému rezistorem, jedná-li se o VN systémy, viz obr. 4.97.

U přípojek a podružných rozvaděčů je nutné dbát, aby uzel spojení ostatních PTN připojených přes primární vinutí do stejného systému byl také uzemněn přes kapacitu kondenzátoru zařízení P1. Viz obr. 4.97.



Obr. 4.97 Příslušenství pro stále monitory izolace

4.6.4 Transformátor v systému s nepřímo uzemněným uzlem

Elektroenergetické systémy VN s uzlem uzemněným přes reaktor, jako na obr. 4.13 vpravo, je možné chránit pomocí následujících ochranných opatření:

- Kapacitní složku proudu (pro 50 Hz) překompenzovat rozladěním uzemňovacího reaktoru (zhášecí tlumivky) při zemním spojení.
- Zvýšit ztráty uzemňovací cívky přidáním dalšího rezistoru. Jelikož jednou z využívaných vlastností soustav s rezonančně uzemněným nulovým bodem je tzv. „samozhášecí“ efekt při zemních poruchách, nesmí přijatá opatření tento efekt ovlivnit.

4.6.5 Transformátor napájený přes energetický systém s vysokou kapacitou

V případě transformátorů napájených přes elektroenergetické systémy s vysokou kapacitou, viz obr. 4.12, se jako nejlepší řešení jeví eliminace rizikových konfigurací, které nastávají obzvláště v čase nízkého odběru, jako jsou noční hodiny, svátky, víkendy apod., kdy poklesne dodávka činného výkonu pod 10% jmenovitého zdánlivého výkonu transformátoru.

4.6.6 Omezovače přepětí

V kapitole 4.1.2 již bylo zmíněno, že k omezení ferorezonančních jevů v některých situacích lze použít omezovače přepětí [23], [81], [82], jež se používají k ochraně vedení před napěťovými impulsy. Tyto vysokonapěťové oscilace vznikající při ferorezonanci mohou omezovače zničit vlivem tepelného přetížení. Jednoduchým řešením může být zvýšení jmenovitého napětí omezovače (např. u 11 kV systémů i na 15 kV nebo dokonce 18 kV). Zvýšením jmenovitého napětí omezovače je sice transformátor stále chráněný před poškozením, ale zmenšuje úroveň ochrany systému před vnějším přepětím, čímž může dojít k poškození jiných zařízení.

Pro odstranění nedostatků těchto napěťových omezovačů je možné použít bezjiskřišťové omezovače přepětí typu ZnO k omezení intenzity a doby trvání ferorezonančních oscilací. Riziko poškození samotného omezovače i ostatních prvků systému je možné výrazně zredukovat vhodnou volbou jmenovitého napětí a tepelných poměrů omezovače.

4.6.7 Přístrojové transformátory napětí

U (dobře navržených) přístrojových transformátorů napětí čistě induktivního charakteru a kapacitních přístrojových transformátorů napětí se k potlačení vzniku ferorezonance často provádí následující opatření.

V případě jednofázového přístrojového transformátoru napětí připojeného mezi fázi a zem v soustavě s izolovaným nulovým bodem, což je případ v praxi nejčastější, může k ferorezonanci dojít přepětím mezi fází a zemí nebo důsledkem jednopólového zemního spojení. Tyto skutečností potvrzují nutnost zakomponovat ochranná opatření proti ferorezonanci.

K ferorezonanci může dojít i v případě napájení přístrojových transformátorů napětí ze dvou fází, kdy stačí, aby alespoň jeden z transformátorů byl přechodně napájen jen z jedné fáze. K této situaci může dojít při nerovnoměrném provozu všech tří fází, při práci pod napětím nebo při výpadku jedné fáze z důvodu zapůsobení ochranného prvku nebo přerušení vodiče jedné fáze.

Možná řešení jsou:

• Vyhnout se zapojení primárních vinutí přístrojových transformátorů do hvězdy s uzemněným uzlem v systémech s izolovaným nulovým bodem a to buď neuzemněním uzlu, nebo přepojením vinutí do trojúhelníku.

• V případě potřeby použití primárních vinutí zapojených do hvězdy s uzemněným uzlem kvůli potřebě měření netočivé složky napětí nebo jiného důvodu v systému s izolovaným uzlem nebo v systémech, kde nelze předvídat způsob uzemnění je potřeba provést následující opatření:

- Navrhnout transformátory tak, aby se hodnota indukce v magnetickém jádře pohybovala v nižších hodnotách, tedy přibližně mezi 0,4 - 0,7 T. Použitím této metody se zabrání inicializaci ferorezonance v případě přepětí (o velikosti nejméně dvojnásobku rozdílu napětí odpovídajícímu ohybu magnetizační charakteristiky a jmenovitému napětí).

- Vložit do obvodu další zátěžný rezistor (nebo i více) pro zvětšení ztrát obvodu, přičemž musí mít dostatečně nízkou rezistanci, aby efektivně tlumil ferorezonanci, ale současně

celková spotřeba výkonu vyhovovala podmínce požadované přesnosti přístrojového transformátoru.

Připojením zátěžných rezistorů do primárního obvodu napěťového transformátoru by nepříznivě ovlivnilo přesnost transformátoru, proto se zátěžné rezistory častěji připojují na sekundární vinutí. Návrh zátěžných rezistorů se řeší pro každý případ zvlášť, viz [17]. Při návrhu tlumících rezistorů je nutné zohlednit konstrukci přístrojových transformátorů. Transformátory mohou mít jedno nebo dvě sekundární vinutí. Vlastní spotřeba transformátorů v mnoha případech tlumí vzniklé oscilace, ale kritickým okamžikem je tzv. nabíjení transformátoru. Tento tlumící rezistor ale může způsobit chybu měření v případě, když transformátor nemá dostatečný výkon pro napájení tlumícího rezistoru i měření. Proto je nutné použít transformátor s vyšším výkonem. Tlumicí odpor se zapojuje paralelně k sekundárnímu vinutí každého transformátoru.

Vztahy pro výpočet odporu a výkonu tlumicího rezistoru pro přístrojový transformátor s jedním sekundárním vinutím jsou

$$R = \frac{U_2^2}{k.P_T - P_M} \quad (\Omega; V, -, VA, VA) \qquad P_R = \frac{U_2^2}{R} \quad (W; V, \Omega) \tag{4.2}$$

kde:

U_2 jmenovité napětí sekundárního vinutí

k koeficient dle IEC 186. Hodnoty v rozmezí 0,25 – 1

P_T jmenovitý výkon transformátoru

P_M požadovaný výkon pro měření

V případě měřicích transformátorů se dvěma měřicími vinutími, jedno vinutí plní funkci měřicí a druhé měří netočivou složku napětí. V tomto případě zapojujeme jeden tlumicí odpor do otevřeného trojúhelníka druhého (pomocného) vinutí. U těchto transformátorů není ovlivněna přesnost měření tlumicím odporem, protože odporem protéká proud pouze v nesouměrných stavech.

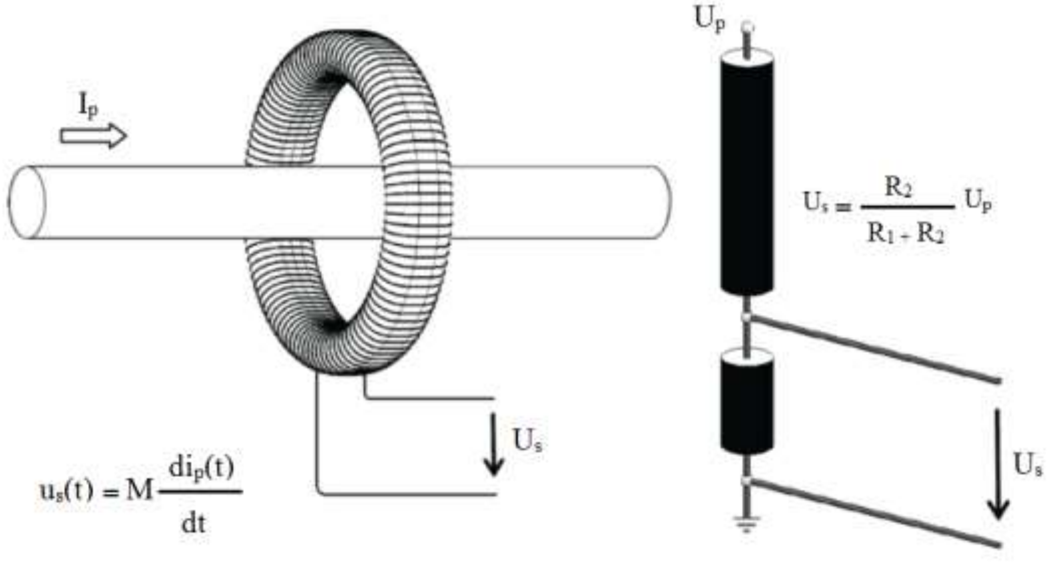
Hodnoty tlumicích odporů se většinou pohybují od 50 do 100 Ω a výkon 100 až 250 W.

4.6.8 Elektronické přístrojové transformátory

Jak bylo již dříve uvedeno, jednou z hlavních podmínek vzniku ferorezonance je přítomnost nelineárních prvků v systému. Proto jako jedno z vhodných řešení se nabízí nahradit přístrojové transformátory napětí zařízením, které pracuje na principech, které znemožňují vznik ferorezonance. Takovéto zařízení jsou elektronické přístrojové transformátory neboli senzory. Tyto prvky mají lineární charakteristiku a navíc mají řadu podstatných výhod. Jejich princip je již dávno znám a nové technologie nám umožňují použít tyto zařízení s i pro měření s vysokou požadovanou přesností.

Moderní koncepce také slučuje měřicí transformátory napětí a proudu v jedno zařízení. Jsou to tzv. kombinované elektronické transformátory (viz obr. 4.98) a viz ČSN EN 60044 [N4], [N5], [N10], [N11].

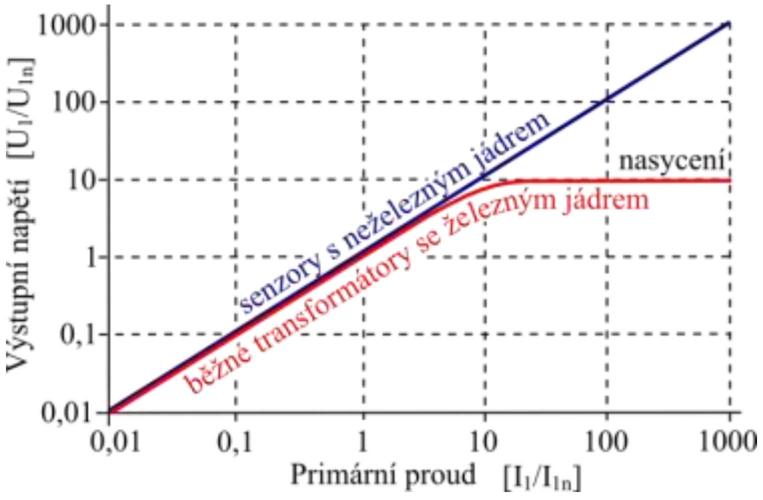
Obr. 4.98 Kombinované elektronické transformátory KEVCD od firmy ABB [F1]



Obr. 4.99 proudový a napěťový senzor [F1]

Proudový senzor je založen na principu Rogowského cívky, viz obr. 4.99. Tento princip popsal v roce 1912 Walter Rogowsky, jedná se tedy o řešení více jak 100 let staré. Základní myšlenkou je využití napětí indukovaného střídavými proudy ve vzduchové cívce. V praxi se používá jako jádro cívky kostra z neferomagnetického materiálu ve tvaru toroidu. Při měření proudu I_p musí cívka obepínat vodič s protékajícím proudem. Protékající proud vytváří střídavé magnetické pole, které v cívce indukuje napětí. Pro měření napětí na vývodech cívky se používá vysokoohmová metoda. Obvyklá hodnota tohoto napětí bývá 150 mV.

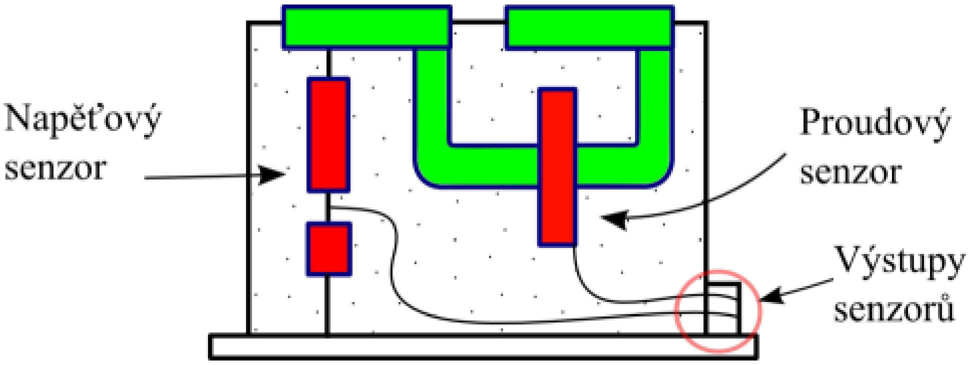
Velkou výhodou těchto senzorů je velký měřicí rozsah a to až do zkratových proudů, bez poškození senzoru. V celém rozsahu je závislost proudu na napětí lineární.



Obr. 4.100 Porovnání klasických PTN a senzoru z hlediska VA charakteristiky

Napěťový senzor je založen na principu rezistančního či kapacitního děliče napětí, viz obr. 4.99. V porovnání s klasickými přístrojovými transformátory se u senzorů obvykle používá dělící poměr 10 000:1. Výstupní napětí má nízkou úroveň, je tedy nutné použít stínění.

Stejně jako u proudových senzorů je odezva na vstupní signál lineární v daném rozsahu. Z důvodu absence feromagnetického jádra nemůže dojít k jeho saturaci a tím ani k ferorezonanci. Senzory lze použít jak pro analogové měření, tak i za pomoci analogovo-digitálních převodníků k přenosu naměřených hodnot pomocí různých komunikačních protokolů a to pro účel měření i chránění. Kombinovaný senzor je konstrukční provedení, kde jsou jak proudový tak i napěťový senzor sloučeny v jednom zařízení, což umožní zmenšení rozměrů a investičních nákladů. Toto provedení lze schematicky vidět na obr. 4.101. Standardní měřicí transformátory napětí a proudu nelze konstruovat jako jedno zařízení. Velkou výhodou senzorů je jejich odolnost vůči poruchovým stavům a nedovoleným manipulacím. Zkrat na sekundárním vinutí u přístrojového transformátoru napětí způsobí destrukci, přičemž pro senzory je tento stav bezpečný. U přístrojových transformátorů proudu má rozpojení sekundárního vinutí destruktivní následky, zatímco u senzorů je tento stav bezpečný.



Obr. 4.101 Schéma kombinovaného senzoru [F1]

Stručné srovnání senzorů s napěťovým a proudovým transformátorem je uvedeno v Tab. 4.2.

Tab. 4.2 Srovnání přístrojových transformátorů a senzorů [F1],[28].

