

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

FAKULTA MECHATRONIKY

a
mezioborových inženýrských studií



DIPLOMOVÁ PRÁCE

**ZAPÍNACÍ PROUD TŘÍFÁZOVÉHO
TRANSFORMÁTORU**

Inrush current of three-phase transformer

JAN NOVÝ

Vedoucí práce: Ing. Miroslav Novák, Ph.D.
Konzultant: Ing. Leoš Beran

Liberec, 2007

Prohlášení

Byl jsem seznámen s tím, že na mou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 o právu autorském, zejména § 60 (školní dílo).

Beru na vědomí, že TUL má právo na uzavření licenční smlouvy o užití mé diplomové práce a prohlašuji, že **s o u h l a s í m** s případným užitím mé diplomové práce (prodej, zapůjčení apod.).

Jsem si vědom toho, že užít své diplomové práce či poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem TUL, která má právo ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, vynaložených univerzitou na vytvoření díla (až do jejich skutečné výše).

Diplomovou práci jsem vypracoval(a) samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím diplomové práce a konzultantem.

V Liberci dne:

Podpis

Poděkování

Na tomto místě bych rád poděkoval všem, kteří mě při studiu i vzniku této práce podporovali. Především pak vedoucímu práce Ing. Miroslavu Novákovi Ph.D. a konzultantu Ing. Leoši Beranovi za vstřícnost a cenné připomínky a rady nejen při pracích na tomto projektu, ale i při vytváření této zprávy. Velké díky patří rovněž rodině za trpělivost, motivaci k práci a za psychickou a materiální podporu v průběhu celého mého studia.

Anotace

Diplomová práce (DP) je zaměřena na měření maxim zapínacího proudu (ZP) třífázových transformátorů v závislosti na úhlu připnutí, počáteční magnetizaci jednotlivých částí jádra a zejména skupinovém zapojení vinutí.

Cílem práce je sestavení grafů ZP pro různá skupinová zapojení a ověření metody omezení ZP sekvenčním spínáním jednotlivých fází podle Brunkeho a Fröhliche. V prostudovaných monografiích a odborných člancích se přitom vyskytují grafy pro jednofázové transformátory, u třífázových transformátorů se popis řeší komplikovanými modely platnými pouze pro jednotlivá skupinová spojení.

DP shrnuje teoretické poznatky o vzniku ZP, hlouběji se zabývá ZP třífázových transformátorů s různou konfigurací magnetického obvodu a skupinového zapojení. Druhá část popisuje provedené měření ZP, pro které byl použit třífázový přípravek s triaky. Ten umožnil automatizované měření grafů ZP v přesně definovaných podmínkách. Měření byla provedena pro zapojení YNd, Yy s a bez vyvedeného středního vodiče a Dyn. Dále byly změřeny grafy při sekvenčním spínání podle Brunkeho a Fröhliche. Na závěr jsou diskutovány změřené grafy a možnosti jejich aplikací v praxi při omezování ZP.

Výstupem práce jsou grafy ZP, zobrazující plochy ZP v závislosti na úhlu připnutí transformátoru k síti. Vlastním přínosem práce jsou právě tyto grafy a z nich plynoucí závěry, dále ověření použitelnosti metody sekvenčního spínání pro omezení ZP a z grafů plynoucí robustnost této metody.

Klíčová slova:

Zapínací proud, třífázový transformátor, sekvenční spínání, omezování zapínacího proudu

Abstract

The diploma work is specialized on measuring maximums of inrush current of three - phase transformers in dependence on angle attach, initial magnetization of single parts of transformer core and especially multipoint winding.

Aim of this diploma work is setup graph of inrush current for different multipoint and verification's method restriction of inrush current by sequential switching of single phases according to Brunkeho and Fröhlich's but the graphs occur for single-phase transformers in explored monographs and special artikles. The description of three-phase transformers is solved by complicated models valid for single multipoint only.

The diploma work summarizes theoretical knowledge about an origin of inrush current and deals with inrush current of three-phase transformers with different configuration of magnetic circuits and multipoint. The second part describes implemented measurement of inrush current for which was used the three-phase preparation with triac. This preparation has enabled automated graphic measurement of inrush current in exactly defined conditions.

The measurements have been carried out for connection of wye-delta (Yd), wye-wye (Yy) with and without brought-out neutral point and delta-wye (Dy). Then the graphs have been also measured at sequential switching according to Brunke's and Fröhlich's method. There are discussed measured graphs and possibilities of their application in work experience at restriction of inrush current at a conclusion.

Result of this diploma work are graphs of inrush current displaying surface of inrush current in dependence on angle attach of transformer to networking. Own contribution of this work are graphs mentioned above and resulting conclusions of them, verification of applicability of sequential switching method for restriction of inrush current and resulting robustness of this method from graphs.

Keyword:

Inrush current, three - phase transformer, sequential switching, limitation of inrush current

Obsah

Seznam použitých symbolů.....	8
1. Úvod.....	10
Teoretická část	12
2. Zapínací proud	12
2.1 Zapínací proud jednofázových transformátorů.....	12
2.2 Matematické vyjádření zapínacího proudu.....	16
3. Konstrukce třífázového transformátoru.....	18
3.1 Konstrukce magnetického obvodu	18
3.2 Konstrukce vinutí transformátoru.....	19
4. Zapínací proud třífázových transformátorů	21
4.1 Vliv skupinového zapojení na zapínací proud.....	21
4.1.1 Vstupní vinutí zapojeno do hvězdy s vyvedeným středem (YN).....	21
4.1.2 Vstupní vinutí spojené do trojúhelníka (D)	22
4.1.3 Vstupní vinutí spojeno do hvězdy, výstupní do trojúhelníka (YNd).....	22
4.1.4 Vstupní i výstupní vinutí spojena do hvězdy (Yy)	22
4.1.5 Obě vinutí zapojena do hvězdy s vyvedeným středem (YNyn)	23
4.2 Vliv konstrukce magnetického obvodu na zapínací proud.....	23
4.3 Metody pro omezení zapínacího proudu u třífázových transformátorů	23
5. Vliv proudu na bezpečnost transformátoru	26
Praktická část.....	27
6. Úvod do praktické části	27
7. Přípravek pro měření zapínacího proudu třífázových transformátorů	27
7.1 Přípravek pro magnetizaci jádra transformátoru	31
7.2 Manchester kódování.....	31
8. Měření transformátoru nakrátko.....	32
8.1 Schéma zapojení	33
8.2 Vzorce pro výpočet prvků náhradního obvodu	33
8.3 Naměřené hodnoty.....	34
8.4 Vypočtené hodnoty	35

8.5	Výsledné grafy.....	36
9.	Měření transformátoru naprázdno	37
9.1	Schéma zapojení obvodu pro měření naprázdno	37
9.2	Vzorce pro výpočet prvků náhradního obvodu v zapojení naprázdno	38
9.3	Naměřené hodnoty.....	39
9.4	Vypočtené hodnoty.....	40
9.5	Výsledné grafy.....	40
10.	Měření zapínacího proudu	41
10.1	Předmagnetování transformátoru	44
10.2	Zdrojový kód pro zpracování měřených dat.....	46
11.	Měření zapínacího proudu v zapojení hvězda/hvězda s vyvedeným středním vodičem (YNyn).....	47
11.1	Zapojení YNyn s použitím metody sekvenčního spínání fází B–AC se zpožděním 1/4 T a (2 + 1/4)T podle Brunkeho a Frölicha.....	51
12.	Měření zapínacího proudu v zapojení hvězda/hvězda bez vyvedeného středního vodiče(Yyn)	56
12.1	Zapojení Yyn s použitím metody sekvenčního spínání fází B–AC se zpožděním 1/4 T a (2 + 1/4)T podle Brunkeho a Frölicha.....	60
13.	Měření zapínacího proudu v zapojení hvězda/trojúhelník (YNd).....	65
13.1	Zapojení YNd s použitím metody sekvenčního spínání fází B–AC se zpožděním 1/4 T a (2 + 1/4)T podle Brunkeho a Frölicha.....	68
14.	Měření zapínacího proudu v zapojení trojúhelník/hvězda (Dyn).....	72
14.1	Zapojení Dyn s použitím metody sekvenčního spínání fází B–AC se zpožděním 1/4 T a (2 + 1/4)T podle Brunkeho a Frölicha.....	74
15.	Závěr.....	79
	Použitá literatura.....	82
	Struktura příloh na DVD.....	84

Seznam použitých symbolů

i_0	A	proud naprázdno transformátoru
L_μ	H	hlavní indukance
L_m	H	hlavní indukance
ΔP_K	W	ztráty nakrátko transformátoru
ΔP_0	W	ztráty naprázdno transformátoru
P_0	W	ztráty naprázdno transformátoru
Q_0	Var	jalový výkon dodávaný do transformátoru
R_{1K}	Ω	odpor nakrátko transformátoru
R_1	Ω	odpor vstupního vinutí
R_2	Ω	odpor výstupního vinutí
R_m	Ω	rezistor určující ztráty v magnetickém obvodu
R_{fe}	Ω	rezistor nahrazující ztráty v železe
u_K	V	napětí nakrátko transformátoru
$X_{1\sigma}$	Ω	rozptylová reaktance vstupního vinutí
$X_{2\sigma}$	Ω	rozptylová reaktance výstupního vinutí
Z_{1K}	Ω	impedance nakrátko transformátoru
Z_p	Ω	impedance nakrátko transformátoru
R_p	Ω	ztráty ve vinutí transformátoru
X_p	Ω	reaktance nakrátko transformátoru
L_p	mH	ztrátová indukčnost transformátoru
μ_r		relativní permeabilita
B	T	magnetická indukce
H	A/m	intenzita magnetického pole
L_l	H	indukčnost transformátoru
N		počet závitů vinutí transformátoru
$I_{mag.}$	A	magnetizační proud
Φ	W	magnetický tok
ω	rad/s	úhlová rychlost
B_r	T	remanentní magnetická indukce

Zapínací proud třífázového transformátoru

B_{ns}	T	magnetická indukce nasycení
B_0	T	počáteční magnetická indukce
f	Hz	kmitočet
z		počet závitů cívky
S	m^2	radiální průřez kruhové cívky
U_S	V	sdužené napětí

Přípravek pro měření zapínacího proudu:

L_1, L_2, L_3, N	svorky pro napájecí síť
T_1, T_2, T_3, N	svorky pro napájení transformátoru
ExIn	svorky ovládacího vstupu (galvanicky odděleno optočlenem)
A_1, A_2	na polaritě nezáleží
ExOut	svorky uživatelského výstupu
+V	interní napájecí napětí cca 16 V DC nestabilizované
OUT	výstup (otevřený kolektor do země s omezením proudu)
GND	zem pro +V a OUT
TRIM	potenciometr pro nastavení úhlu připnutí
DIP	přepínače pro nastavení režimu
NET	napájení 230 V AC
MAG	magnetizační výstup cca 12 V DC, $R_i = 6 \text{ Ohm}$, chráněno pojistkou
AUX	výstup AC napájecího napětí
CTRL	ovládací vstup interního relé, přivedením správně pólovaného napětí dojde k aktivaci vstupu MAG

1. Úvod

Při připojení transformátoru na síť dochází důsledkem počátečního remanentního toku v jádře transformátoru k přesycení, neboli saturaci magnetického obvodu, kterou můžeme vysvětlit jako zakřivení hysterezní smyčky. Vlivem přesycení se prudce snižuje hodnota relativní permeability magnetického obvodu a klesá indukčnost transformátoru. Proud protékající primárním vinutím je pak omezen v podstatě pouze odporem a rozptylovou indukčností primárního vinutí, což způsobuje nárůst magnetizačního proudu odebíraného ze sítě po zapnutí transformátoru, tzv. zapínací proud.

Ačkoli běžný magnetizační proud činí jen několik procent jmenovitého proudu transformátoru, je zapínací proud mnohonásobně větší než magnetizační proud v ustáleném stavu a často vysoce překračuje jmenovitý proud transformátoru. Vysoký nadproud nejčastěji způsobí vybavení nadproudové ochrany – přepálí pojistku nebo vybaví jistič transformátoru. Způsobuje také další méně vážné problémy – od rušení, přes svaření kontaktů stykačů až po destrukci vinutí. Problematika zapínacího proudu je s postupující inovací transformátorů a používáním moderních materiálů a konstrukcí, které vedou ke zvyšování zapínacího proudu, stále aktuálnější.

V dnešní době je oblast řešící zapínací proudy poměrně dobře publikovaná a známá především mezi odborníky, kteří se tímto problémem transformátorů zabývají. Mnoho článků je dnes také zveřejňováno na internetu. Současná úroveň jednotlivých řešení byla prověřována v dostupných odborných publikacích, článků v časopisech, příruček, katalogů komerčně vyráběných produktů a konzultacemi s odborníky zabývajícími se touto problematikou.

Vliv skupinového zapojení na zapínací proud je pro každé zapojení odlišný. Hlavním důvodem je chování magnetického obvodu a ovlivňování fází mezi sebou. U trojfázových transformátorů se používají různá skupinová zapojení vinutí. V této práci jsou pro měření použity zapojení vinutí transformátoru do hvězdy, hvězdy s vyvedeným středem a zapojení vinutí do trojúhelníka. Dále jsou pro tato skupinová zapojení měřeny a popsány metody pro omezení zapínacího proudu postupným spínáním fází podle Brunkeho a Fröhliche a spínáním všech fází najednou.

Cílem Diplomové práce je změřit velikost a sestavit grafy zapínacích proudů transformátoru v závislosti na úhlu připnutí, počáteční magnetizaci jednotlivých částí jádra a skupinovém zapojení. Pomocí měření různých skupinových zapojení porovnat vhodnost těchto zapojení z pohledu zapínacího proudu. Výstupem práce jsou grafy zapínacího proudu, zobrazující plochy zapínacího proudu v závislosti na úhlu připnutí transformátoru k síti. Vlastním přínosem práce jsou právě tyto grafy a z nich plynoucí závěry.

Zapínací proud je měřen přípravkem pro měření zapínacího proudu třífázových transformátorů, který vychází z obvodu měkkého rozběhu TrafoSTART pro připínání jednofázových transformátorů pomocí triaků. Jedná se vlastně o automatizované měření, kde výsledky se vyhodnocují offline z naměřených průběhů.

Diplomová práce je členěna do několika kapitol. V druhé kapitole je podrobně popsána teorie zapínacího proudu jednofázového transformátoru, kde analyzování jevu není tak složité a matematické vyjádření tohoto jevu, které je popsáno diferenciálními rovnicemi.

Třetí kapitola popisuje konstrukce třífázového transformátoru, konkrétně konstrukci magnetického obvodu a konstrukci vinutí transformátoru.

Ve čtvrté kapitole je uveden vznik zapínacího proudu třífázových transformátorů, jehož vyjádření je mnohem složitější než u jednofázových. Dále jsou zde charakterizovány metody pro omezování zapínacího proudu u třífázových transformátorů, kde jsou uvedeny metody, které se objevují v několika praktických realizacích a odborných publikacích.

Pátá kapitola je zaměřena na to, jaký má zapínací proud vliv na bezpečnost transformátoru a jaké následky může mít.

Praktická část této práce potom začíná šestou kapitolou, kde je popsán úvod do této části. V sedmé kapitole je popsán přípravek pro předmagnetizaci fází před připnutím transformátoru k síti.

Osmá a devátá kapitola popisuje základní měření naprázdno a nakrátko, která byla měřena před samotným měřením zapínacího proudu a sloužila pouze k určení parametrů náhradního obvodu.

Desátá kapitola je úvodní kapitola k další, nejdůležitější části a to měření zapínacího proudu. Zde je úvodem popsáno jakým způsobem celé měření probíhá a je zde popsán funkční princip zdrojového kódu pro měření.

Jedenáctá, dvanáctá, třináctá a čtrnáctá kapitola potom jednotlivě popisuje měření zapínacího proudu třífázového transformátoru pro různá skupinová zapojení vinutí a pro různé metody, pro které byl zapínací proud měřen.

Závěr shrnuje získané výsledky, kterými jsou především grafy obsahující plochy zapínacích proudů a z nich plynoucí závěry. Dále je posouzena použitelnost metod sekvenčního spínání pro omezení zapínacího proudu a z grafů plynoucí robustnost této metody.

Teoretická část

2. Zapínací proud

2.1 Zapínací proud jednofázových transformátorů

Zapínací proud vzniká jako důsledek přesycení neboli saturace magnetického obvodu. Přičemž saturaci si můžeme vysvětlit jako zakřivení hysterezní smyčky. Díky saturaci se prudce snižuje okamžitá hodnota relativní permeability $\mu_r(t) = \frac{dB}{dH}$ magnetického obvodu a tím klesá indukčnost transformátoru L_1 .

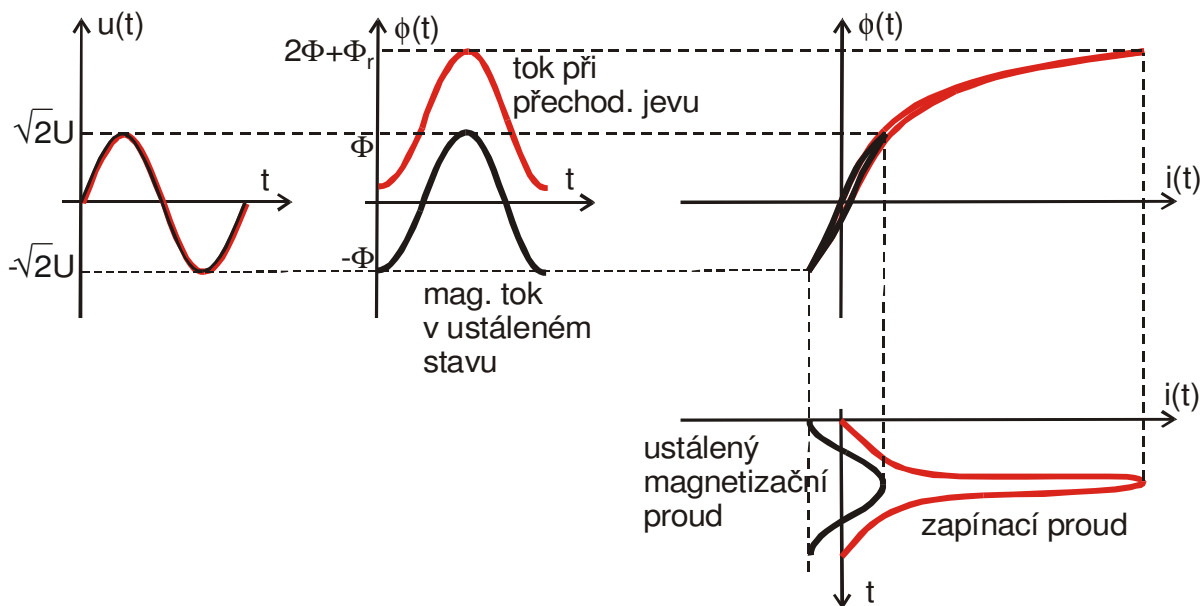
$$L_1(t) = \frac{N^2}{\mathfrak{R}(t)} ; \quad (2.1)$$

$$\mathfrak{R}(t) = \frac{l}{\mu_0 \cdot \mu_r(t) \cdot S} \quad (2.2)$$

Důsledkem toho je nárůst magnetizačního proudu

$$I_{mag} = \frac{U}{j \cdot \omega \cdot L_1} . \quad (2.3)$$

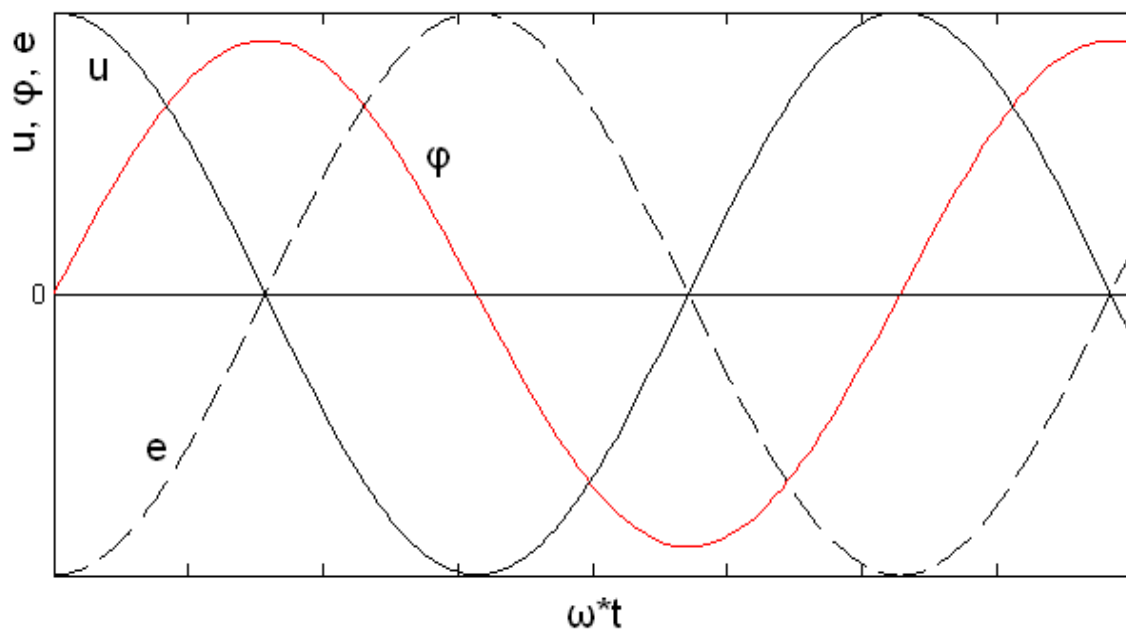
K přesycení dochází díky magnetickému toku $\phi(t) = B(t) \cdot S$, který po zapnutí transformátoru na síť může nabývat libovolné hodnoty v rozmezí $\langle -B_r, B_r \rangle$ a nemusí odpovídat magnetickému toku v ustáleném stavu transformátoru jako je na obr.1. [1]



Obr. 1 Vznik zapínacího proudu. Průběhy po zapnutí jsou červeně, průběhy v ustáleném stavu jsou černě.

Po zapnutí transformátoru na síť je tedy magnetický tok posunut o počáteční tok Φ_0 , což způsobuje nesymetrickou hysterezní smyčku a saturaci magnetického obvodu. Vlivem použitého materiálu jádra transformátoru, konstrukcí magnetického obvodu a vinutí může zapínací proud až několikanásobně přesahovat magnetizační proud v ustáleném stavu.