	PTN/PTP	Senzory
Výstup	1/5A / 100/110V	150mV/2V
VA charakteristika	nelinearní	lineární
Saturace	Ano	Ne
Stínění	Ne	Ano
Hmotnost	40-60 kg (PTN+PTP)	2-25 kg (kombinovaný senzor)
FEROREZONANCE	**ANO**	**NE**

5 ZÁVĚR

Elektrizační soustava je vzhledem k velkému počtu prvků v systému, jako jsou transformátory, vzdušné a kabelové vedení, různé ochranné a měřící 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, řídící 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 měřící 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 indukčnost 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 sytému 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, muže 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 pomoci 32 až 512 menších lineárních segmentů, co umožní velmi přesný popis této charakteristiky. Nevýhodou je ale prodloužení strojového času simulace. Saturace je popsaná 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.

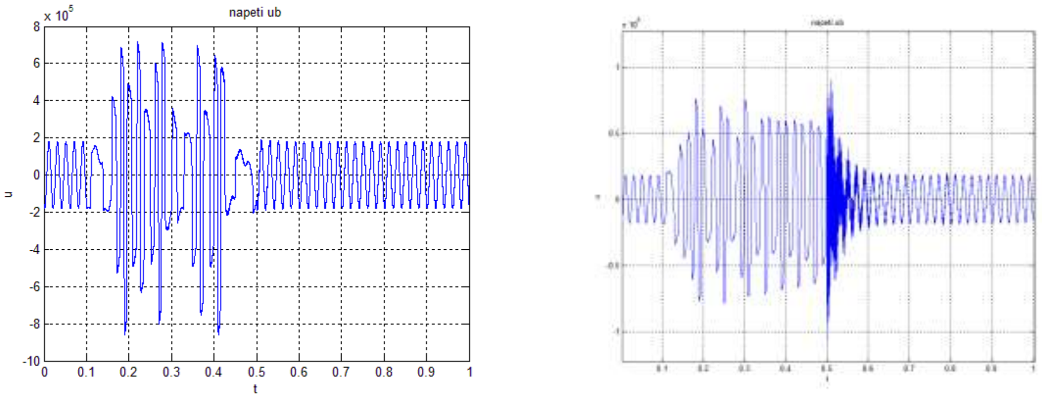
Nevýhodou modelu transformátoru simulačního nástroje MATLAB simulink – SimPowerSystems toolbox je, že pro výpočet vyžaduje krátký krok výpočtu. Simulink, umožňuje automatické nastavení kroku, co v oblasti lineární částí charakteristiky výpočet značně zrychlí, ale ne dostatečně. V případě nastavení fixního 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 síti a následně dát pokyn k vytvoření dalších opatření k utlumení ferorezonančních oscilací. Konkrétní popis metody detekce uvádí kapitola 4.5.2.

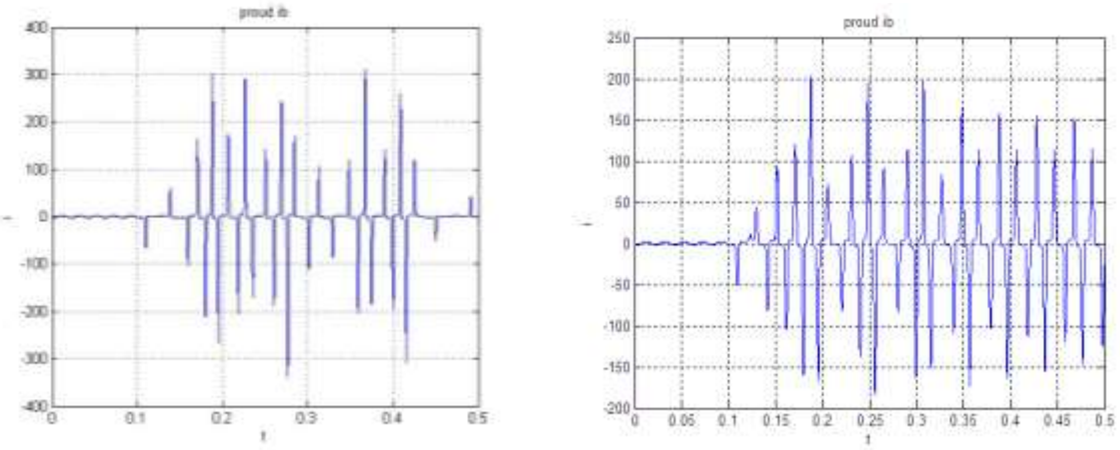
5.1.2 Vliv hystereze na výskyt a průběh ferorezonančního jevu

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.



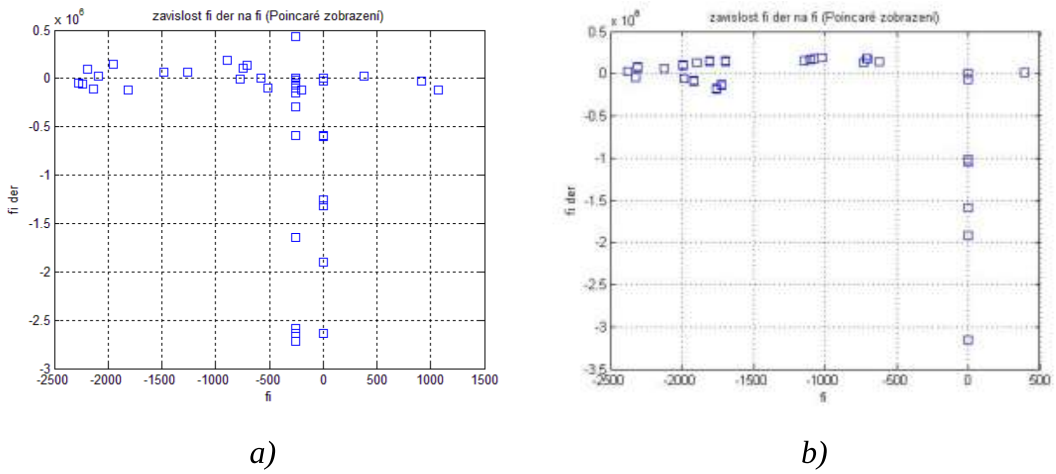
a) *b)*

Obr. 5.1 Průběh ferorezonančního přepětí a) bez uvažování hystereze, b) s uvažováním hystereze



a) *b)*

Obr. 5.2 Průběh proudu a) bez uvažování hystereze, b) s uvažováním hystereze



Obr. 5.3 Fázový prostor (Φ'_b, Φ_b) - Poincarého zobrazení; a) bez uvažování hystereze, b)s uvažováním hystereze

Výsledky simulace s uvažováním hystereze 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 hystereze přítomny přepěťový ráz v čase 0.5 s. Na základě výrazně podobného poincarého zobrazení (obr. 5.3), lze konstatovat, že ferorezonanční jev hystereze ovlivňuje jen natolik, že pro účely diagnostiky přítomnosti ferorezonančního jevu lze hysterezi v matematickém modelu zanedbat.

5.1.3 Vyšetření krizových scénářů v ES

V kapitole 4.3.2 byla pomocí nástroje PSCAD podrobně rozebraná 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.

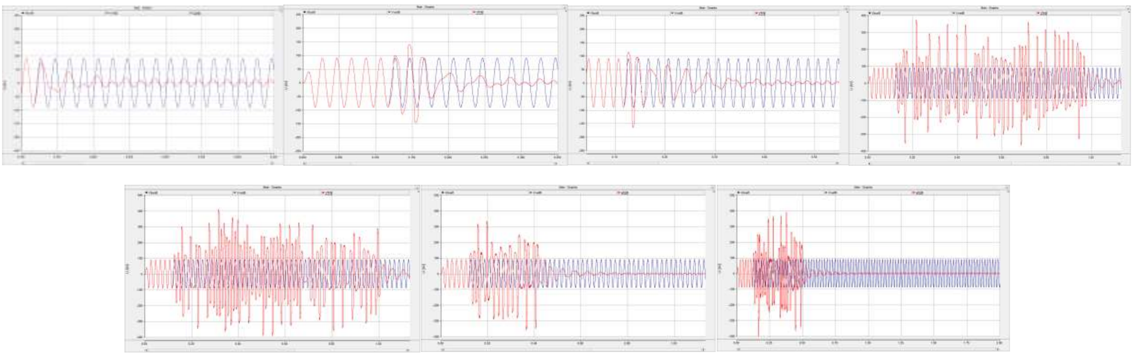
5.1.4 Možnosti snížení pravděpodobnosti vzniku ferorezonance a nalezení limitních podmínek pro vznik ferorezonančního jevu

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 fe-

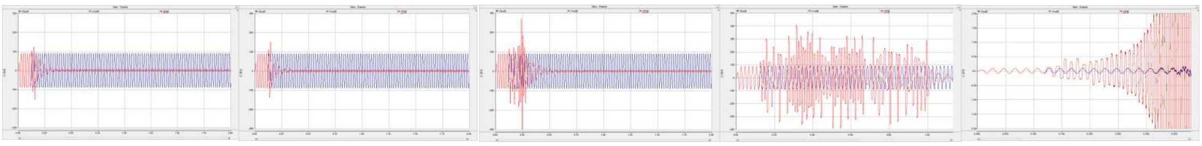
rorezonanci účinně tlumit, nebo ještě lépe, aby k ní ani nemohlo dojít. Kompletní analýza tohoto problému je provedena v kapitole 4.3.2.

První měněný parametr byl délka vedení VVN. Nezatížené, nebo jen minimálně zatížené vedení představuje kapacitu, která se může dostat do rezonance s indukčnosti 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).

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).

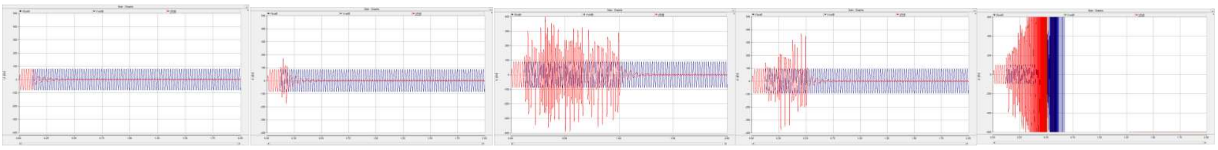


Obr. 5.4 Průběh napětí při délkách vedení 10, 20, 30, 35, 40, 50, 60km



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%Un, -5%Un, Un, +5%Un, +10%Un

5.2 Přínosy disertační práce a shrnutí 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.

Vhodným doplněním provedeného výzkumu by mělo být připravení měření za účelem ověření přesnosti vytvořených simulací. Problém při tomto měření ale vyplývá z podstaty ferorezonance, která v reálných sítích často probíhá chaoticky a z toho důvodu, je potřeba zvážit řadu bezpečnostních opatření.

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

[1] AMARAPUR, B., PATIL, N., The facial features extraction for face recognition based on geometrical approach, IEEE, 345 E 47TH ST, NEW YORK, NY 10017 USA, 2006, p. 99-106, ISBN: 978-1-4244-0037-9

[2] BAKAR, A.H.A., LIM, C.H., MEKHILEF, S., Investigation of transient performance of Capacitor Voltage Transformer, IEEE, 345 E 47TH ST, NEW YORK, NY 10017 USA, 2006, p. 509-515, ISBN: 978-1-4244-0273-1

[3] BARBISIO, E., BOTTAUSCIO, O., CHIAMPI, M., CHHHIAMPI, M., CROTTI, G., GIORDANO, D., Experimental and modelling analysis of ferroresonant electric circuits, ELSEVIER SCIENCE BV, PO BOX 211, 1000 AE AMSTERDAM, NETHERLANDS, 2007, p. 299-301, ISSN: 0304-8853

[4] BÁTORA, B. Hysteresis as the sake of non-linearity elements in the power system and its influence on the creation of ferroresonance. In *Proceedings f the 14th conference student EEICT 2008 Volume 3.* Ondráčková 105, Brno, Ing. Zdeněk Novotný CSc. 2008. p. 139 - 143. ISBN 978-80-214-3616-9.

[5] BÁTORA, B.; TOMAN, P. Ferorezonance a ferorezonanční přepětí. In *ELEN 2008.* první. ČVUT v Praze, Masarykova kolej, Thákurova 1, Praha 6, Národní komitét CIGRE České a Slovenské republiky. 2008. p. 1 - 5. ISBN 978-80-254-2293-9.

[6] BÁTORA, B.; TOMAN, P. Ferorezonanční jev a příčiny jeho vzniku. In *Proceedings of the 9th international scientific conference Electric Power Engineering 2008.* first. Brno, VUT v Brně UEEN. 2008. p. 221 - 223. ISBN 978-80-214-3650-3.

[7] BÁTORA, B.; TOMAN, P. Simulace vzniku a průběhu ferorezonančního přepětí v prostředí PSCAD. In *ELEN 2010.* první. ČVUT v Praze, Masarykova kolej, Thákurova 1, Praha 6, Národní komitét CIGRE České a Slovenské republiky. 2010. p. 1 - 7. ISBN 978-80-254-8089-2.

[8] BÁTORA, B.; TOMAN, P. The Influence of Parameters of Electrical Power System on Rise and Course of Ferroresonance Overvoltage. In *Proceedings of the 11th International Scientific Conference Elecric Power Engineering 2010.* 1. Brno University of Technology, FEEC, Department of Electrical Power Engineering. 2010. p. 153 - 155. ISBN 978-80-214-4094-4.

[9] BÁTORA, B.; TOMAN, P.; TOPOLÁNEK, D.; BELATKA, M. Hysteresis and its influence on the creation of ferroresonance. In *Modern technique and technologies MTT 2008.* Tomsk, TPU Press. 2008. p. 9 - 12. ISBN 978-1-4244-1609-7.

[10] BRETTSCHNEIDER, Z. Nelineární jevy v elektrizační soustavě. Disertační práce, ČVUT v Praze 2011

[11] BRETTSCHNEIDER, Z. Nestandardní jevy v elektroenergetických soustavách. Diplomová práce, ČVUT v Praze 2004

[12] 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.

[13] DOLAN, E. J., GILLIES, D. A., KIMBARK, E. W. Ferroresonance in a Transformer Switched with an EHV Line, IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems, 1972, Vol. PAS-91, s. 1273-1280.

[14] FAN, L., SUN, C.X., WEN-XIA, S.M., LIAO, R.J., FEI, G., Chaos control of ferroresonance system based on RBF-maximum entropy clustering algorithm, ELSEVIER SCIENCE BV, PO BOX 211, 1000 AE AMSTERDAM, NETHERLANDS, 2006, vol. 357, p. 218-223, ISSN: 0375-9601

[15] 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

[16] FERNANDES, D., NEVES, W.L.A., VASCONCELOS, J.C.A., GODOY, M.V., Comparisons between lab measurements and digital simulations for a coupling capacitor voltage transformer, IEEE, 345 E 47TH ST, NEW YORK, NY 10017 USA, 2006, p. 844-849, ISBN: 978-1-4244-0287-8

[17] FERRACI, P. Ferroresonance - Cahier Technique Schneider no 190, Groupe Schneider, 1998.