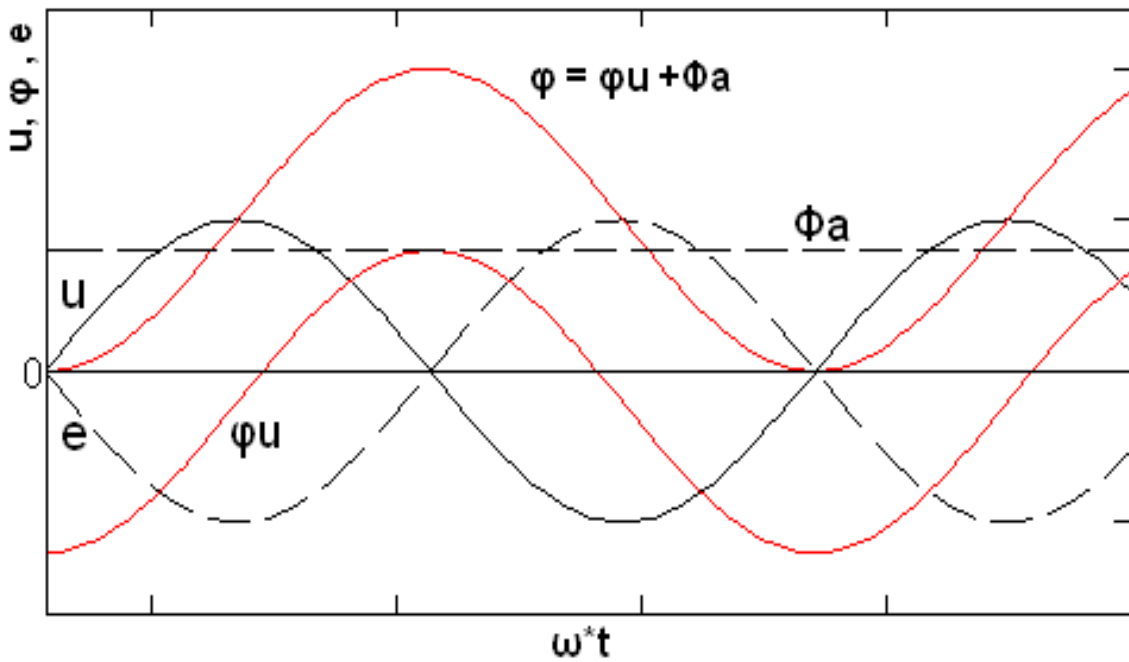
Dále si vznik zapínacího proudu vysvětlíme při stavu, kdy v okamžiku připojení jednofázového transformátoru k síti není výstupní vinutí zatíženo a vinutí jsou rovnoměrně navinuta na jádře. V okamžiku zapnutí transformátoru na síť musí být hodnota proudu rovna nule, nezávisle na okamžité hodnotě napětí. Tato hodnota má rozhodující vliv na další průběh poklesu magnetizačního proudu. Pokud zapneme transformátor v okamžiku, kdy napětí dosáhlo své maximální hodnoty a nebudeme uvažovat remanenci, potom tok v magnetickém



Obr. 2 Zapnutí transformátoru při maximálním napětí

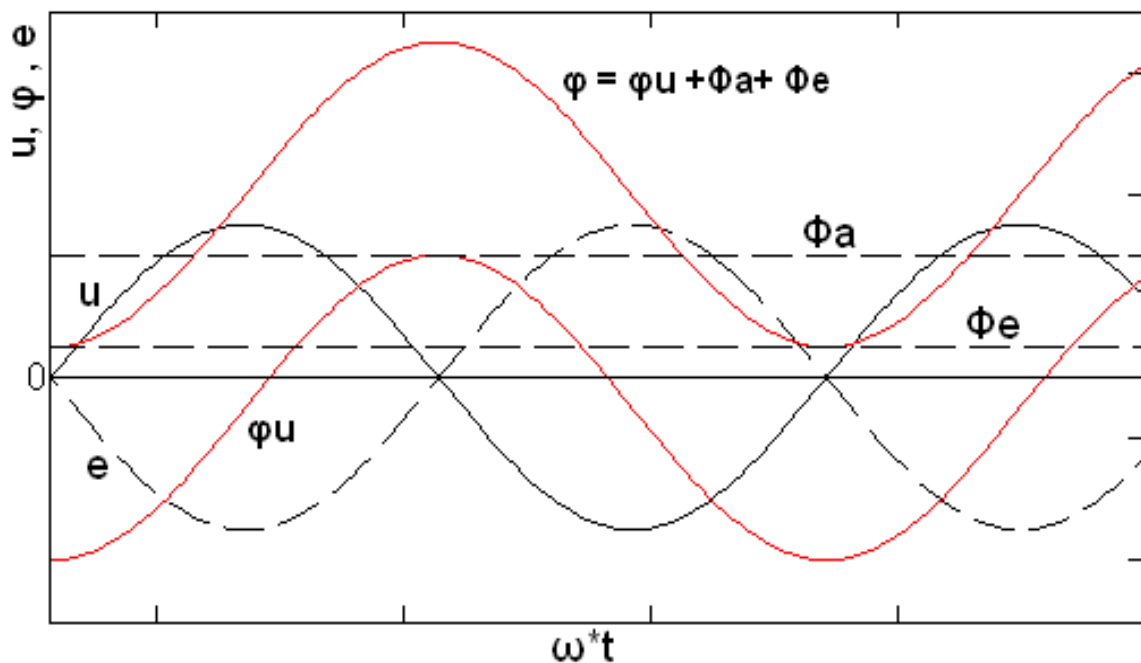
obvodě bude procházet nulou jako je na Obr. 2. Z toho vyplývá, že v tomto případě nastane ustálený stav a transformátorem poteče proud naprázdno.

Druhým krajním případem je zapnutí transformátoru v okamžiku, kdy napětí prochází nulou. V ustáleném stavu odpovídá nulové hodnotě napětí maximální hodnota toku. Jelikož musí být v prvním okamžiku magnetický tok roven nule, vzniká stejnosměrná složka tohoto toku Φ_a , která zaniká u menších transformátorů po několika desítkách period a u větších



Obr. 3 Vznik stejnosměrné složky

transformátorů po několika tisících periodách. Pokud přičteme tuto složku k ustálenému stavu φ_u (Obr. 3), potom maximální hodnota magnetického toku dosáhne dvojnásobné hodnoty vzhledem k předchozímu případu.



Obr. 4 Vliv remanentního magnetismu

Další zvýšení maximální hodnoty magnetického toku může být způsobeno remanentním magnetismem Φ_0 (Obr. 4). Při značné hodnotě magnetického toku bude

maximální hodnota budícího proudu větší než amplituda proudu v případě připojení transformátoru při maximální hodnotě napětí.[2]

Stejně jako hodnota může být i polarita remanentního magnetismu obecně různá. Nejvyšší možná hodnota indukce remanentního magnetismu B_0 závisí na konstrukci magnetického obvodu a na druhu použitého plechu. U přeplátovaných magnetických obvodů může tato hodnota dosáhnout orientačně: [2]

- U plechů válcovaných za studena 0,9 až 1T.
- U plechů válcovaných za tepla 0,6 až 0,75T.

2.2 Matematické vyjádření zapínacího proudu

Matematicky lze popsat jednotlivé děje nelineárními diferenciálními rovnicemi prvního řádu.

$$u_1 = R_1 \cdot i_1 + N_1 \cdot \frac{d\varphi(i)}{dt} \quad (2.4)$$

Kde závislost $\varphi(i)$ je nelineární. Tento člen zlinearizujeme tak, že za proud dosadíme:

$$i = N_1 \cdot \frac{\varphi}{L_{11}} \quad (2.5)$$

Kde L_{11} je celková indukčnost vstupního vinutí. Po linearizaci dostane rovnice tvar:

$$R_1 \cdot N_1 \cdot \frac{\varphi}{L_{11}} + N_1 \cdot \frac{d\varphi}{dt} = \sqrt{2} \cdot U_1 \cdot \sin(\omega t + \psi) \quad (2.6)$$

Kde ψ je okamžitá hodnota napětí v okamžiku připojení. Pro okamžitou hodnotu celkového magnetického toku platí:

$$\varphi = \phi_{1M} \cdot \sin(\omega t + \psi + \psi_0) - \phi_{1M} \cdot \sin(\psi - \psi_0) \cdot e^{-\frac{t}{\tau_0}} \quad (2.7)$$

kde

$$\phi_{1M} = \frac{\sqrt{2} \cdot U_1}{Z_{11}} \quad (2.8)$$

Tlumení aperiodické složky charakterizuje maximální hodnota magnetického toku a τ_0 časová konstanta.

$$\tau_0 = \frac{L_{11}}{R_1} \quad (2.9)$$

Pro chod naprázdno platí:

$$\psi_0 = \arctg. \frac{X_{11}}{R_1} \approx 90^\circ \quad (2.10)$$

a výslednou hodnotu magnetického toku vyjadřuje vztah:

$$\varphi = \phi_{1M} \cdot \cos(\omega t + \psi + \psi_0) - \phi_{1M} \cdot \cos(\psi - \psi_0) \cdot e^{-\frac{t}{\tau_0}} \quad (2.11)$$

První člen tohoto výrazu představuje aperiodickou složku, druhý člen potom představuje ustálený sinusový magnetický tok. Aperiodická složka nevznikne, zapne-li transformátor v okamžiku, kdy hodnota napětí dosahuje svého maxima. Magnetický tok bude mít největší hodnotu pro $\psi = k \cdot \pi$ (k je přirozené číslo) v okamžiku, kdy napětí bude procházet nulou. Při uvážení remanence dojde podle polaroty k další změně magnetického toku.

Pokud je transformátor připojen v nulovém napětí, hodnota indukce může dosáhnout velikosti:

$$B_{\max} = B_0 + 2B = 0,95 + 2 \cdot 1,65 = 4,25T \quad (2.12)$$

kde B_0 je indukce remanentního magnetismu a B je hodnota indukce u plechů válcovaných za studena. Jelikož má indukce nasycení hodnotu asi 2 T, dojde k přesycení jádra a tok se uzavírá okolím. Potom proud protékající obvodem je omezen odporem vinutí a rozptylovou reaktancí obvodu a může nabývat vysokých hodnot. Pro maximální hodnotu zapínacího proudu platí:

$$I_{z\max} = \frac{\sqrt{2U_1}}{X_p} \quad (2.13)$$

Kde X_p představuje reaktanci kruhové cívky bez železa o výšce l , která se určí ze vztahu:

$$X_p = 2\pi f \cdot N_1^2 \cdot \mu_0 \frac{S}{l} \quad (2.14)$$

$S = \pi \cdot D^2/4$ je střední průřez pro střední průměr cívky D .

Vzorec pro maximální hodnotu zapínacího proudu byl odvozen při zanedbání činného odporu vinutí. Jinak tento odpor slouží pro tlumení stejnosměrné složky magnetického toku, a tím snižuje největší možné hodnoty zapínacího proudu. [3]

3. Konstrukce třífázového transformátoru

3.1 Konstrukce magnetického obvodu

Rozlišujeme dva druhy magnetických obvodů transformátoru, a to jádrový a plášťový. V trojfázovém jádrovém transformátoru odpovídá každé fázi jedno jádro. Všechna jádra jsou magneticky spojena dvěma spojkami a fázové magnetické toky tvoří trojfázovou hvězdu fázorů. Jádrové transformátory můžeme dále rozdělit na dvě skupiny: a) se symetrickým, b) s nesymetrickým magnetickým obvodem.

Trojfázový plášťový transformátor tvoří tři jednofázové plášťové transformátory, postavené vedle sebe. Vinutí fází se zapojují tak, aby součet fázových toků ve spojkách magnetického obvodu nevětšoval celkový magnetický tok. Střední fáze má proto zapojeno vstupní i výstupní vinutí obráceně. V tomto případě budou toky ve všech místech spojek rovny polovině toku v jádře. Při souhlasném zapojení vinutí střední fáze magnetické toky ve spojkách vzrostou $\sqrt{3}$ krát.