[18] GECYS, S., MORKVENAS, A., ROYANSKAS, A., TICKA, V., The working conditions investigation of overvoltagers arresters during multiple ground fault, VILNIUS GEDIMINAS TECHNICAL UNIV PRESS, TECHNIKA, SAULETEKIO A1. 11, VILNIUS-40, LT-10233, LITHUANIA, 2005, p. 237-240, IDS Num-

ber: BDS86

[19] 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

[20] HASMAN, T.: Přepětí v elektroenergetických soustavách, ČVUT Praha, 1997.

[21] HOLODNIOK, M., KLÍČ, A., KUBÍČEK, M., MAREK, M. Metody analýzy nelineárních dynamických modelů, Academia Praha, 1986.

[22] CHARALAMBOUS, C., WANG, Z.D., OSBORNE, M., JARMAN, P., Sensitivity studies on power transformer ferroresonance of a 400kV double circuit, *INST Engineering technology – IET, Michael Faraday house six hills way stevenage*, Hertford England, Mar.2008, vol. 2, no. 1, p. 159-166. ISSN 1751 - 8687.

[23] CHEN, X.S., NEUDORFER, P., CHENG, S. Simulation of Ferroresonance in Low-Loss Grounded Wye-Wye Transformers Using a New Multi-Legged Transformer Model in EMTP, IEE 2nd International Conference on Advances in Power System Control, Operaion and Management, s. 718-724, Hong Kong, 1993.

[24] JACOBSON, D.A.N, SWATEK, D.R., MAZUR, R.W. Mitigating Potential Transformer Ferroresonance in a 230 kV Converter Station, Proceedings of IEEE Transmission and Distribution Conference, 1996, s. 269-275.

[25] JACOBSON, D.A.N. Field Testing and Analysis of Ferroresonance in a 230 kV Power System, Proceedings of the 1999 Graduate Students Conference GRADCON'99, Winnipeg, Canada, 1999.

[26] JACOBSON, D.A.N., MENZIES, R.W., Investigation of Station Service Transformer Ferroresonance in Manitoba Hydro's 230-kV Dorsey Converter Station", Proceedings of the 2001 Intl. Conf. on Power Systems Transients, June 24-28, Rio de Janeiro.

[27] JANSSENS, N., VAN CRAENENBROECK, T., Van DOMMELEN, D., Van De MEULEBROEKE, F. Direct Calculation of the Stability Domains of Three-Phase Ferroresonance in Isolated Neutral Networks with Grounded-Neutral Voltage Transformers, IEEE Transaction on Power Delivery, 1996, Vol. 11, No. 3, s. 1546-1553.

[28] JAVORA, R. Analýza a simulace ferorezonančních jevů v elektroenrgetických soustavách, Disertační práce, VUT v Brně 2004

[29] JAVORA, R., IWAHARA, M., YAMADA, S., Effect of dynamic core losses on ferroresonance phenomena, Kanazawa University, 2-40-20 Kodatsuno, 920-8667 Kanazawa, Japan, 2005, p.156-161,

[30] JAVORA, R., YAMADA, S., IWAHARA, M. Ferroresonance Phenomena, Proceedings of the 2nd Japan, Australia, New Zealand Join Seminar on Applications of Electromagnetic Phenomena in Electrical and Mechanical Systems, JSAEM and Kanazawa University, Kanazawa, 2003, s. 271-278. (JSAEM Studies in Applied Electromagnetics and Mechanics, Vol. 14).

[31] JIMOHH, A.A., MUNDA, J., BRITTEN, A.C., NICOLAE, D.V, Controlled power flow capacitive divider for electric power tapping, ACTA PRESS ANAHEIM, PO BOX 2481, ANAHEIM, CA 92814 USA , 2006, p. 113-118, ISBN: 978-0-88986-614-0

[32] KAUR, G., VAZIRI, M., Effects of distributed generation (DG) interconnections on protection of distribution feeders, IEEE, 345 E 47TH ST, NEW YORK, NY 10017 USA, 2006, p. 3061-3068, ISBN: 978-1-4244-0492-6

[33] KAVASSERI, R.G., Analysis of subharmonic oscillations in a ferroresonant circuit, ELSEVIER SCI LTD, THE BOULEVARD, LANGFORD LANE, KIDLINGTON, OXFORD OX5 1GB, OXON, ENGLAND, 2006, vol. 28, p. 207-214, ISSN: 0142-0615

[34] 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.

[35] KLUCH, K., VASIL', P. Rezonančné prepätia v elektrických siet'ach, Sborník přednášek z IX. Mezinárodní vědecké konference „Elektroenergetika'98", FEI TU Košice, Vysoké Tatry - Stará Lesná, 1998, s. 247-250.

[36] KOČIŠ, L., ŠVANCAR, M. Jednoduchý model ferorezonance. Sborník Prvního celostátního semináře uživatelů EMTP-ATP, VŠB-TU Ostrava, 1995, s. 95-06.

[37] KOPEČEK, J., DVOŘÁK, M. Přístrojové transformátory (měřící a jistící), Academia Praha, 1966.

[38] KOUŘIL, F., VRBA, K.: Teorie nelineárních a parametrických obvodů, SNTL/ALFA Praha, 1982.

[39] LACROIX, B., CALVAS, R. Earthing systems in LV – Cahier Technique Merlin Gerin No 172.

[40] LEI, Y.M., LIU, Y.J., SUN, H.X., LIU, H.X., Control and application of chaos in electrical system, IEEE, 345 E 47TH ST, NEW YORK, NY 10017 USA, 2005, p. 1477-1481, ISBN: 0-7803-9091-1

[41] LEI, Z.M., LIU, Y.J., SUN, H.X., CHANG., H.J., Research on the control and application of chaos in an electrical system, SPRINGER-VERLAG BERLIN, HEIDELBERGER PLATZ 3, D-14197 BERLIN, GERMANY, 2006, vol. 3930, p. 142-148, ISSN: 0302-9743

[42] LI, H.W., FAN, Y., Impact of breaker operations on ferroresonance in power systems, IEEE, 345 E 47TH ST, NEW YORK, NY 10017 USA, 2007, vol. 3, p. 680-682, IDS Number: BGX85

[43] LI, H.W., FAN, Y., SHI, R., Chaos and ferroresonance, IEEE, 345 E 47TH ST, NEW YORK, NY 10017 USA ,2006, p. 1853-1856, ISBN: 978-1-4244-0037-9

[44] LI, Y., SHI, W., LI, F.R., Novel analytical solution to fundamental ferroresonance – Part 1: Power frequency excitation characteristic *IEEE inc, 445 hoes lane*, Piscataway, NJ USA, 2006, vol. 21, p. 788 - 793. ISSN 0885 - 8977.

[45] LI, Y., SHI, W., LI, F.R., Novel analytical solution to fundamental ferroresonance – Part 2 Criterion and elimination *IEEE inc, 445 hoes lane*, Piscataway, NJ USA, 2006, vol. 21, p. 794 - 800. ISSN 0885 - 8977.

[46] LIND, M.G.J., DUMONT, G.A., DUNFORD, W.G., Analysis of a circuit exhibiting ferroresonance, IEEE, 345 E 47TH ST, NEW YORK, NY 10017 USA, 2006, p. 3686-3689, ISBN: 978-0-7803-9389-9

[47] MACUR, J.: Úvod do teorie dynamických systémů a jejich simulace, VUT Brno, 1995.

[48] MARK, S.T., DELA ROSA, F., Waveform distortion issues based on field data recordings in MV and LV facilities, IEEE, 345 E 47TH ST, NEW YORK, NY 10017 USA, 2005, p. 2334-2340, ISBN: 0-7803-9156-X

[49] MAZON, A.J., ZAMORA, I., GRACIA, J., SAGASTEBEITIA, K.J., SAENZ, J.R. Selecting ANN structures to find transmission faults. IEEE Computer Applications in Power. Vol.14, nº3, pp.44-48, July 2001.

[50] MERTLOVÁ, J., KOCMICH, M. Ferorezonance a její důsledky, Energetika, 1997, Vol. 47, č.10, s. 324-326.

[51] MOKRYANI, G., HAGHIFARRI, M.R., ESMAEILPOOR, J., A novel detection and classification of ferroresonance using wavelet transform and LVQ neural network in distribution networks, ACTA PRESS ANAHEIM, PO BOX 5124, ANAHEIM, USA, 2007, p. 186-192. ISBN 978-0-88986-689-8

[52] MOZINA, C.J., Distributed generator interconnect protection practices, IEEE, 345 E 47TH ST, NEW YORK, NY 10017 USA, 2006, p. 1164-1170, ISBN: 978-0-7803-9193-2

[53] NEVES W. L. A., DOMMELl, H.W. On Modelling Iron Core Nonlinearities, IEEE Transactions on Power Systems, 1993, Vol. 8, No. 2, s. 417-425.

[54] NICOLAE, D.V., JIMOH, A.A., BRITTEN, A.C., Active power control for capacitive divider tapping method, IEEE, 345 E 47TH ST, NEW YORK, NY 10017 USA, 2006, p. 179-184, ISBN: 978-1-4244-0120-8

[55] NOHÁČ, K., Simulační analýzy přechodných dějů v elektrizační soustavě, Habilitařní práce, Plžeň, 2006

[56] NOVÁK, M., Přechodový děj při zapnutí transformátoru – způsoby omezování zapínacího proudu, disertační práce, Liberec, 2003

[57] PIASECKI, W., FLORKOWSKI, M., FULCZYK, M., MAHOMEN, P., NOWAK, W., Mitigating ferroresonance on voltage transformers in ungrounded MV networks. *IEEE inc, 445 hoes lane*, Piscataway, NJ USA, 2007, vol. 22, p. 2362 - 2369. ISSN 0885 - 8977.

[58] RACINE, M.S., PARHAM, J.D., RASHID, M.H. An overview of uninterruptible power supplies, IEEE, 345 E 47TH ST, NEW YORK, NY 10017 USA, 2005, p. 159-164, ISBN: 0-7803-9255-8

[59] RAZÍM, M., ŠTECHA, J. Nelineární systémy, ČVUT Praha, 1997.

[60] RAZÍM, M., KOTEK, Z., KUBÍK, S. Nelineární dynamické systémy, ČVUT Praha 2002.

[61] REINBOTH, H. Vlastnosti a použití magnetických materiálů. Praha, SNTL 1975

[62] REZAEI-ZARE, A., IRAVANY, R., SANAYE-PASSAND, M., MOHSENI, H., SHAHROKH, F.. An Accurate Hysteresis Model for Ferroresonance Analysis of a Transformer. In *IEEE TRANSACTIONS ON POWER DELIVERY, VOL. 23, NO. 3, JULY 2008*

[63] 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

[64] 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 hoes lane*, Piscataway, NJ USA, 2007, vol. 22, p. 919 – 929. ISSN 0885 - 8977.

[65] SAKARUNG, P., CHATRATANA, S. Application of PSCAD/EMTDC and Chaos Theory to Power System Ferroresonance Analysis, International Conference on Power Systems Transients, Canada, 2005.

[66] SAKARUNG, P., INTARASIN, T. Analysis of overvoltages due to Ferroresonance in Underground Cable Distribution Systems by Using PSCAD/EMTDC, The 27th Electrical Engineering Conf., Thailand, 2004.

[67] SANAYE-PASAND, M., MOHSENI, H., FARHANGI, S., REZAEI-ZARE, A., IRAVANI, R., Effects of initial conditions on ferroresonance in power transformers using Preisach theory, UNIV WEST ENGLAND-UWE, FRENCHAY CAMPUS, COLDHARBOUR LANE, BRISTOL, BS16 1QY, ENGLAND, 2005, p. 845-850, ISBN: 1-86043-365-0

[68] SANAYE-PASAND, M., REYAEI-ZARE, A., MOHSENI, H., FARHANGI, S., IRAVANI, R., Comparison of performance of various ferroresonance suppressing methods in inductive and capacitive voltage transformers, IEEE, 345 E 47TH ST, NEW YORK, NY 10017 USA , 2006, p. 279-286, ISBN: 978-0-7803-9525-1

[69] SIMA, W.X., LU, F., SUN, C.X., RIAO, R.J., YANG, Q., Chaos control of ferroresonance system based on improved RBF neural network, CHINESE PHYSICAL SOC, P O BOX 603, BEIJING 100080, PEOPLES R CHINA, 2006, vol. 55, p. 5714-5720, ISSN: 1000-3290

[70] SONG, Y.D., YUAN, S., ZHAO, C.F., JIA, Z.F., Analysis and selection of neutral grounding modes in cable distribution network, IEEE, 345 E 47TH ST, NEW YORK, NY 10017 USA, 2007, p. 518-521, ISBN: 978-1-4244-0894-8

[71] SUTHERLAND, P.E., MANSOOR, A., Conversion of ungrounded systems to high-resistance grounding systems, IEEE, 345 E 47TH ST, NEW YORK, NY 10017 USA, 2006, p. 40-45, ISBN: 978-1-4244-0335-6

[72] SWIFT, G.W. An Analytical Approach to Ferroresonance, IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems, 1969, Vol. PAS-88, No. 1, s. 42-46.

[73] 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.

[74] 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.

[75] TOMAN, P. a kol. Provoz distribučních soustav. ČVUT v Praze, 2011, ISBN 978-80-01-04935-8

[76] TOMAN, P., Analýza nestandardních typů přepětí v elektroenergetických soustavách, Habilitační práce, Brno, 2004

[77] TSAO, T.P., NINE, C.C., Analysis of ferroresonant overvoltages at Maanshan Nuclear Power Station in Taiwan, IEEE-INST ELECTRICAL ELECTRONICS ENGINEERS INC, 445 HOES LANE, PISCATAWAY, NJ 08855 USA, 2006, vol. 21, p. 1006-1012, ISSN: 0885-8977

[78] VAL ESCUDERO, M., DUDURYCH, I., REDFERN, M.A., Characterization of ferroresonant modes in HV substation with CB grading capacitors, ELSEVIER SCIENCE SA, PO BOX 564, 1001 LAUSANNE, SWITZERLAND, 2007, vol. 77, p. 1506-1513, ISSN: 0378-7796

[79] VALVERDE, V., MAZON, A.J., ZAMORA, I., BUIGUES, G.,. Ferroresonance in Voltage transformers: Analysis and simulation. International conference on renewable energies and power quality (ICREPQ'14), Sevilla 28,29 and 30 Mach 2007

[80] 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

[81] WALLING, R. A., HARTANA, R. K., RECKARD, R. M., SAMPAT, M. P., BALGIE, T.R. Performance of Metal-oxide Arresters Exposed to Ferroresonance in Padmount Transformers, IEEE Transactions on Power Delivery, 1994, Vol. 9, No. 2, s. 788-795.

[82] WANG, F., RODRIGUEZ, A. Analysis of the Effect of Metal Oxide Arresters on System Resonance Using the Describing Function Method, IEEE Transaction on Power Systems, 1993, Vol. 8, No. 2.

[83] WIGGINS, S.: Introduction to Applied Nonlinear Dynamical Systems and Chaos, Springer- Verlag New York, 1990.

[84] WOODFORD, D. A. Solving Ferroresonance Problem when Compensating a DC Converter Station with Series Capacitor, IEEE Transactions on Power Systems, 1996, Vol. 11, No. 3, s. 1325-1331.

[85] WORNLE, F., HARRISON, D.K., ZHOU, C., Analysis of Ferroresonant Circuit Using Bifurcation Theory and Continuation Techniques, IEEE Trans. Power Delivery, Vol. 20, Jan. 2005.

[86] YILDIRIM, S., AKINCI, T.C., SEKER, S., EKREN, N., Determination of the characteristics for ferroresonance phenomenon in electric power systems, World Academy of Science, Engineering and Technology 55 2009

[87] ZHANG, B., Lu, T.C., Du, X.L., Nonlinear dynamic analysis of power system ferroresonance, WATAM PRESS, C/O DCDIS JOURNAL, 317 KAREN PLACE, WATERLOO, ONTARIO N2L 6K8, CANADA, 2006, vol. 13E, p. 244-248, ISSN: 1492-8760

Normy

[N1] ANSI/IEEE C57.105: 1992 IEEE Guide for Application of Transformer Connections in Three-Phase Distribution Systems.

[N2] ČSN 33 30 60: 1984 Ochrana elektrických zařízení před přepětím

[N3] ČSN 351302: 1997 Přístrojové transformátory napětí.

[N4] ČSN EN 60044-7: 2000 Přístrojové transformátory, Část 7: Elektronické transformátory napětí.

[N5] ČSN EN 60044-8: 2003 (Návrh) Přístrojové transformátory, Část 8: Elektronické transformátory proudu.

[N6] ČSN EN 60099-4: 1991 Svodiče přepětí. Část 4: Bezjiskřišťové omezovače přepětí pro soustavy se střídavým napětím

[N7] ČSN EN 60099-5: 1996 Svodiče přepětí, Část 5: Doporučení pro volbu a užití.

[N8] ČSN EN 60099-5: 1996 Svodiče přepětí. Část 5: Doporučení pro volbu a použití

[N9] ČSN EN 60143: 1997 Sériové kondenzátory pro výkonové systémy, Část 1: Všeobecně - Provedení, zkoušky a dimenzování - Bezpečnostní požadavky – Pokyny pro montáž.

[N10] IEC 60044-7: 1999 Instrument transformers, Part 7: Electronic voltage transformers.

[N11] IEC 60044-8: 2002 Instrument transformers, Part 8: Electronic current transformers.

[N12] IEC 71-2: 1993 Insulation Co-ordination, Part 2: Application Guide.

Firemní materiály a katalogy

[F1] ABB: Medium voltage product: KEVCD A, Indoor combined sensor; Indoor current sensor, 2011

ABB: High voltage product, 2009

[F2] ETD Transformátory: Power transformwres – technical information, 2010

[F3] Passoni-Villa: Capacitor Voltage Transformer Type C2VT – General Instruction Book, Publication No. 5003.

Použitý software

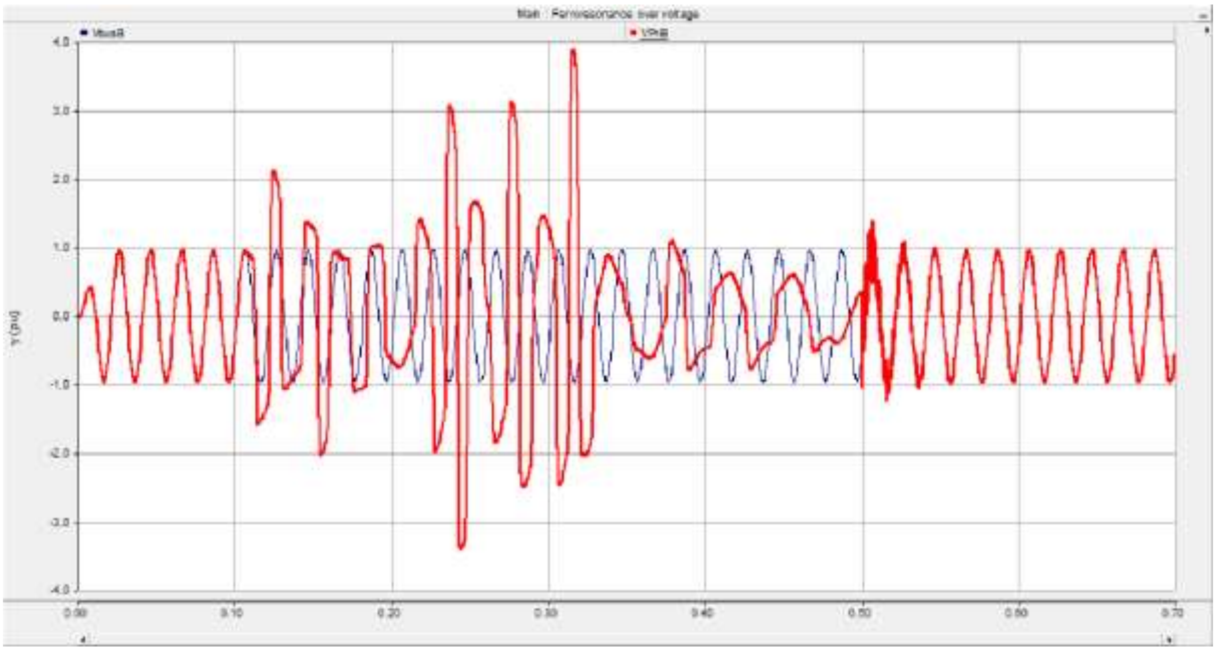
Matlab 2012b

Simulink + powersim toolbox

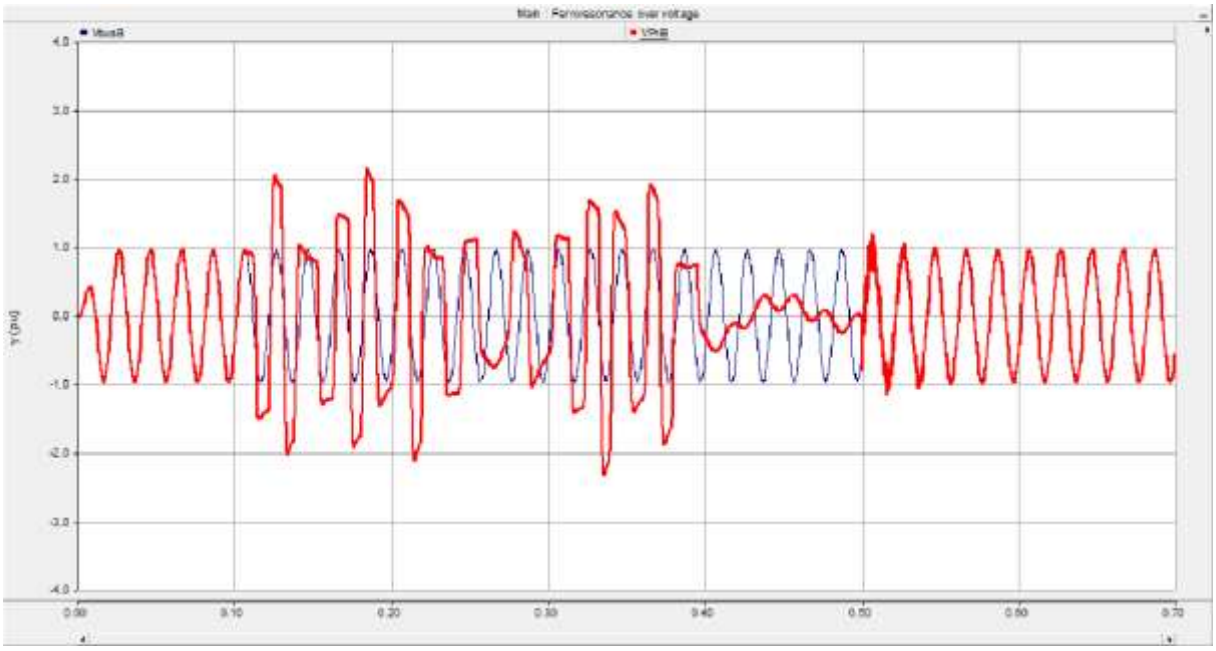
PSCAD 4.2

Příloha 1 Průběhy ferorezonančního přepětí

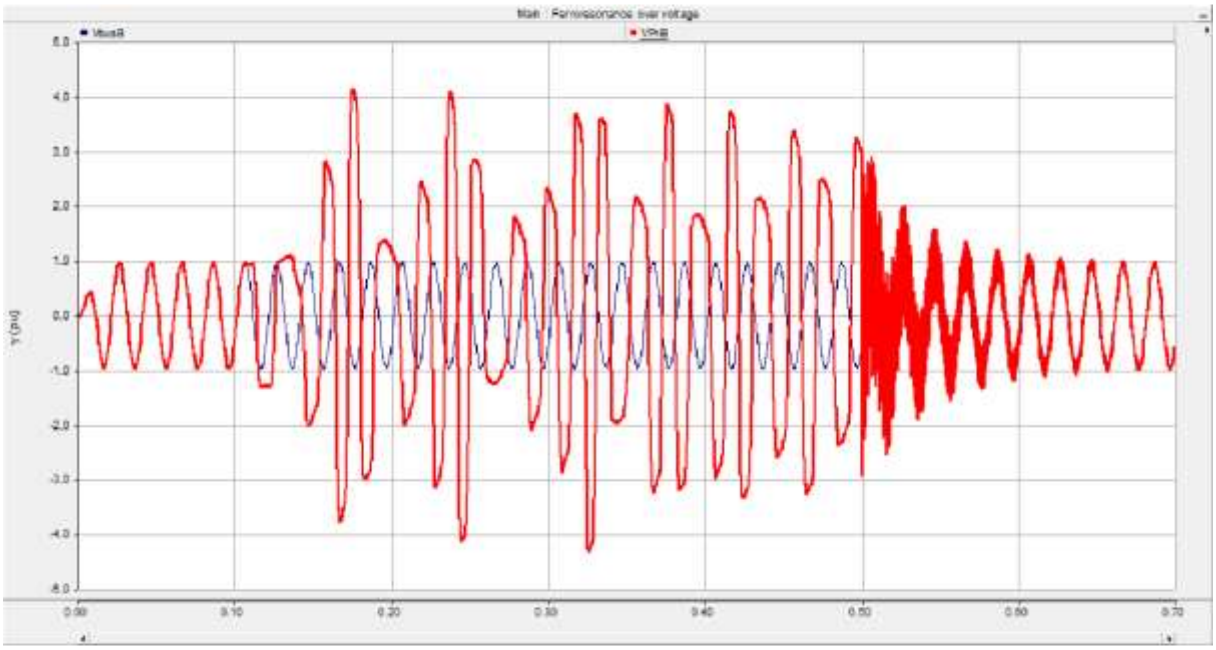
Následující sada obrázku znázorňuje příklad průběhů ferorezonančních oscilaci, při různých změnách parametrů prvků elektrické sítě. V každé ze situací je změněn pouze jeden parametr v konfiguraci dle kapitoly 4.3.2. Obrázky znázorňují situaci, kdy v čase 0,1 s došlo k rozpojení fáze B (L2) a v čase 0,5 s její spojení. Červená křivka znázorňuje průběh napětí na primární vinutí transformátoru (ferorezonanční přepětí) a modrá harmonický průběh v normálním ustáleném stavu. Hodnoty jsou uvedeny v poměrných hodnotách.



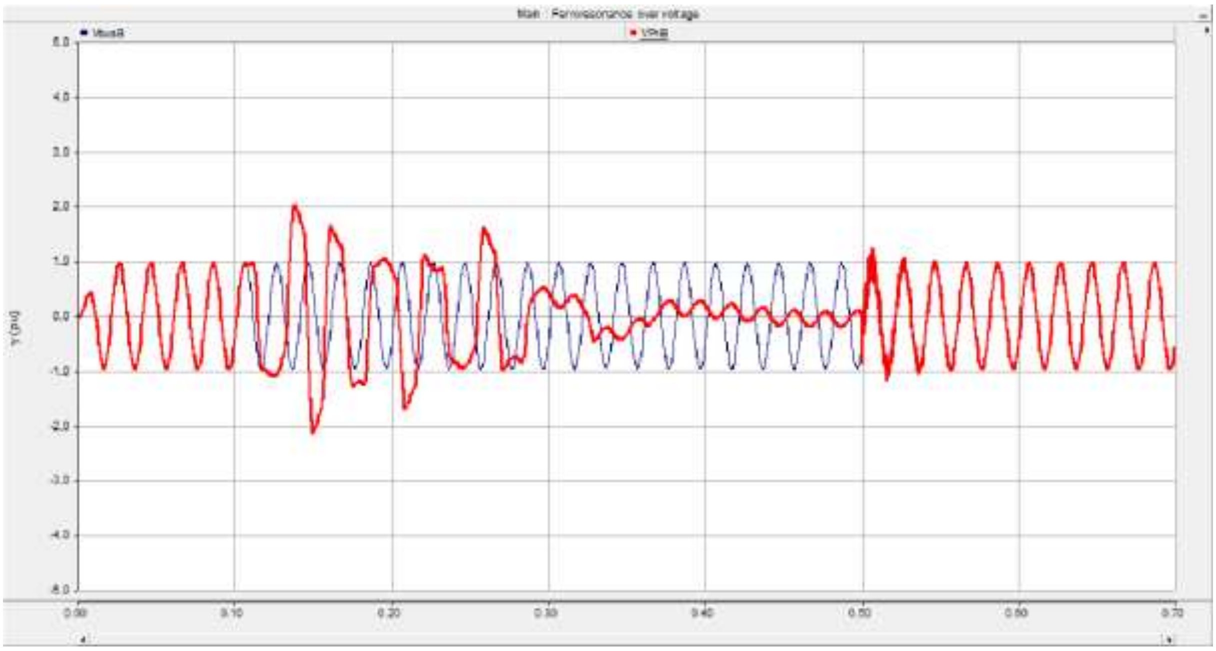
Výkon transformátoru: 30MVA při konstantní zátěži