Výše popsané konstrukce jádrových a plášťových magnetických obvodů mají osy jader i spojek v jedné rovině. V poslední době, zvláště pro transformátory malých výkonů, se někdy používají souměrné magnetické obvody, v nichž osy jader neleží v jedné rovině. Průřez spojek se tak zmenší přibližně $\sqrt{3}$ krát, což vede ke snížení ztrát a proudu naprázdno.

U transformátorů větších výkonů než $80 \div 100$ MVA v jedné fázi a napětí na 220 a více kV se pro snížení výšky magnetického obvodu a umožnění dopravy transformátorů po železnici používají jádrové transformátory s vedlejšími pomocnými jádry. Tato konstrukce vyžaduje větší hmotnost plechů, ale umožňuje však zmenšit celkovou výšku magnetického obvodu obvykle o výšku spojky.

Podle způsobu, jakým jsou spojena jádra se spojkami, rozlišujeme magnetické obvody přeplátované a s tupým stykem. U magnetických obvodů s tupým stykem se jádra a spojky skládají z plechů samostatně a v jeden obvod se spojují pomocí vertikálních svorníků. V přeplátovaných magnetických obvodech se jádra i spojky skládají současně, aby tvořily uzavřený obvod. Po složení magnetického obvodu se horní spojka vyjme a na jádra se umístí vinutí. Pak se plechy spojky opět zasunou na původní místo.

Výhodou konstrukcí s tupým stykem je poměrně jednoduchá montáž magnetického obvodu a vinutí. Mají však i některé podstatné nedostatky. Ve stykových místech mohou

vzniknout značné vířivé proudy, způsobené překrytím plechů spojky a jádra. Vířivé proudy vytvoří dodatečné ztráty, které mohou způsobit značné ohřátí železa v místech styku. Mezi jádra a spojky se proto vkládají pevné tenké izolační vložky z teplovzdorného materiálu. Tím se však zvětšuje magnetizační proud transformátoru a přitom se neodstraňuje možnost nežádoucího spojení plechů, pokud jsou místa styku plechů pod větším tlakem. Konstrukce magnetických obvodů s tupým stykem se používají jen zřídka (např. pro tlumivky).

Dnes se magnetické obvody skládají z orientovaných plechů, jejichž magnetické vlastnosti (měrné ztráty a magnetická vodivost) jsou lepší ve směru válcování plechů než ve směru kolmém. Ztráty v železe a úbytky magnetického napětí jsou proto v místech ohybu indukčních siločar při jejich přechodu z jádra do spojky (ohyb o 90°) větší než ve vlastním jádře a spojce. Částečně se tento jev dá odstranit použitím zkosených listů plechů a zvláštním způsobem přeplátování, avšak z technologického hlediska je taková konstrukce složitější. [4]

3.2 Konstrukce vinutí transformátoru

Vinutí transformátoru musí vyhovovat řadě důležitých požadavků, pro něž jsou určující:

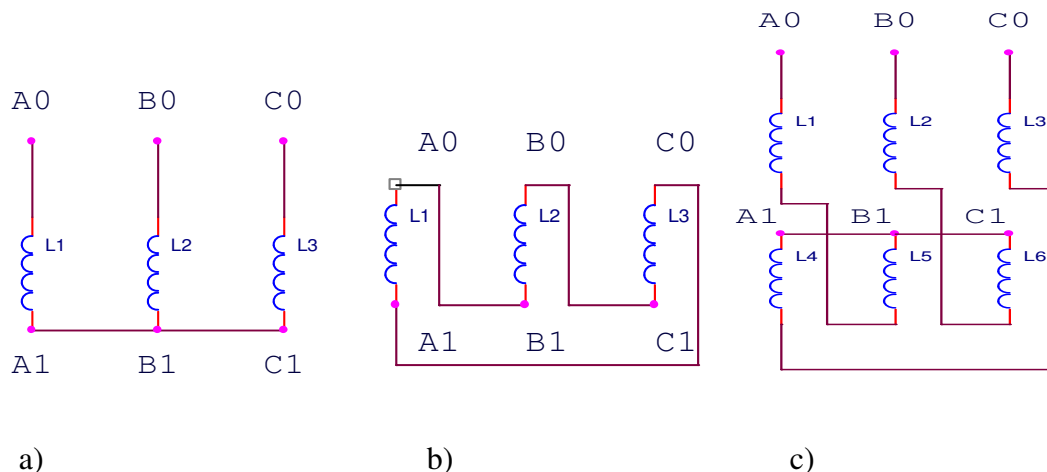
- Mechanická pevnost - Vinutí musí snést bez poškození mechanické namáhání při stahování během montáže i při zkratech, kdy na závity a cívky působí velké elektromagnetické síly.
- Elektrická pevnost - Izolace musí vydržet bez poškození dlouhodobé namáhání střídavým elektrickým polem při jmenovitých podmínkách provozu i krátkodobá zvýšená rázová namáhání při přepětích. Elektrická pevnost izolace vinutí se prověřuje zkouškami, které jsou předepsány normami ČSN 35 1080 *).
- Technologická proveditelnost - Výroba vinutí musí být jednoduchá a levná.
- Odolnost proti tepelnému namáhání - Konstrukce vinutí musí zaručovat jejich dobré chlazení, teplota izolace nesmí překročit hodnoty stanovené pro jejich třídu izolace.
- Ekonomika provozu - Elektrické ztráty ve vinutí nesmí překročit přípustné hodnoty.

*) ČSN 35 1080 - Základní zkoušky elektromagnetických strojů netočivých

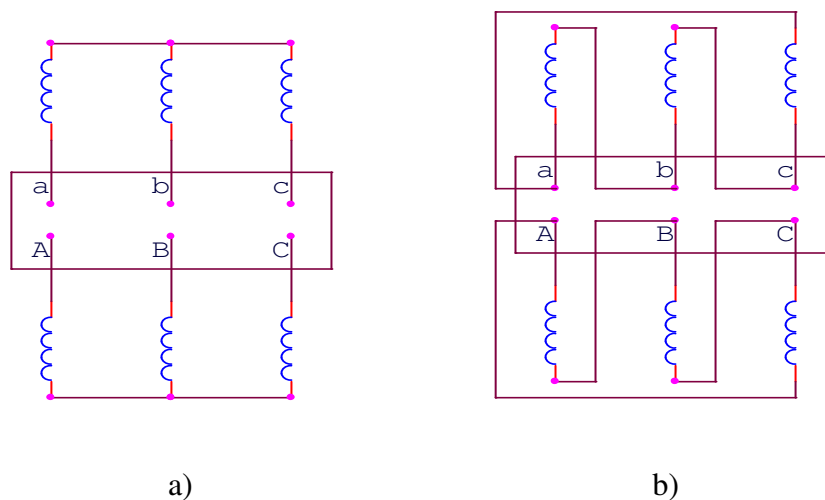
Konstrukce vinutí jsou velmi rozmanité. Hlavní veličiny, které určují druh konstrukce, jsou jmenovitý proud, jmenovité napětí transformátoru a proudová hustota. Podle velikosti jmenovitého proudu se volí průřez vodičů a popř. i počet paralelních větví. Proudová

hustota u transformátorů olejových může být pro vodiče z mědi v rozmezí $2 \div 4,5 \text{ A}\cdot\text{mm}^{-2}$, u vzduchových transformátorů $1 \div 2,5 \text{ A}\cdot\text{mm}^{-2}$. Měděné vodiče, které se používají pro vinutí, mají průřezy buď kruhové (dráty), nebo čtyřhranné obdélníkové nebo čtvercové (pásy). Vliv na volbu konstrukce izolace mezi závity, cívkami a na izolaci jednotlivých částí vinutí vzhledem k dalším vodivým i vůči uzemněným částem transformátoru má jmenovité napětí transformátoru.

U trojfázových transformátorů se používají různá spojení vinutí. Nejčastěji se používají vinutí zapojená do hvězdy a trojúhelníku, méně často spojení do lomené hvězdy (Obr. 5). Ostatní spojení se používají jen ve zvláštních případech. Spojení do hvězdy se označuje u vinutí vyššího napětí písmenem Y , u nižšího napětí y . Spojení vinutí do trojúhelníku podobně D nebo d a spojení do lomené hvězdy Z a z . Je-li vyveden nulový bod vinutí, značí se YN , ZN , yn , zn . [4]



Obr. 5 Schémata zapojení a) hvězda, b) trojúhelník, c) lomená hvězda



Obr. 6 Schéma skupinového zapojení a) Yy , b) Dd

4. Zapínací proud třífázových transformátorů

Zapínací proud třífázových transformátorů vzniká stejně jako u jednofázových, liší se pouze větší složitostí způsobenou vzájemným ovlivňováním jednotlivých fází prostřednictvím společného magnetického obvodu, vinutí nebo obojího. Možných kombinací je mnoho, přičemž je nutné řešit každou variantu zvlášť. Činitelé, které analýzu jevu především ovlivňují jsou zejména:

- Obtížné zjištění hodnoty i smyslu toku remanentního magnetismu v každém jádře
- Závislost průběhu zapínacího proudu na skupině spojení vedení
- Vliv jádra s nasyceným magnetickým obvodem na reakce zbylých jader
- Možnost nestejného časového sepnutí kontaktů vypínače

Vezmeme-li v potaz tyto činitele, zjistíme, že rozbor zapínacího proudu trojfázových transformátorů je mnohem složitější a méně přesný než u jednofázových. [2]

4.1 Vliv skupinového zapojení na zapínací proud

Vliv skupinového zapojení na zapínací proud je pro každé zapojení odlišný. Hlavním důvodem je chování magnetického obvodu a ovlivňování fází mezi sebou. Záleží také na uspořádání konstrukce magnetického obvodu, vinutí a použitím materiálu jádra transformátoru. Velikost zapínacího proudu můžou ovlivňovat také rozptylové indukčnosti a činné odpory primárních vinutí jednotlivých fází a reaktance fázových vinutí způsobené změnami indukci.

4.1.1 Vstupní vinutí zapojeno do hvězdy s vyvedeným středem (YN)

U této skupiny spojení vinutí se chová každé z fázových vinutí nezávisle. Pro výpočet zapínacího proudu je možno použít vztah:

$$I_{Max} = \frac{U \cdot \sqrt{2}}{X_p} \left(2 + \frac{B}{B_0} - \frac{B_{ns}}{B} \right). \quad (4.1)$$

kde, hodnotu napětí U musíme nahradit hodnotou $\frac{U_s}{\sqrt{3}}$, kde U_s je sdružené napětí, na které je připojen transformátor. Pokud se kontakty vypínače neseponou současně, může se hodnota zapínacího proudu nepatrně zvětšit. U ostatních skupin spojení nemá současnost spínání kontaktů prakticky žádný vliv na hodnotu zapínacího proudu. [2]

4.1.2 Vstupní vinutí spojené do trojúhelníka (D)

U trojúhelníka na vstupní straně je každé z fázových vinutí magnetizováno nezávisle. Maximální hodnota zapínacího proudu ve fázi může být vypočtena podle vztahu (4.1) při dosazení $U = U_s$. Určení největší možné hodnoty sdruženého proudu odebíraného vinutím do trojúhelníka při respektování všech ovlivňujících činitelů je značně obtížné. Orientačně se uvádí, že hodnota sdruženého proudu je asi o 20 až 30 % větší než největší fázový proud vypočtený podle vztahu (4.1). U tohoto zapojení prakticky nezávisí na spojení vinutí výstupní strany transformátoru.

4.1.3 Vstupní vinutí spojeno do hvězdy, výstupní do trojúhelníka (YNd)

Změna magnetické indukce v jednotlivých jádrech trojfázového obvodu vede ke změně reaktancí vinutí na těchto jádrech. Výstupní vinutí zapojené do trojúhelníka způsobuje, že kromě nesymetrie zatížení zůstane na vstupní straně hvězda napětí prakticky symetrická.[2] Maximální zapínací proud lze vypočíst dle vztahu:

$$I_{Max} = \frac{2}{3} \cdot \frac{U_s}{\sqrt{3}} \cdot \frac{1}{X_p} \left(2 + \frac{B}{B_0} - \frac{B_{ns}}{B} \right). \quad (4.2)$$

4.1.4 Vstupní i výstupní vinutí spojena do hvězdy (Yy)

Vyjadřování zapínacího proudu u tohoto zapojení je komplikovanější než u předešlých skupin zapojení. Vyplývá to ze stálého přemísťování nulového bodu vstupní hvězdy v důsledku změny reaktance fázových vinutí (způsobené změnami indukcí). Zapínací proud se může uzavírat pouze zbylými vinutími. Jeho velikost tedy navíc omezují rozptylové indukčnosti a činné odpory primárních vinutí dalších fází.[2]

Pro výpočet zapínacího proudu lze použít vztah:

$$I_{Max} = \frac{U_s \cdot \sqrt{2}}{2 \cdot X_p} \left(2 + \frac{B}{B_0} - \frac{B_{ns}}{B} \right) \quad (4.3)$$

4.1.5 Obě vinutí zapojena do hvězdy s vyvedeným středem (YNyn)

Magnetický obvod je v tomto zapojení společný pro všechny fáze a ty se jeho prostřednictvím navzájem ovlivňují. Dojde-li k přesycení jednoho sloupku transformátoru ztrácí indukčnost i cívky ostatních fází. Zapínací proud se v tomto zapojení uzavírá podle Kirchhoffova zákona do ostatních fází, ale většina odtéká právě středním vodičem. Průběhy zapínacího proudu pro jednotlivé fáze jsou téměř identické, ale jsou samozřejmě posunuty o 120°. [7]

4.2 Vliv konstrukce magnetického obvodu na zapínací proud

Zapínací proud třífázového transformátoru je ovlivněn tím, že sloupek s přesycenou fází ztratí magnetickou vodivost. Protože je společnou částí magnetického obvodu dalších dvou fází, dojde u nich rovněž k poklesu reaktance a nárůstu proudu, i když u nich ještě k saturaci nedošlo.

U standardní konstrukce EI je magnetický obvod nesymetrický, což se projeví i na velikostech zapínacího proudu. Fáze využívající střední sloupek se bude chovat odlišně od fází na krajních sloupcích. Příznivější poměry rozptylových toků má střední sloupek, proto zde bude hodnota zapínacího proudu menší. Z následujících měření však plyne, že tento vliv je sotva patrný. Zmenšení velikosti zapínacího proudu je minimální.

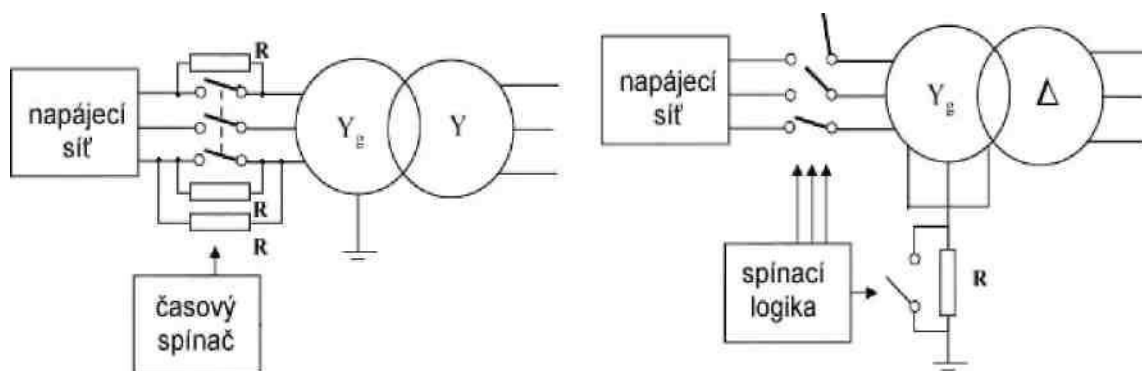
Symetrická konstrukce - symetrie zaručuje i symetrii z pohledu zapínacího proudu. Fáze se sice ovlivňují tím, že sloupky jsou společnou částí magnetického obvodu, ale díky symetrii jsou průběhy a velikosti ve všech fázích stejné.

4.3 Metody pro omezení zapínacího proudu u třífázových transformátorů

Jelikož jsou třífázové transformátory používány většinou pro větší výkony, tak se zde neuplatní řada principů omezování zapínacího proudu u jednofázových transformátorů,

kteřé jsou vhodné pro menší výkony. V praktických realizacích a odborných publikacích se objevuje několik následujících metod.

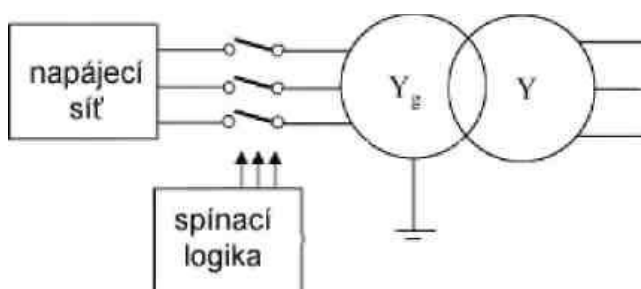
Standardní metodou je rozběh odporovým nebo indukčním spouštěčem. Transformátor je připínán přes impedanci omezující zapínací proud, která je po rozběhu zkratována. Pro větší výkony je toto řešení nákladné a tak někteří autoři hledají cesty k omezení počtu rozběhových impedancí. Autoři Cui a Abdulsalam používají jeden rezistor zapojený do středního vodiče v kombinaci s primitivním sekvenčním spínáním jednotlivých fází.



Obr. 9 Vlevo odporový spouštěč, vpravo odporový spouštěč ve středním vodiči v kombinaci se sekvenčním spínáním

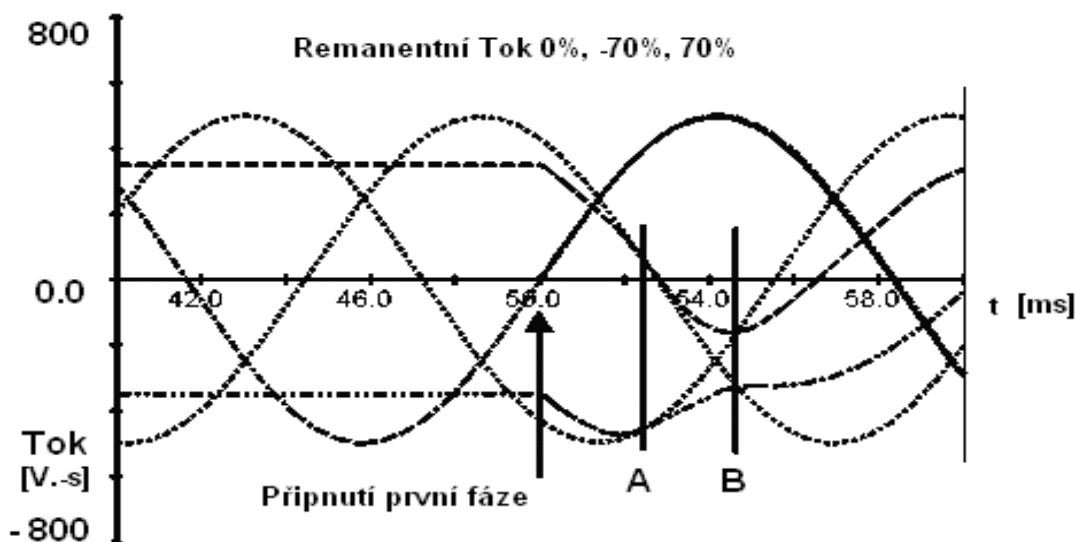
Další z metod pro zmenšení zapínacího proudu je paralelní připojení baterie kondenzátorů k transformátoru. Kondenzátory oscilačně vybíjí magnetickou energii nashromážděnou v magnetickém obvodu transformátoru po jeho vypnutí, což ve značné míře zmenší velikost remanentního magnetismu.

Nejrozšířenější je dnes metoda sekvenčního spínání jednotlivých fází. Používaných sekvencí je několik, B–AC se zpožděním $1/4T$, B–AC se zpožděním $(2+1/4)T$, A–C–B se zpožděními $1/6T$ a další. Pro realizaci je nutné použít oddělené spínače v jednotlivých fázích a je třeba znát remanentní tok v jádře transformátoru. Metody jsou přitom optimalizované pouze na některá skupinová spojení. [1]



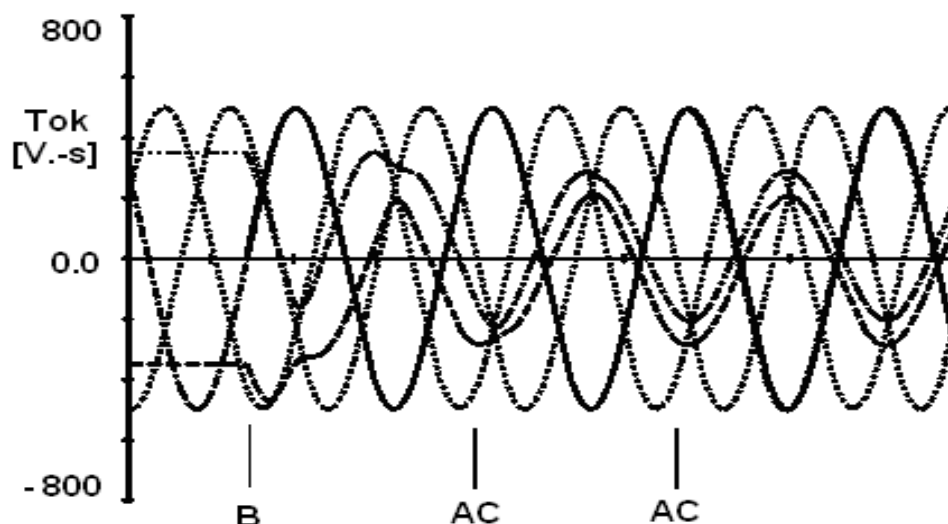
Obr. 10 Jednoduchost sekvenčního spínání

Princip je patrný z obrázku 11. Uvažujeme, že před zapnutím jsou sloupky transformátoru zmagnetovány postupně na -70% , 0 a 70% amplitudy jmenovitého toku transformátoru. Na obrázku jde o vodorovné části křivek. V čase 50 ms dojde k připnutí první fáze B podle sekvence spínání B-AC. Tok ve fázi B má pak sinusový tvar – k zapnutí došlo v optimálním čase a nevznikl zapínací proud. Díky společnému magnetickému obvodu vzniká tok i ve sloupcích fáze A a C – podle Hopkinsonova zákona s poloviční velikostí. V časech označených na obrázku A a B přitom dojde ke shodě mezi aktuální hodnotou magnetického toku vyvolaného pouze fází B s tokem, který by tekla sloupky plně připojeného transformátoru. Jsou to tedy optimální okamžiky sepnutí zbylých dvou fází A a C. Jak je uvedeno v práci [10] dochází k tomuto vyrovnání po $1/4$ periody T .



Obr. 11 Průběhy magnetických toků částí jádra při sekvenčním spínání podle Brunkeho a Frölicha [10]

Na obrázku 12 je znázorněn stejný případ pro delší odstup sepnutí zbývajících fází A a C pro $(1+1/4)T$ a $(2+1/4)T$. Patrný je demagnetizační efekt, při kterém odeznívá stejnosměrná složka toků a průběhy se tak lépe blíží teoretickým tokům připnutého transformátoru.