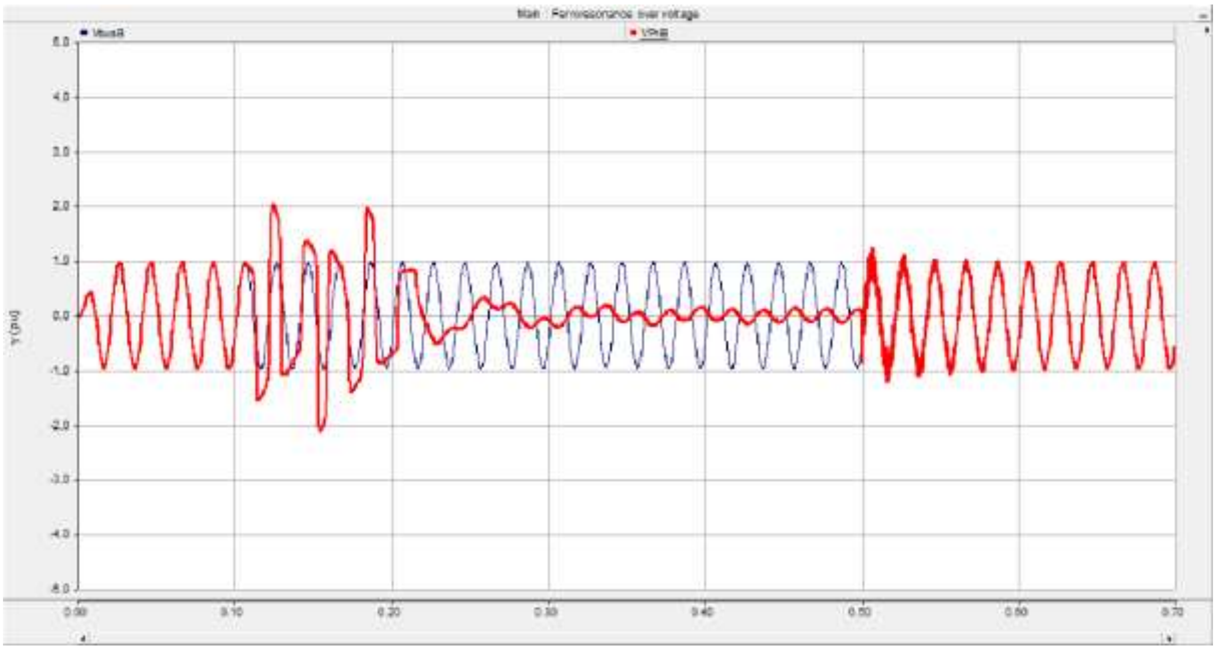
Výkon transformátoru: 20MVA při konstantní zátěži



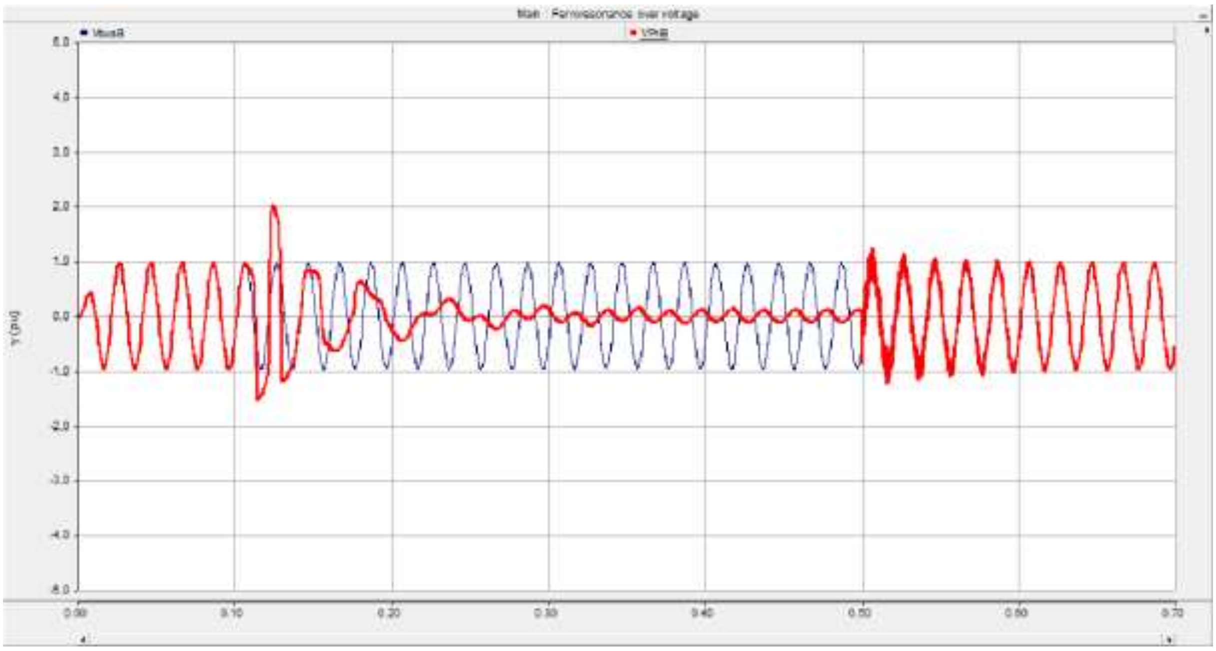
Výkon transformátoru: 10MVA při konstantní zátěži



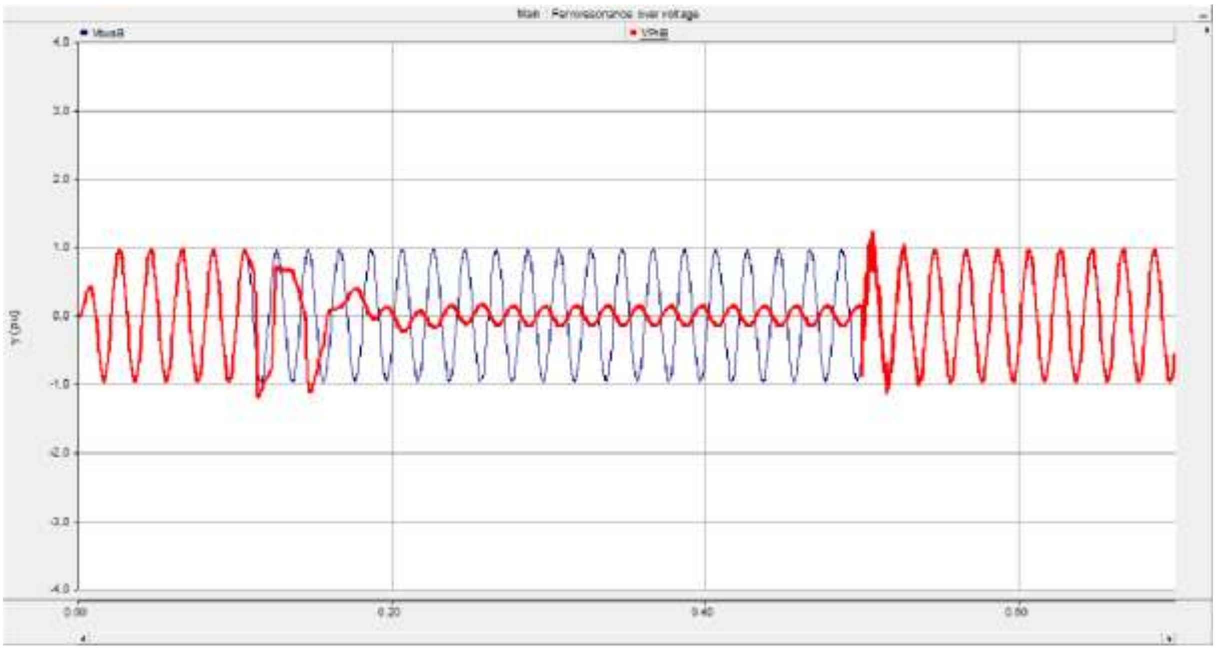
Výkon transformátoru: 5MVA při konstantní zátěži



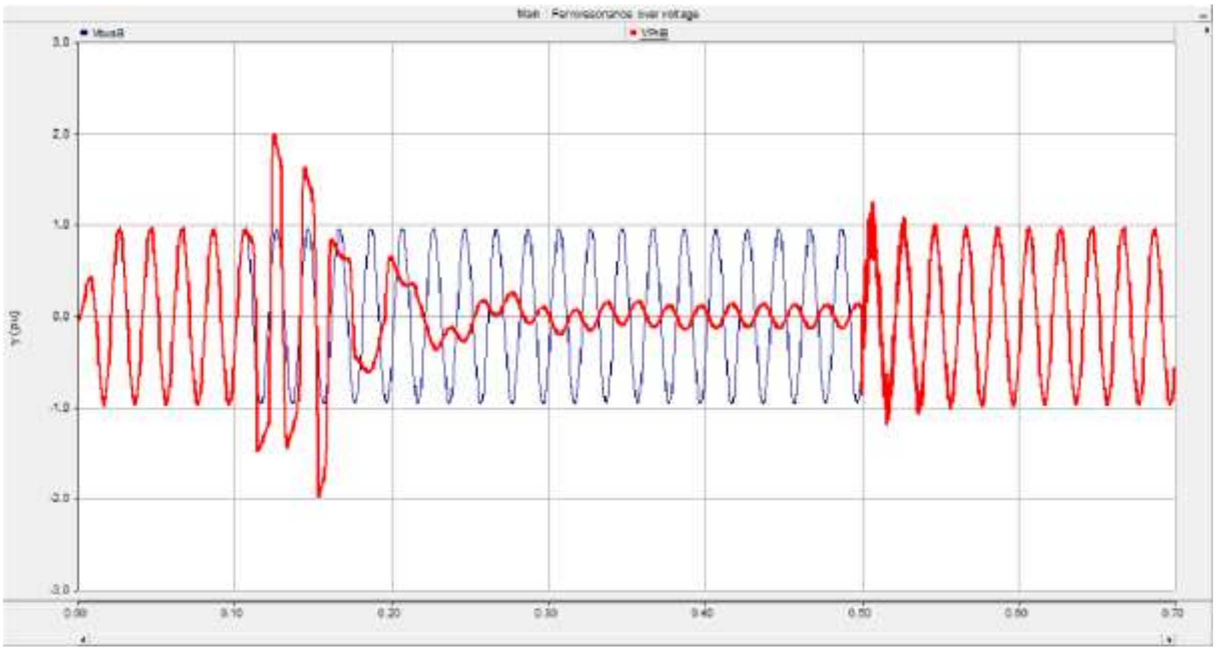
Výkon transformátoru: 40MVA při konstantní zátěži



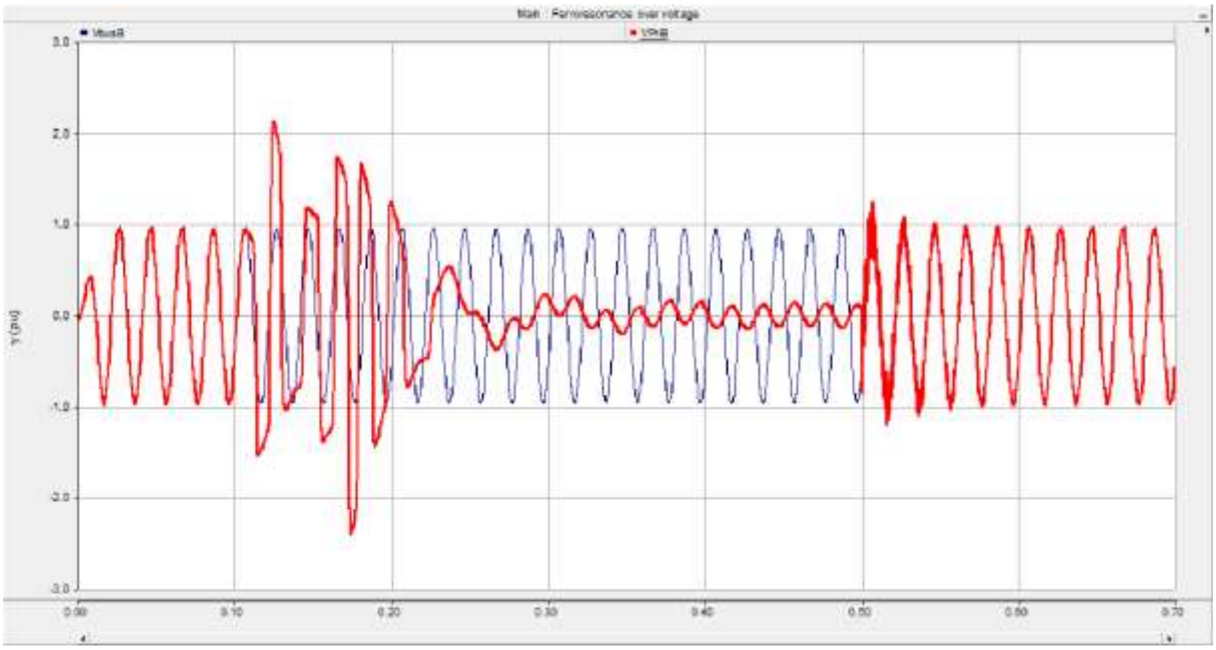
Výkon transformátoru: 50MVA při konstantní zátěži



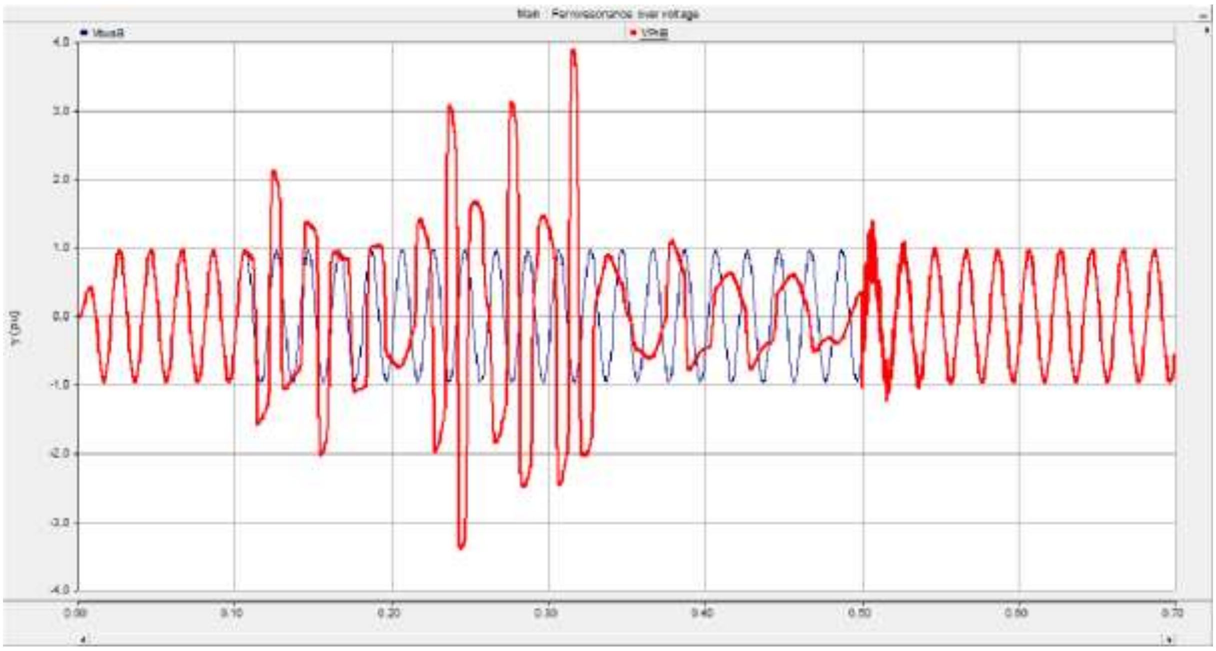
zatížení transformátoru Pz 1MW při stejném výkonu transformátoru



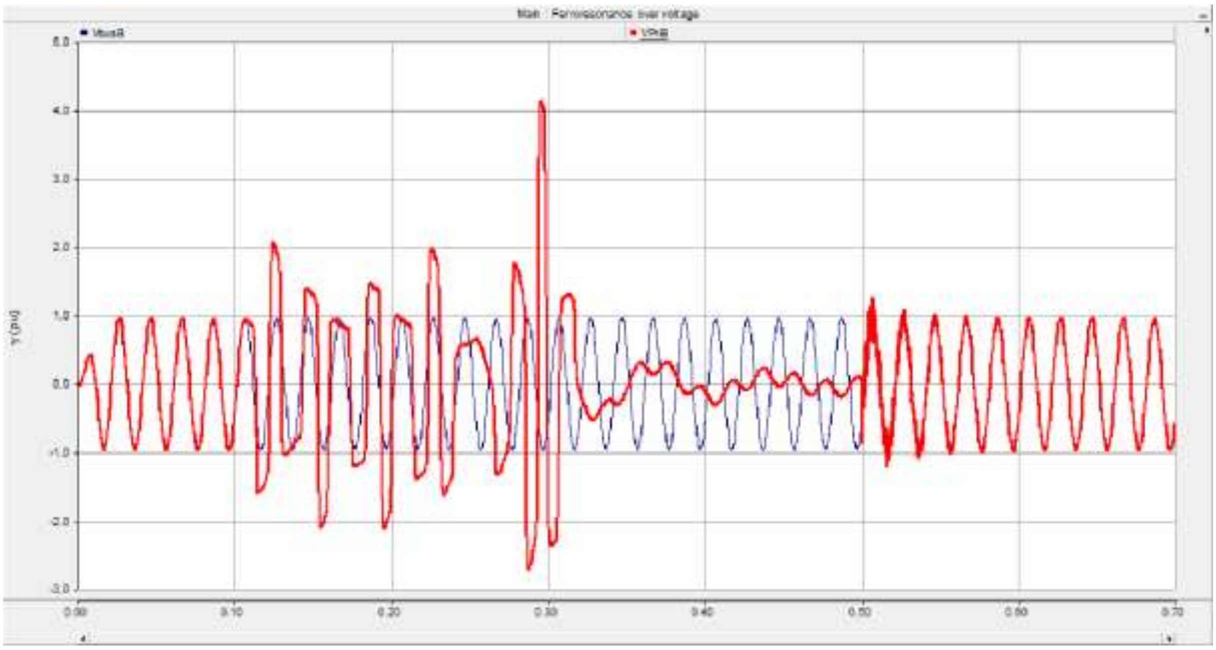
zatížení transformátoru Pz 500kW při stejném výkonu transformátoru



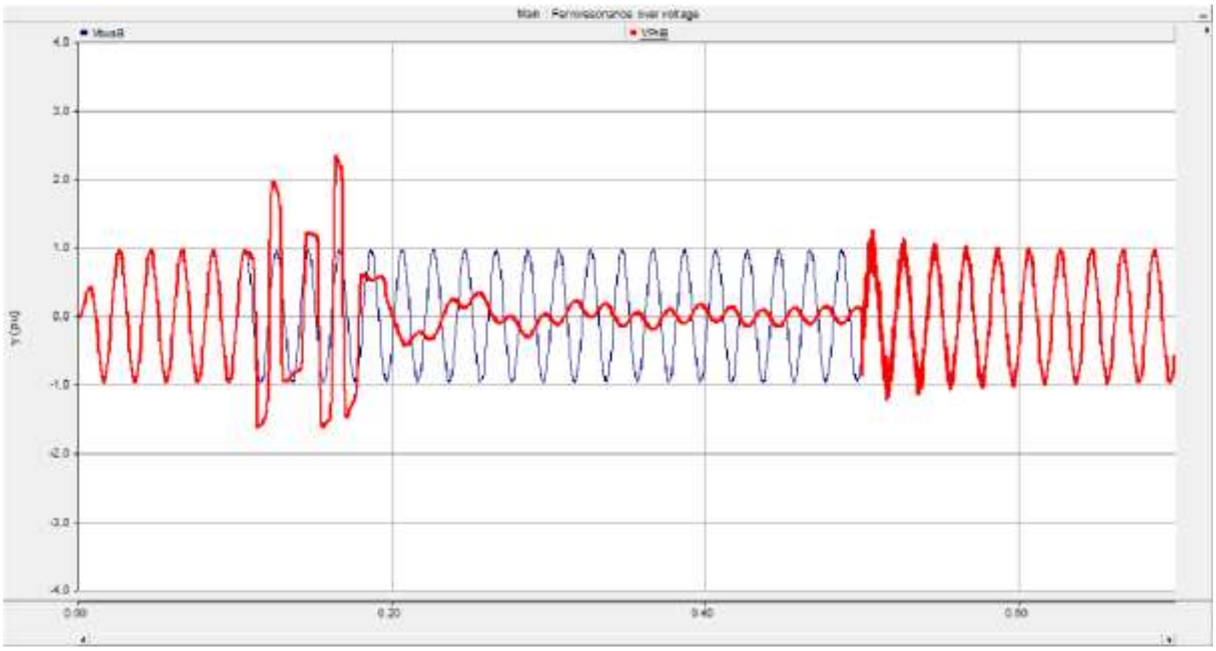
zatížení transformátoru Pz 400kW při stejném výkonu transformátoru



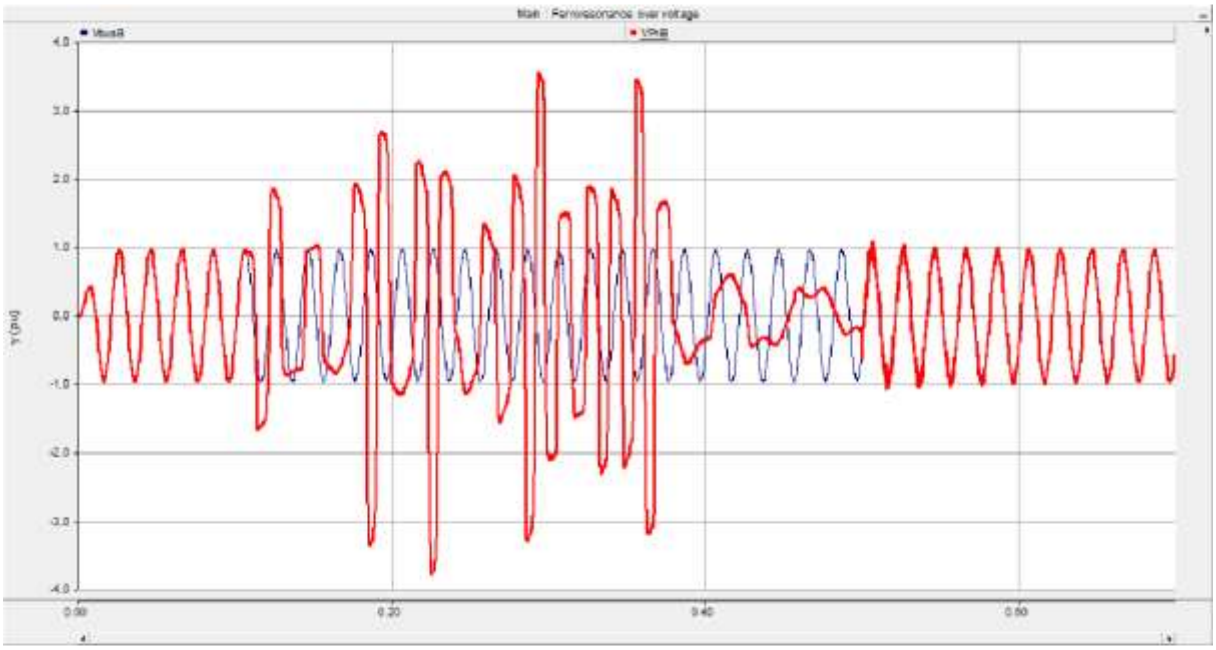
zatížení transformátoru Pz 350kW při stejném výkonu transformátoru



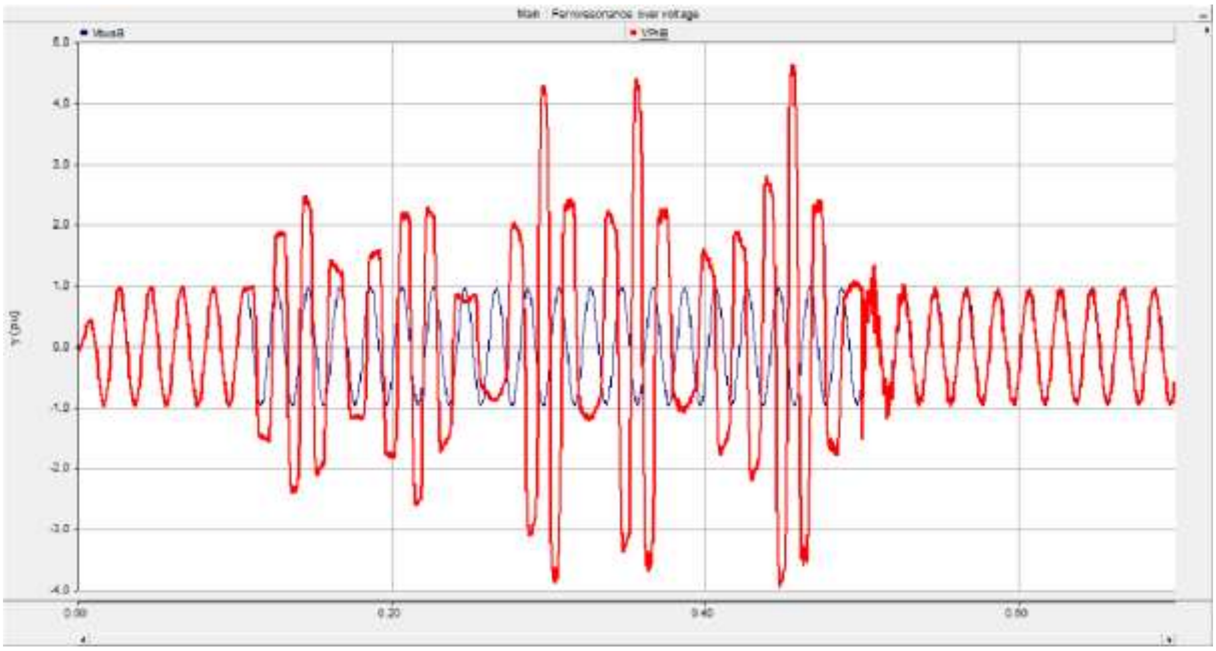
zatížení transformátoru Pz 300kW při stejném výkonu transformátoru



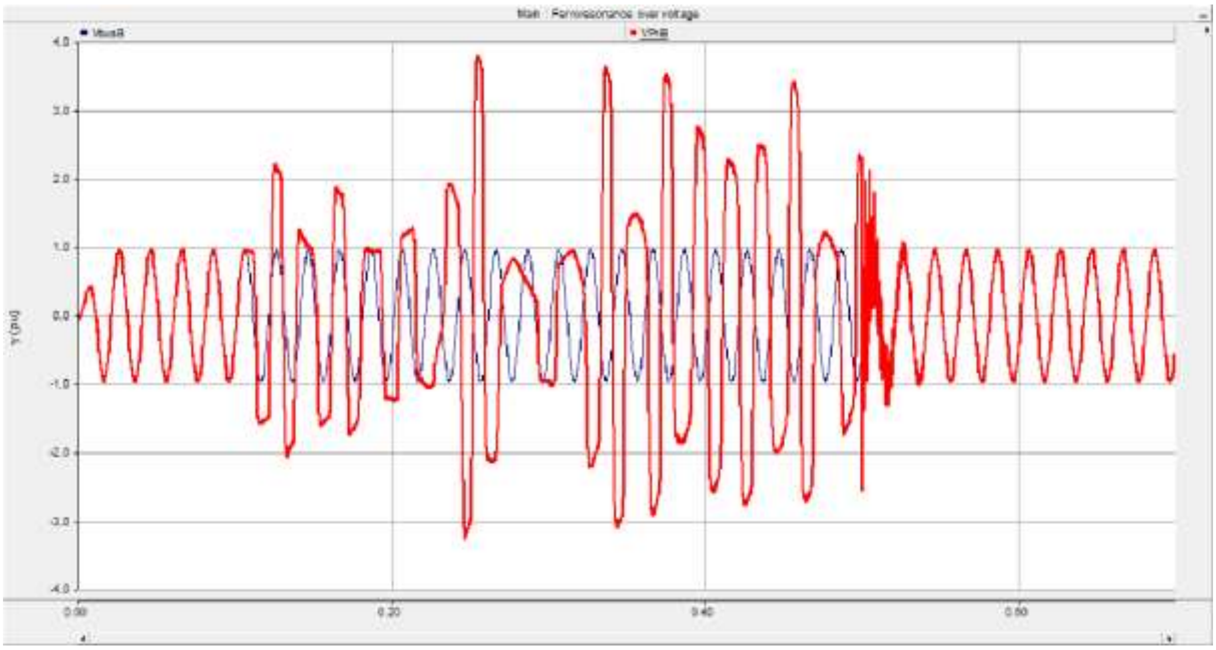
zatížení transformátoru Pz 250kW při stejném výkonu transformátoru



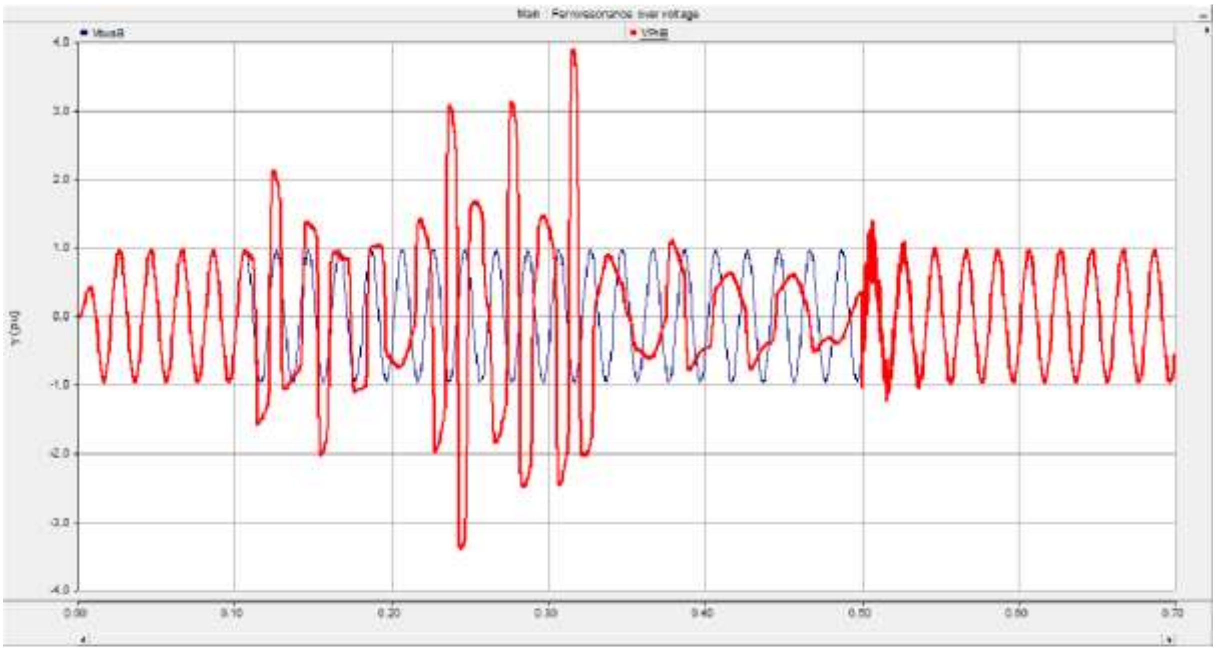
zatížení transformátoru Pz 200kW při stejném výkonu transformátoru