Obr. 12 Průběhy magnetických toků při sekvenčním spínání s delším zpožděním [10]

Pro spínání jsou přitom běžně používány mechanické spínače, které se nevyhnou přeskokům oblouku a odskakování. Přitom je třeba zajistit definovanou dobu připnutí. Je tedy vhodné preferovat sekvence méně citlivé na přesnost dob sepnutí a ověřit vlastnosti spínačů.

Největším problémem sekvenčního spínání je zjišťování počáteční remanentní magnetizace. Velmi často je problematické měření magnetizace obcházeno například řízeným sekvenčním vypínáním transformátoru nebo demagnetizací pomocí kondenzátorů paralelně připojených k transformátoru. Měření magnetizace pak není nutné, protože jádro je před dalším připnutím v definovaném stavu.

Nutno ještě připomenout, že připnutí transformátoru na síť ze strany odpovídající vnějšímu vinutí (většinou vyššího napětí) omezuje přirozeným způsobem zapínací proud.[1]

5. Vliv proudu na bezpečnost transformátoru

Proud tekoucí transformátorem při jeho připnutí k síti pro něj může být nebezpečný a to jak z hlediska tepelného tak z hlediska sil, které mohou vzniknout mezi jednotlivými částmi zapnutého vinutí. Za nejnebezpečnější se však považuje ráz zapínacího proudu, který se může víceméně nepříznivě odrazit v činnosti jisticích zařízení (například diferenciálního jistění) a potom také v měřicích zařízeních.[2]

Některé publikace uvádějí, že zapínací proud není nebezpečný, přesto jsou zdokumentovány případy destrukce vinutí zapínacím proudem a bylo analyticky

prokázáno, že síly vyvolané zapínacím proudem jsou řádově stejné jako při zkratových proudech.

Praktická část

6. Úvod do praktické části

Všechna měření probíhala v učebně EL2, kde je k dispozici měřicí ústředna, která byla pro měření nezbytná. Před samotným měřením bylo nutné vyrobit na transformátor přípravek, pomocí kterého se transformátor připojuje k síti a do obvodu.

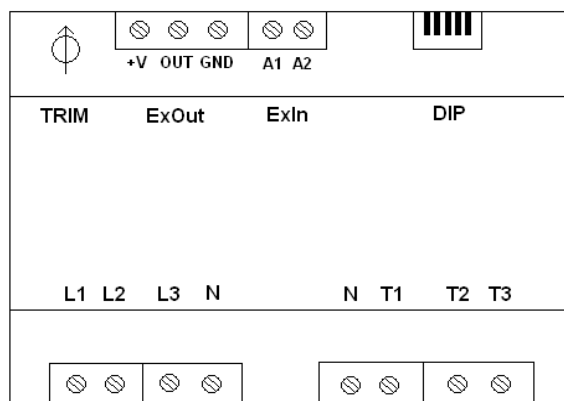
Pro měření zapínacího proudu byl použit přípravek s triaky, který bylo nutné upravit pro spínání, tak aby bylo měření automatizované. Zautomatizovalo se prostřednictvím programu vytvořeného v programovacím jazyce Delphi pomocí algoritmu Manchester kódu.

Dále bylo provedeno standardní měření naprázdno a nakrátko, které slouží k identifikaci parametrů náhradního obvodu transformátoru. V poslední, hlavní části, byla provedena a zhodnocena měření zapínacího proudu.

7. Přípravek pro měření zapínacího proudu třífázových transformátorů

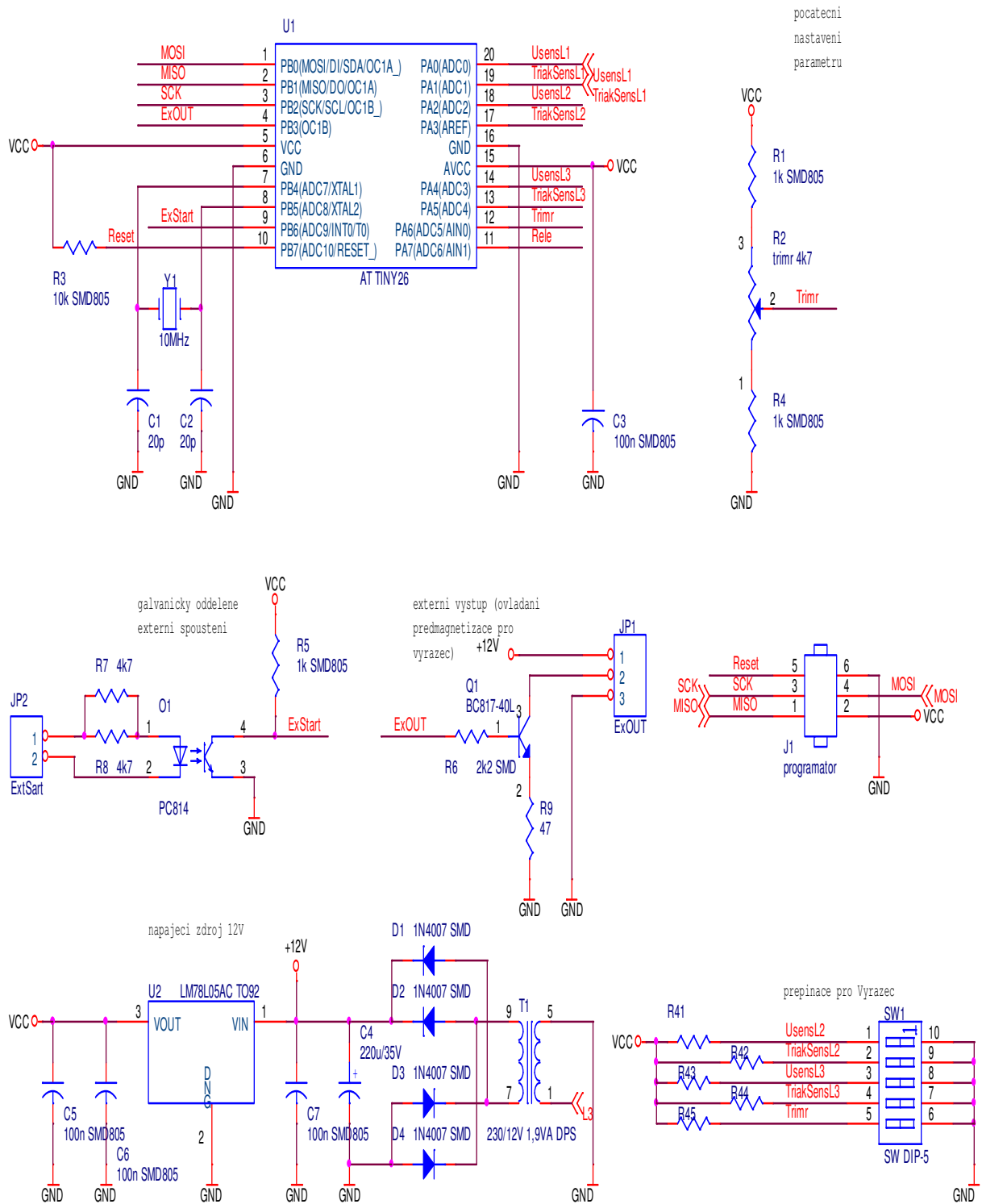
Přípravek vychází z obvodu měkkého rozběhu TrafoSTART pro připínání jednofázových transformátorků. Obsahuje tři identické výkonové části s triaky pro spínání primárních vinutí transformátoru. Ovládací vstup ExIn je galvanicky oddělený bipolárním optočlenem PC 814 (Obr. 14). Dále má ovládací trimr pro nastavení úhlu připojení k síti a DIP přepínač pro volbu režimu. V našem případě byly tyto dvě předešlé části zautomatizovány pomocí programu v počítači, takže nejsou využívány na přípravku. K ovládání magnetizačního přípravku a překlenovacího relé, které jsou součástí přípravku pro měření zapínacího proudu slouží výstup ExOut. Na svorkovnici výstupu je dostupné interní napájecí napětí, které je možné využít pro jednoduchou logiku ovládacího vstupu.

[8]



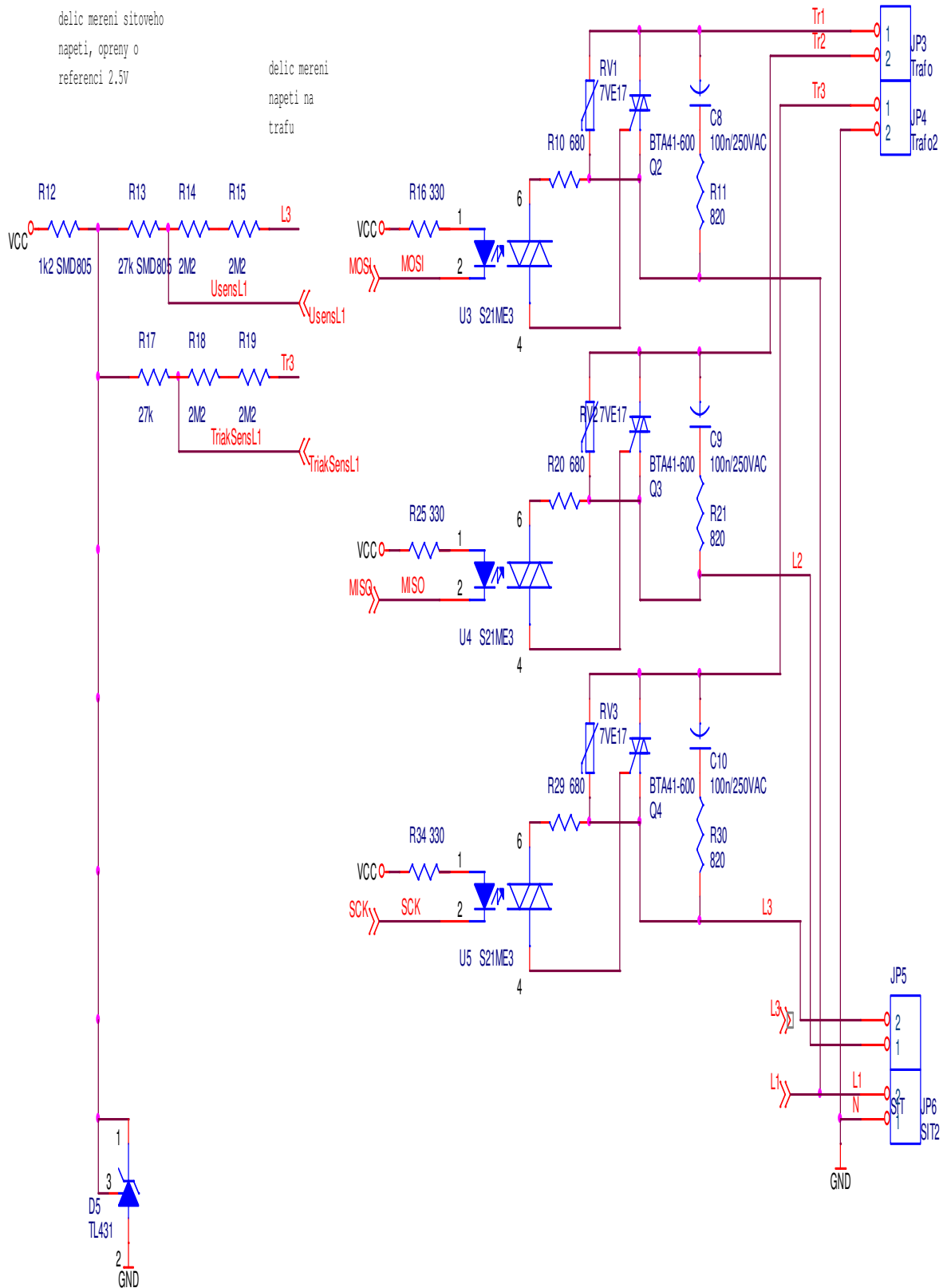
Obr. 13 Přípravek pro měření zapínacího proud