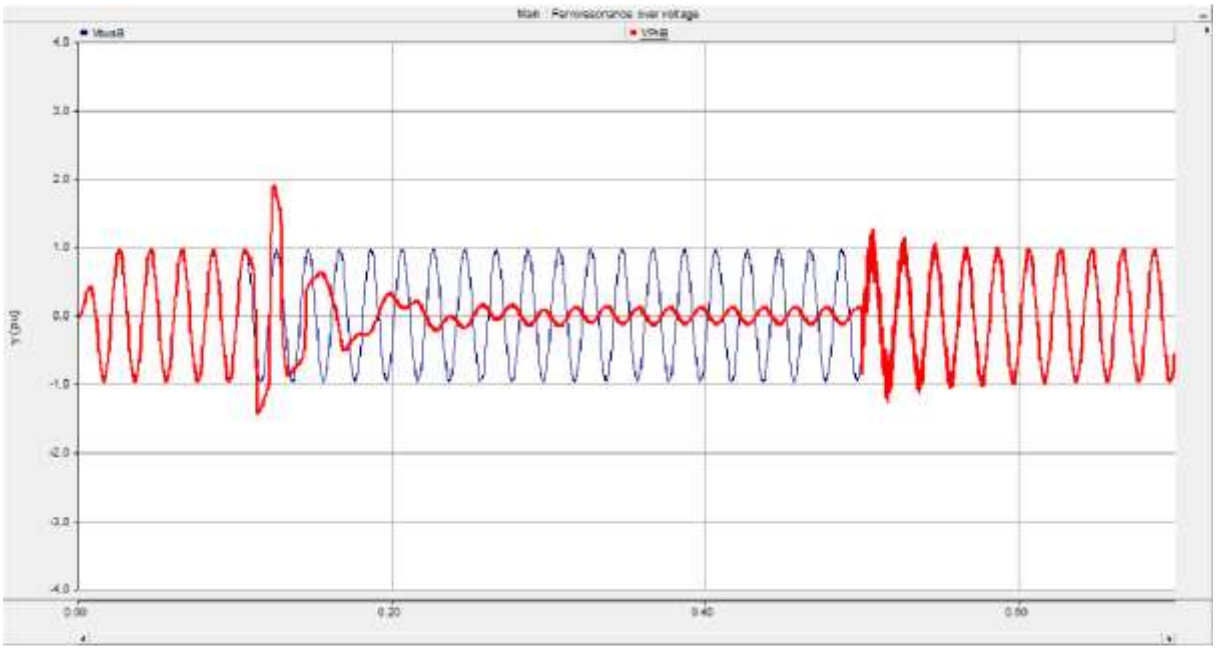
Délka vedení 75km, parametry Transformátoru a jeho zatížení se nemění



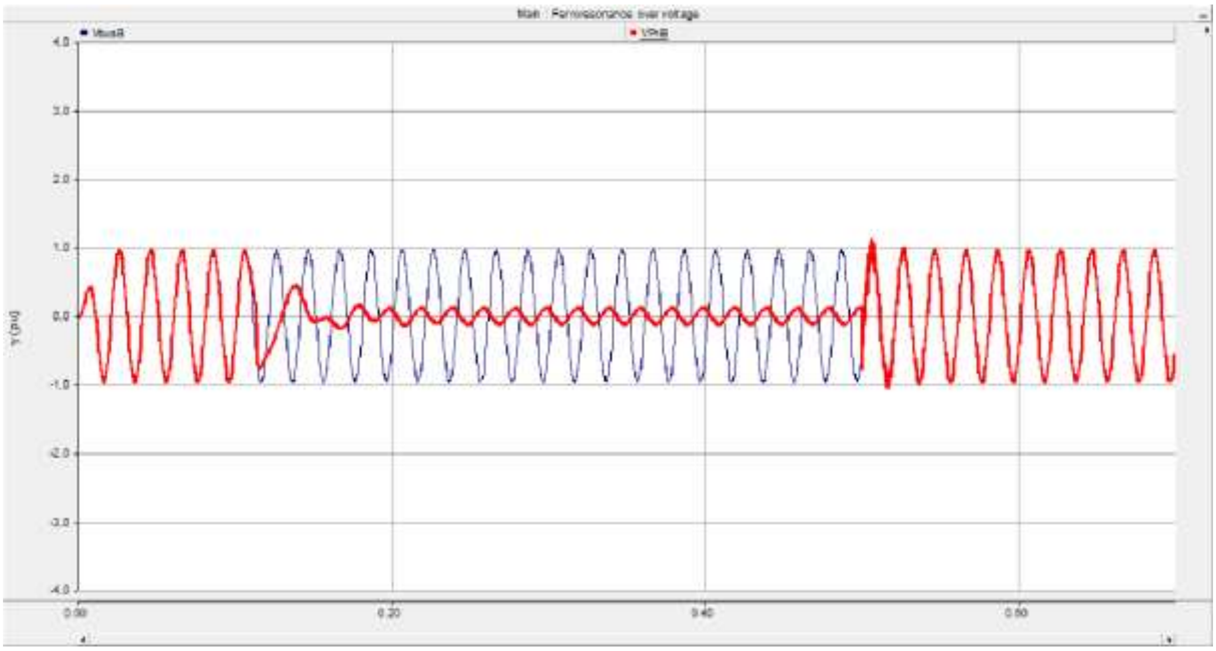
Délka vedení 50km



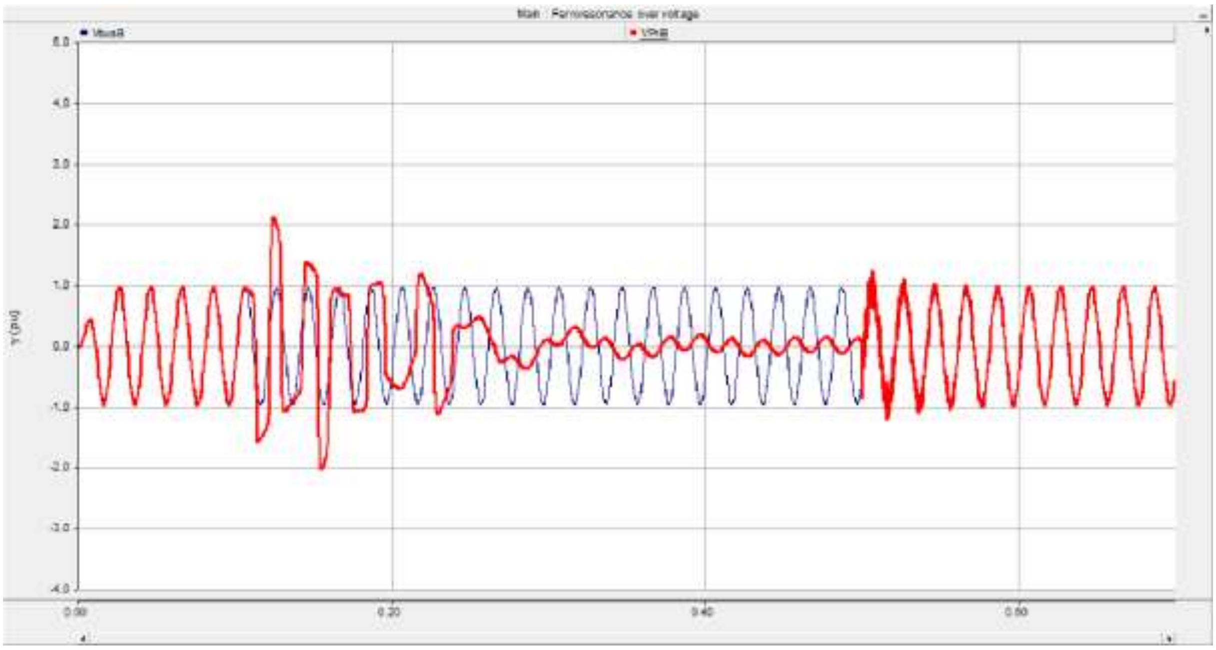
Délka vedení 30km



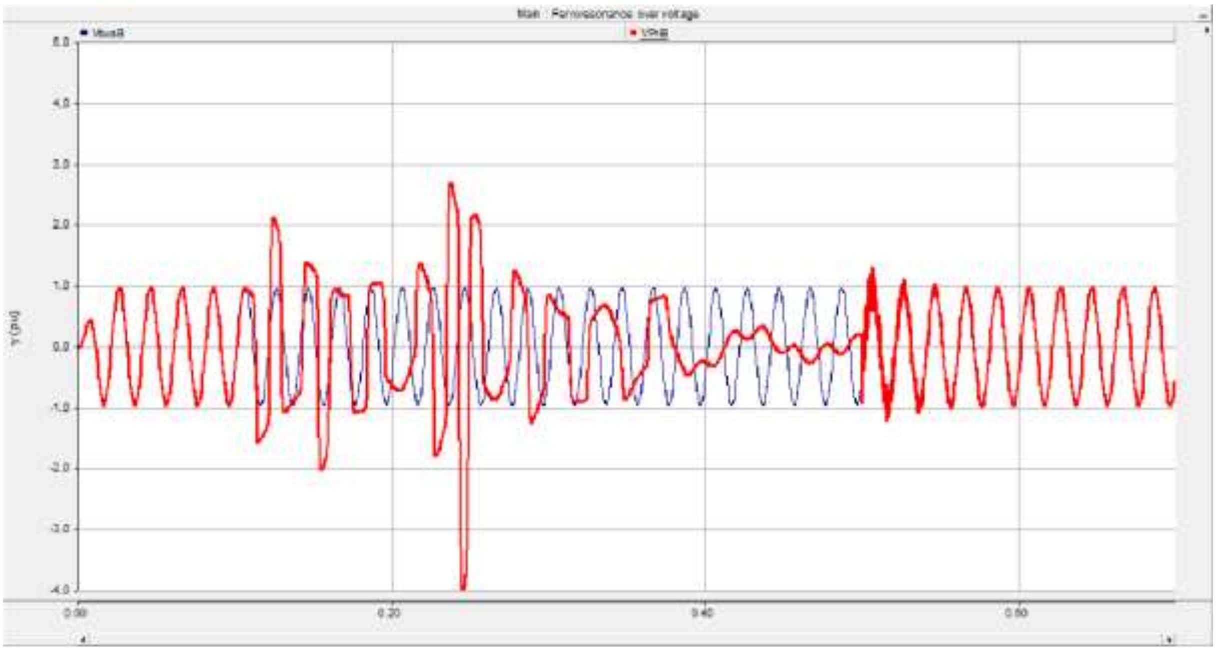
Délka vedení 20km



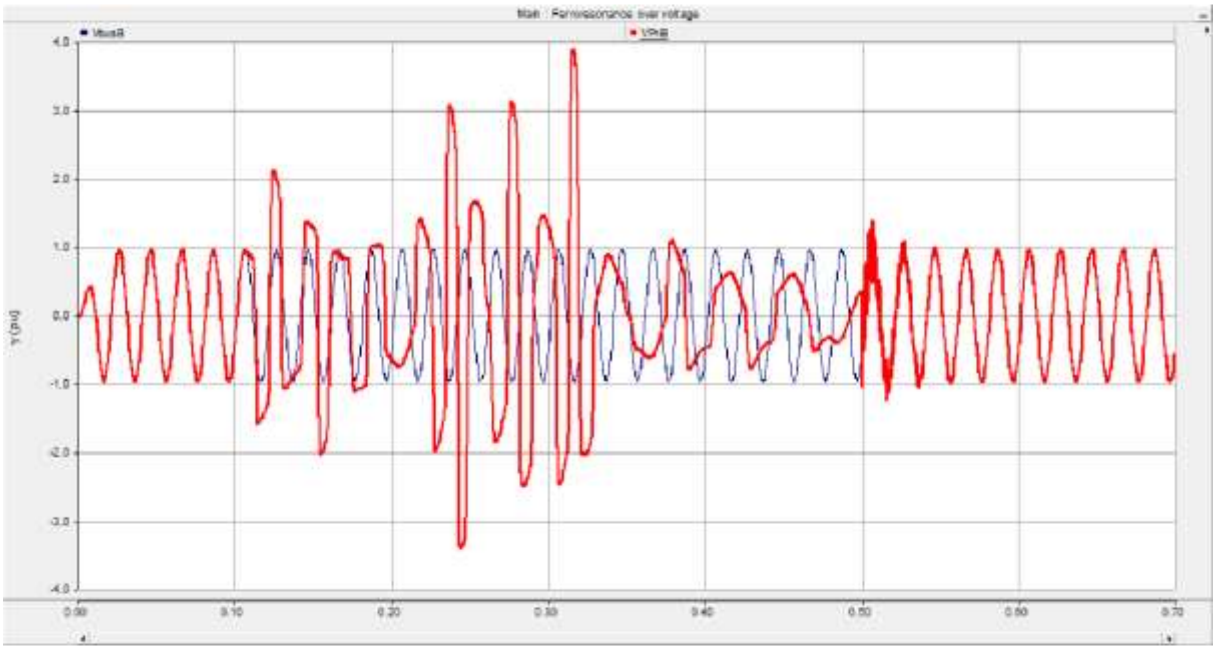
Délka vedení 10km



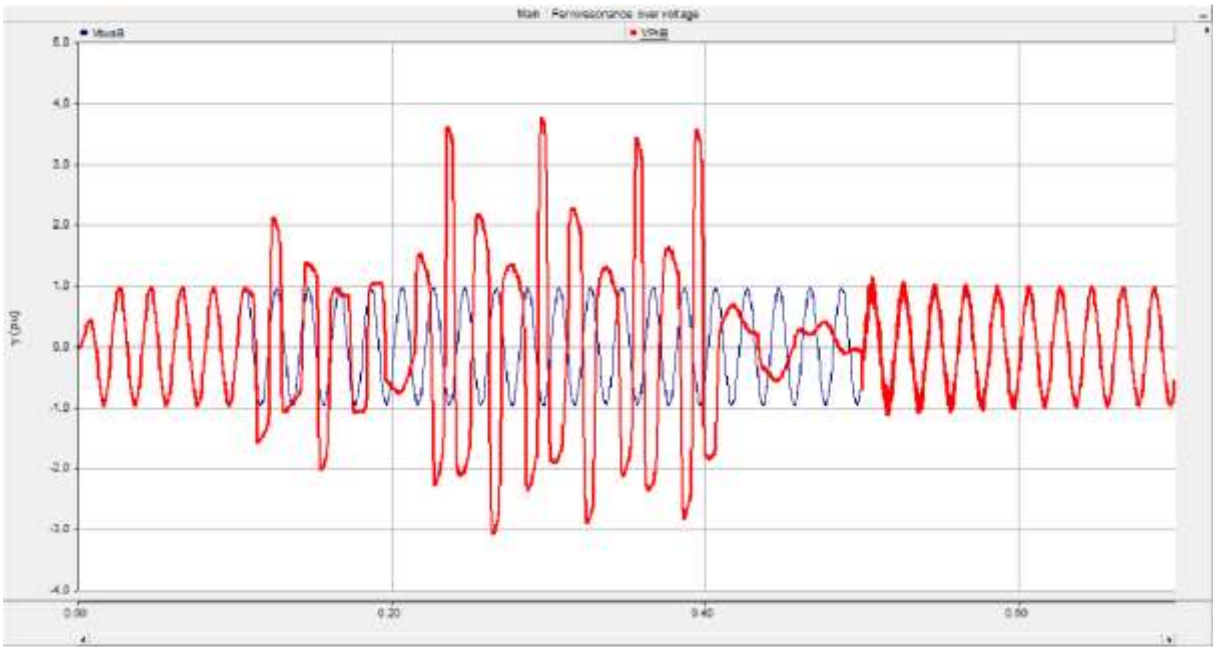
Napětí uk 9% transformátoru



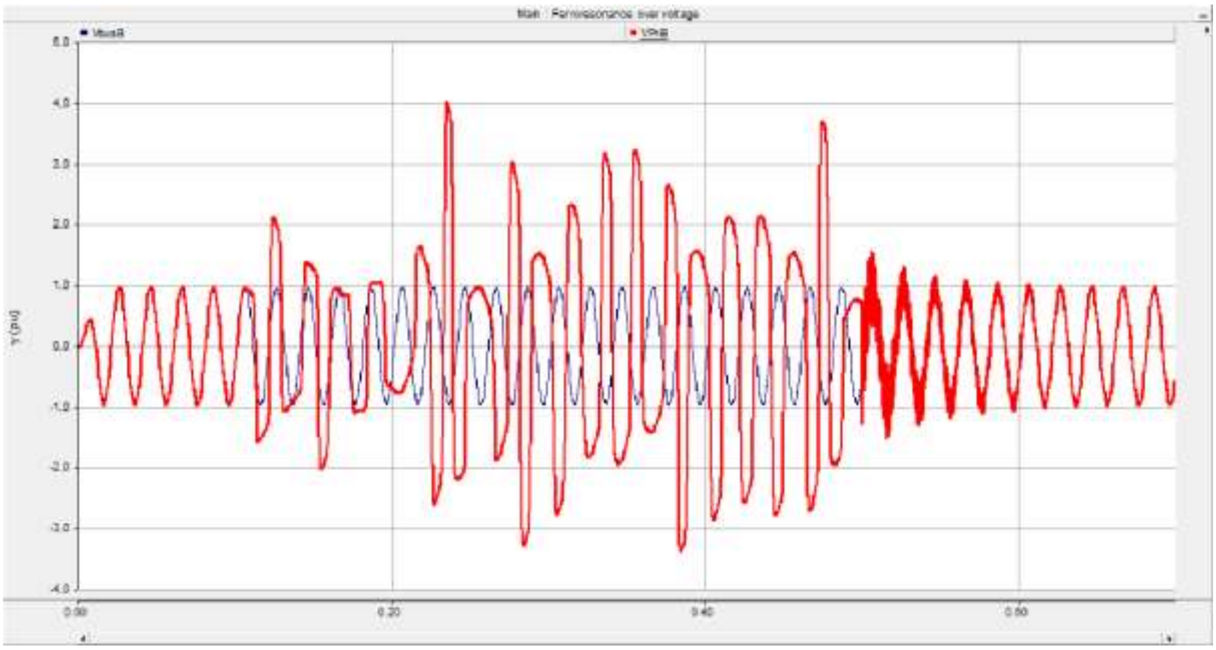
Napětí uk 8% transformátoru



Napětí uk 7,65% transformátoru



Napětí uk 7% transformátoru



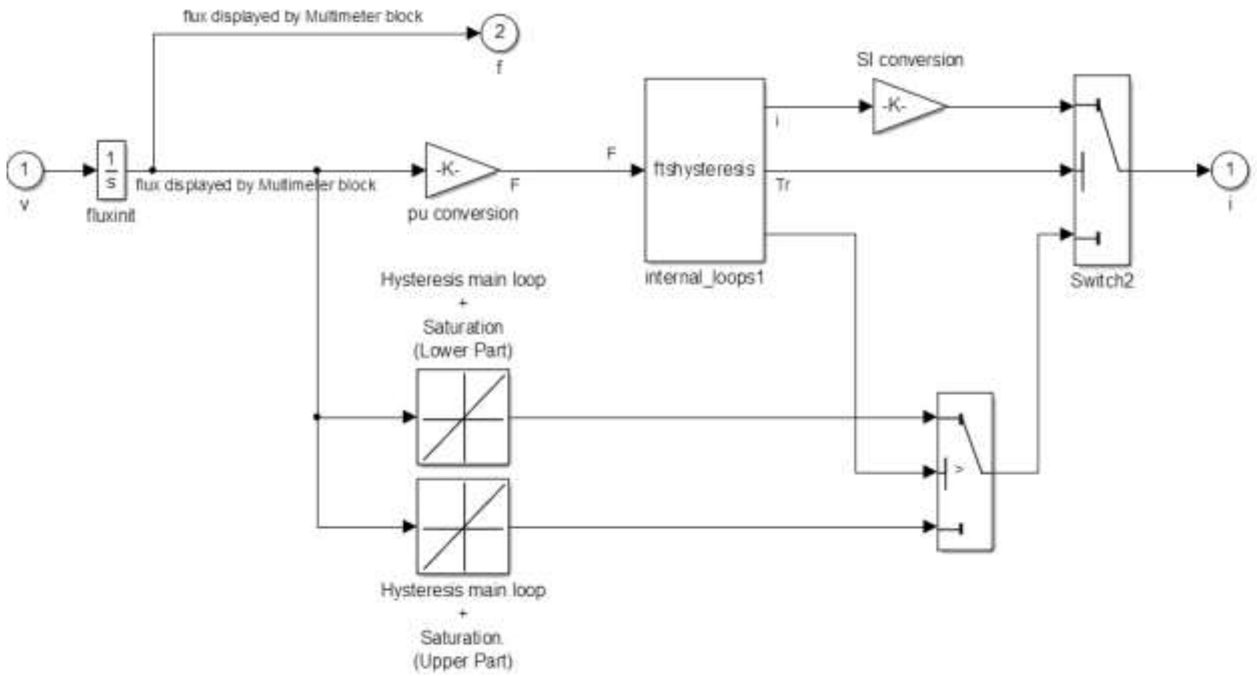
Napětí uk 6% transformátoru

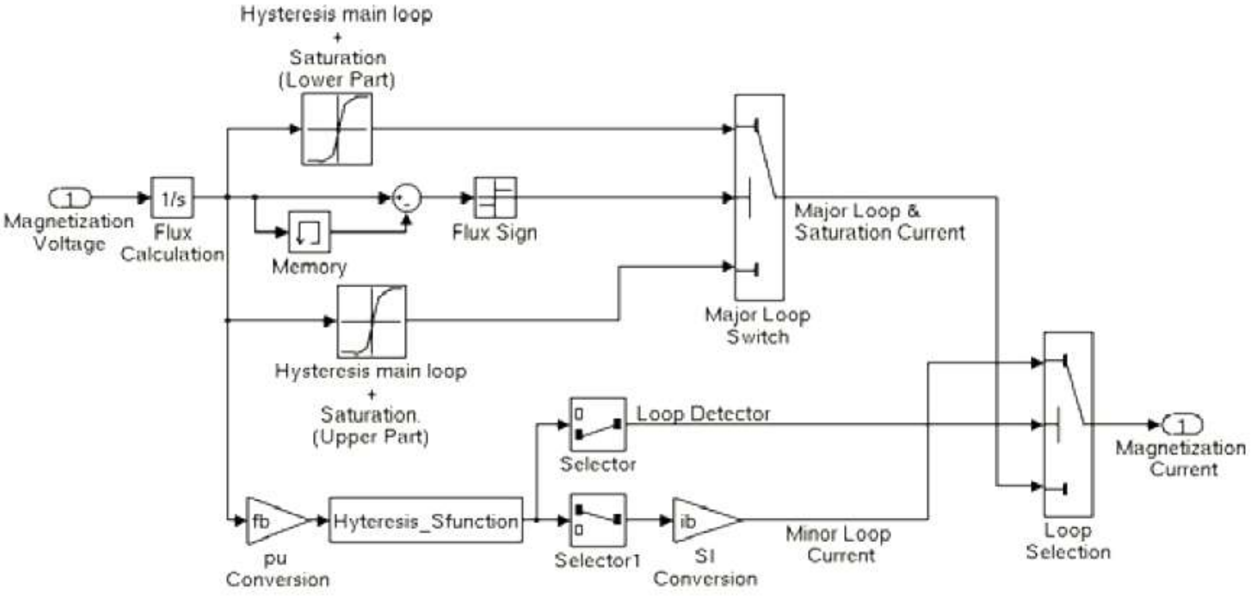
Příloha 2 Destrukční účinky ferorezonančního přepětí

Destrukční účiny ferorezonančního přepětí v elektrizační soustavě:

zdroj: ABB

Příloha 3 Model hysterezní smyčky v SIMULINKu

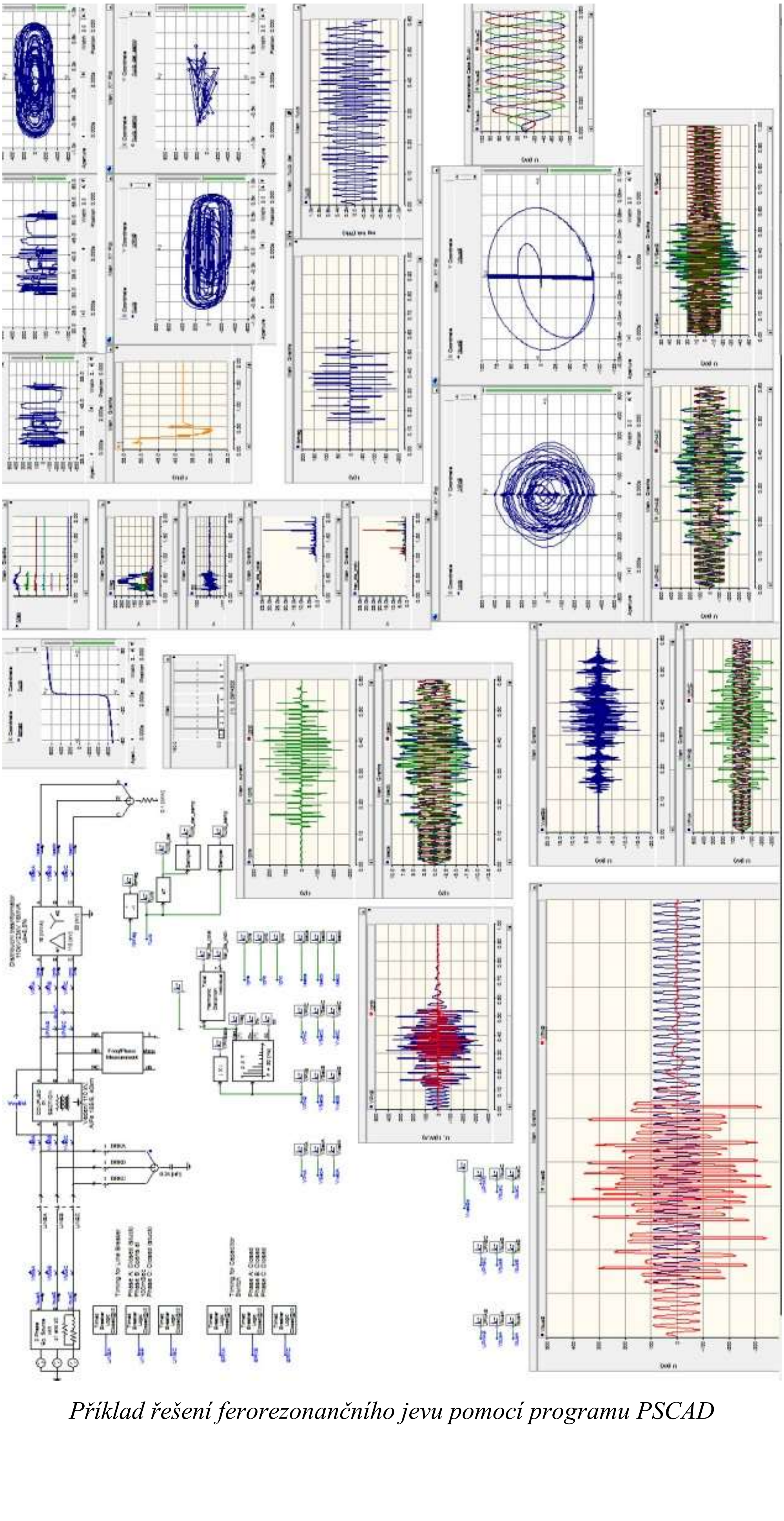




*Nejnovější verze modelu (Matlab 2013b) a starší verze (*Matlab r. 2005*)*

zdroj: Matlab Simulink – SimPowerSystems Toolbox

Příloha 4 Analýza ferorezonančního jevu v prostředí PSCAD



Příklad řešení ferorezonančního jevu pomocí programu PSCAD

Curriculum Vitae

Ing. Branislav Bátora

narozen: 14. října 1982 v Handlové (SVK)

email: batora@feec.vutbr.cz

tel: +420 776 694 575

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 – 2013 FEKT, VUT v Brně. Postgraduální 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

(Správa IT, vědecko-výzkumná činnost, pedagogická činnost, řešení projektů)

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 Elektrizační soustavě
- Přes 20 publikací (zahraniční i české konference, články v odborných časopisech)

Řešení projektů (spoluřešitel a řešitel):

2009:

FRVŠ 2592/2009/G1 Rozšíření praktické výuky diagnostických metod v elektroenergetice

2010:

FRVŠ 2862/2010/G1 Rozšíření stávajících laboratorních úloh pro laboratoř Elektrotepelné techniky

FRVŠ 2719/2010/F1a Tvorba nových laboratorních panelů pro praktickou realizaci bytové elektroinstalace

FEKT-S-11-2 Výzkum spolehlivosti, bezpečnosti a efektivnosti energetických systémů

2011:

FRVŠ 3286/2011/F1a Tvorba nových laboratorních panelů pro praktickou výuku systémů pro komplexní řízení budov

2012:

FRVŠ 2665/2012/F1a Tvorba nových laboratorních úloh pro funkční realizaci inteligentní elektroinstalace v moderních budovách

Členství v organizacích:

KNX partner

Jazyky:

Angličtina, Slovenština