Zapínací proud třífázového transformátoru



Obr. 14 Vnitřní schéma zapojení přípravku pro měření zapínacího proudu – Trafostart, kontroler, ovládání [11]

Zapínací proud třífázového transformátoru

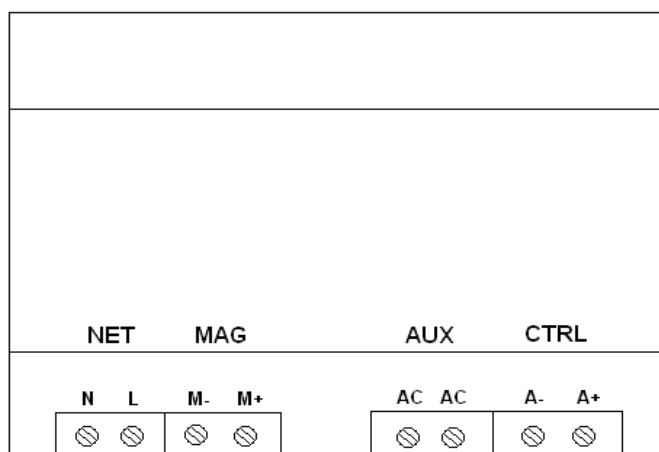


Obr. 15 Vnitřní schéma zapojení přípravku pro měření zapínacího proudu – Trafostart, výkonová část [11]

Tento přípravek byl zautomatizován pomocí Manchester kódu, jehož princip je popsán dále v kapitole 7.2. Úprava byla provedena proto, aby se úhel připojení transformátoru k síti nemusel nastavovat potenciometrem ručně, ale aby se nastavoval automaticky, čímž se zvýšila přesnost měření.

7.1 Přípravek pro magnetizaci jádra transformátoru

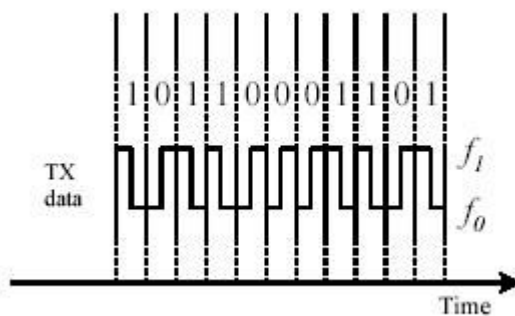
Přípravek obsahuje jednoduchý zdroj nestabilizovaného stejnosměrného napětí s vnitřním odporem 6 Ohm. Mezi zdrojem a svorkovnicí je zařazeno relé ovládané vstupem CTRL. Přípravek dokáže magnetovat jádro transformátoru proudem cca 2 A při zanedbatelném odporu vinutí transformátoru. Výstup AUX slouží jako zdroj napájecího napětí pro další přípravek měření počáteční remanentní magnetizace. Poskytuje střídavé napětí.[8]



Obr.16 Přípravek pro magnetizaci jádra transformátoru před měřením zapínacího proudu

7.2 Manchester kódování

Manchester kódování zajišťuje kódování i dekódování. Manchester kódy přijímají a doručují data buď bit po bitu nebo byte po byte. V Manchester módu je hodinový signál vysílán společně s daty. "1" je kódována jako vyšší frekvence f_1 následovaná nižší frekvencí f_0 . "0" je kódována jako nižší frekvence f_0 následovaná vyšší frekvencí f_1 .



Obr.17 Manchester kódování

Manchester kód zajišťuje, že signál má konstantní DC složku.[12]

8. Měření transformátoru nakrátko

Celé měření nakrátko je popsáno v ČSN 35 1086 [6]. Slouží pro určení ztrát nakrátko P_K a u_K . Toto měření má sloužit k identifikaci parametrů náhradního obvodu transformátoru. Z naměřených hodnot vypočítáme odpor R_P popisující ztráty ve vinutí, impedanci Z_P , reaktanci X_P a ztrátovou indukčnost L_P .

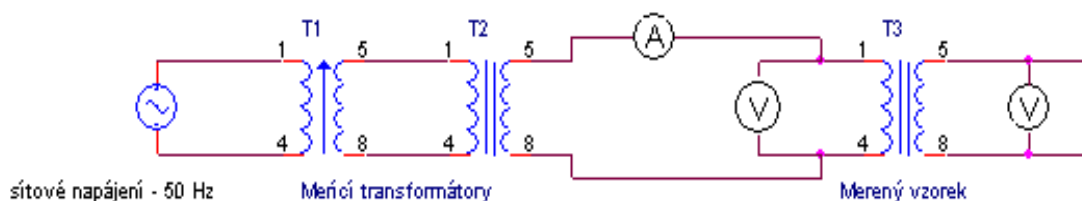
Stav nakrátko je stavem transformátoru, při kterém jsou sekundární svorky zkratovány. Zkratový proud, který protéká sekundárním vinutím je dán tvrdostí transformátoru a je značně vysoký (7-25x). Transformátor při chodu nakrátko se jeví jako tlumivka o určité impedanci Z_{1K} , jejíž reálná část R_{1K} je součtem ohmického odporu vstupního vinutí a přepočteného odporu výstupního vinutí $R_1+R'_2$ a imaginární část je dána součtem rozptylových reaktancí $X_{1\sigma}+X'_{2\sigma}$.

Abychom mohli určit tyto parametry, je nejlépe měřit transformátor tak, aby pracoval v oblasti nenasycení magnetického obvodu ale při jmenovitém proudu. Můžeme ho dosáhnout tak, že zkratujeme sekundární svorky vinutí a svorky primárního vinutí připojíme na výstupní svorky regulačního transformátoru. Když budeme zvyšovat napětí začne růst i proud protékající vinutími. Jakmile proud dosáhne hodnoty jmenovitého proudu I_{1K} , dosáhli jsme stavu nakrátko a odečteme hodnotu odpovídajícího napětí U_{1K} .

Toto napětí je napětím nakrátko, neboli jedním z provozních parametrů transformátoru. Pomocí převrácené hodnoty procentního napětí nakrátko lze určit ustálený zkratový proud při jmenovitém napětí. Impedance nakrátko je celková hodnota nahrazující sériové zapojení dvou odporů R_1 a R_2' a dvou reaktancí rozptylových indukčností

popisující primární a sekundární vinutí. Často se uvádí že přepočítané parametry sekundárního vinutí jsou hodnotově stejné jako parametry primárního vinutí. Proto lze také napsat, že $R_1 = R_2'$ a $X_{\sigma 1} = X_{\sigma 2}'$. Důležitou hodnotou při měření nakrátko jsou ztráty ΔP_K (tzv. ztráty nakrátko nebo ztráty ve vinutí) vznikající průchodem proudem vinutím. Odpovídají činnému odporu vinutí a jsou kvalitativním parametrem (spolu se ztrátami naprázdno ΔP_0) určující účinnost přenosu elektrické energie transformátorem.[5]

8.1 Schéma zapojení



Obr.18 Zapojení obvodu pro měření transformátoru nakrátko

Použité přístroje:

1. Měřený transformátor: BTV 5,0 (400 V /24 V; 3,0 kVA)
2. multimetr LOVATO
3. Pracoviště měření transformátoru:
 - Autotransformátor: ZPA Prešov, RA 3x10, 7,5 kVA, P: 380/230 V, S: 0-250 V, 3x10 A.

8.2 Vzorce pro výpočet prvků náhradního obvodu

Impedance se vypočítá z efektivních hodnot napětí, proudu, a z činného výkonu.

$$R_p = \frac{P_K}{I_K^2} \quad (8.1)$$

$$|Z_p| = \frac{U_K}{I_K} \quad (8.2)$$

$$X_p = \sqrt{|Z_p|^2 - R_p^2} \quad (8.3)$$

$$L_p = \frac{1}{\omega} * X_p \quad (8.4)$$

Hodnota vstupního napětí se vypočítá jako střední hodnota napětí jednotlivých fází.

$$U_K = \frac{U_{1U} + U_{1V} + U_{1W}}{3} \quad (8.5)$$

Hodnota vstupního proudu se vypočítá jako střední hodnota proudu jednotlivých fází.

$$I_K = \frac{I_{1U} + I_{1V} + I_{1W}}{3} \quad (8.6)$$

Celkový činný výkon a jalový výkon dodávané do transformátoru je roven střední hodnotě výkonů jednotlivých fází.

$$P_K = \frac{P_{1U} + P_{1V} + P_{1W}}{3} \quad (8.7)$$

$$Q_K = \frac{Q_{1U} + Q_{1V} + Q_{1W}}{3} \quad (8.8)$$

8.3 Naměřené hodnoty

Naměřené hodnoty napětí a výkonů při metodě měření nakrátko se násobí konstantou $k = 0,03636 \dots$ násobitel pro napětí a výkon. V průběhu obou měření se měřila fázová napětí.

I_{1U} [A]	I_{1V} [A]	I_{1W} [A]	I_K [A]	I_{sec} [A]	U_{1U} [V]	U_{1V} [V]	U_{1W} [V]	U_K [V]	$\cos \varphi$ [-]p.f.
10	10,1	10,1	10,07	81,5	9,31	9,56	9,16	9,34333	0,93
9	9,03	8,98	9,003	74,4	8,69	8,87	8,47	8,67667	0,93
8,02	8,01	7,96	7,997	66,5	7,82	7,96	7,56	7,78	0,93
7,01	7,04	6,99	7,013	58,3	6,84	6,98	6,65	6,82333	0,93
6,04	6,12	6,04	6,067	50,6	5,89	6,04	5,78	5,90333	0,93
5,01	5,02	5,02	5,017	41,9	4,91	4,95	4,76	4,87333	0,94
3,99	4,05	4	4,013	33,4	3,85	4	3,78	3,87667	0,94
3,01	3,07	3,02	3,033	25,5	2,91	3,02	2,88	2,93667	0,93
2,02	2,07	2,06	2,05	17,4	1,95	2,02	1,96	1,97667	0,94
1,02	1,07	1,05	1,047	9,04	0,97	1,04	0,99	1	0,95

Tab. 1: Naměřené hodnoty při měření transformátoru nakrátko

P_{IU} [W]	P_{IV} [W]	P_{IW} [W]	P_K [W]	Q_{IU} [Var]	Q_{IV} [Var]	Q_{IW} [Var]	Q_K [Var]	Cos φ_1 [-]	Cos φ_2 [-]	Cos φ_3 [-]
86,55	90,18	87,27	88	35,35	34,95	31,78	34,03	0,93	0,93	0,94
72,36	74,91	71,63	72,97	28,33	27,45	24,84	26,87	0,93	0,94	0,95
58,18	59,99	57,09	58,42	22,98	21,82	19,67	21,49	0,93	0,94	0,95
44,36	45,82	44	44,73	17,16	16,91	15,09	16,39	0,93	0,94	0,95
33,38	34,62	33,16	33,72	12,8	12,58	11,35	12,24	0,93	0,94	0,94
23,13	23,49	22,8	23,14	8,65	8,33	7,67	8,22	0,93	0,94	0,95
14,51	15,31	14,36	14,73	5,56	5,42	4,76	5,25	0,93	0,94	0,95
8,25	8,76	8,33	8,45	3,13	3,15	2,73	3,01	0,93	0,94	0,95
3,71	3,93	3,85	3,83	1,32	1,14	1,21	1,22	0,94	0,94	0,95
0,94	1,04	1,02	1	0,31	0,35	0,27	0,31	0,94	0,94	0,95

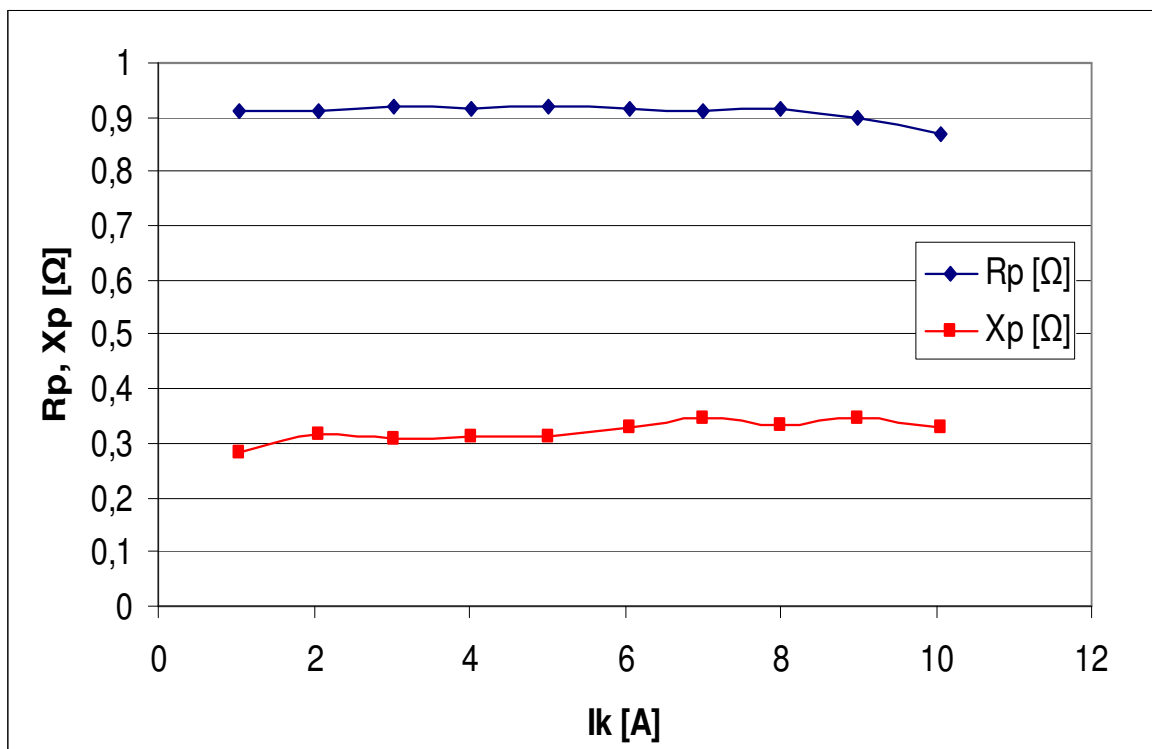
Tab. 2: Naměřené hodnoty při měření transformátoru nakrátko

8.4 Vypočtené hodnoty

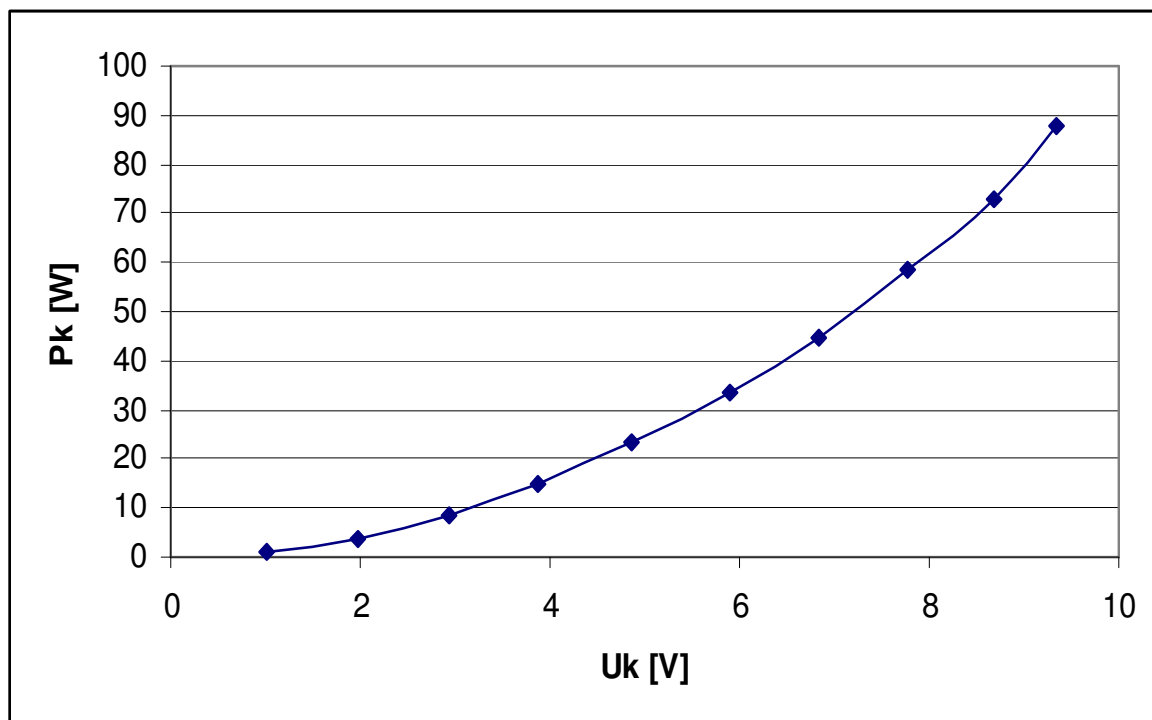
$Z_p[\Omega]$	$R_p[\Omega]$	$X_p[\Omega]$	$L_p[H]$
0,928145	0,868383	0,327667	0,001043
0,963717	0,900156	0,344194	0,001096
0,972905	0,913574	0,334557	0,001065
0,972909	0,909322	0,345956	0,001101
0,973077	0,916194	0,327823	0,001043
0,971429	0,919460	0,313475	0,000998
0,965947	0,914311	0,311590	0,000992
0,968132	0,918005	0,307483	0,000979
0,964228	0,911362	0,314887	0,001002
0,955414	0,912815	0,282105	0,000898

Tab. 3: Vypočtené hodnoty pro prvky náhradního obvodu při měření transformátoru nakrátko

8.5 Výsledné grafy



Graf 1: Parametry náhradního obvodu vinutí měřeného transformátoru z měření nakrátko



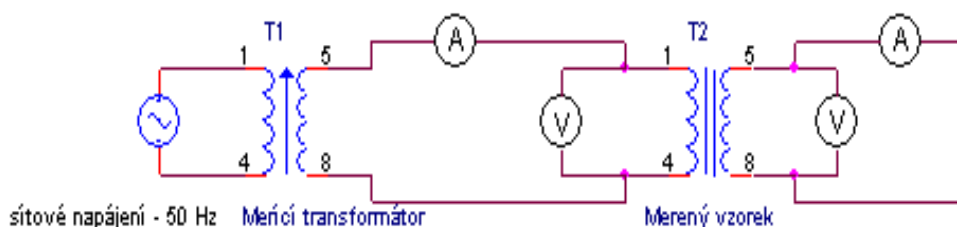
Graf 2: Závislost ztrátového výkonu nakrátko na napětí nakrátko

9. Měření transformátoru naprázdno

Celé měření naprázdno je popsáno v ČSN 35 1086 [6]. Měření naprázdno popisuje ztráty naprázdno P_0 a proud naprázdno i_0 . Z naměřených hodnot se počítají prvky náhradního schématu transformátoru odpovídající hlavní indukčnosti L_m (resp. X_m) a ztrátám v magnetickém obvodu R_m . Měření se provádí při jmenovitém napětí sinusového tvaru.

Stav naprázdno je stavem transformátoru, při kterém je $I_2=0$. Přesto primárním vinutím protéká proud I_{10} tzv. magnetizační, jenž je nutný pro vybuzení magnetického pole v magnetickém obvodu transformátoru při jmenovitém napětí U_{1N} . Tento proud se skládá ze dvou složek. První je raze induktivního charakteru a je fázově posunuta o 90° elektrických za fázorem proudu. Reprezentuje tak hlavní indukčnost L_μ (resp. X_μ) a tedy i hlavní tok v magnetickém obvodu. Druhá složka reprezentuje hysterezní ztráty a ztráty vířivými proudy. Tato složka je ve fázi s vektorem napětí a lze ji parametricky vyjádřit pomocí fiktivního odporu R_{Fe} , na němž tyto ztráty vznikají.

9.1 Schéma zapojení obvodu pro měření naprázdno



Obr. 19 Zapojení obvodu pro měření transformátoru naprázdno

Použité přístroje:

4. Měřený transformátor: BTV 5,0 (400 V /24 V; 3,0 kVA)
5. multimetr LOVATO
6. Pracoviště měření transformátoru:
 - Autotransformátor: ZPA Prešov, RA 3x10, 7,5 kVA, P: 380/230 V, S: 0-250 V, 3x10 A.

9.2 Vzorce pro výpočet prvků náhradního obvodu v zapojení naprázdno

Prvky náhradního obvodu při měření naprázdno lze vypočítat pomocí následujících rovnic pomocí výkonů.

$$R_m = \frac{U_0^2}{P_0} \quad (9.1)$$

$$X_m = \frac{U_0^2}{Q_0} \quad (9.2)$$

$$L_m = \frac{1}{\omega} * X_m \quad (9.3)$$

Hodnota vstupního napětí se vypočítá jako střední hodnota napětí jednotlivých fází.

$$U_K = \frac{U_{1U} + U_{1V} + U_{1W}}{3} \quad (9.4)$$

Hodnota vstupního proudu se vypočítá jako střední hodnota proudu jednotlivých fází.

$$I_K = \frac{I_{1U} + I_{1V} + I_{1W}}{3} \quad (9.5)$$

Celkový činný a jalový výkon dodávané do transformátoru je roven střední hodnotě výkonů jednotlivých fází.

$$P_K = \frac{P_{1U} + P_{1V} + P_{1W}}{3} \quad (9.6)$$

$$Q_K = \frac{Q_{1U} + Q_{1V} + Q_{1W}}{3} \quad (9.7)$$

9.3 Naměřené hodnoty

U_{1U} [V]	U_{1V} [V]	U_{1W} [V]	U_N [V]	U_{2U} [V]	U_{2V} [V]	U_{2W} [V]	U_N [V]	I_{1U} [A]	I_{1V} [A]	I_{1W} [A]	I_N [A]
238	236	235	236,333	31,81	32,4	31,75	31,9867	1,21	1,27	0,99	1,15666
221	227	218	222	27,07	27,7	26,98	27,25	0,89	1,02	0,84	0,91666
180	185	177	180,667	21,98	22,6	22,02	22,2	0,74	0,78	0,63	0,71666
141	146	140	142,333	17,37	17,87	17,4	17,5467	0,56	0,58	0,48	0,54
102	106	102	103,333	12,65	12,88	12,51	12,68	0,35	0,37	0,33	0,35
60,4	62,5	59,8	60,9	7,41	7,61	7,36	7,46	0,24	0,27	0,21	0,24
20,4	22,6	21,6	21,5333	2,67	2,72	2,51	2,63333	0,07	0,12	0,13	0,10666

Tab. 4: Naměřené hodnoty při měření transformátoru naprázdno

P_{1U} [W]	P_{1V} [W]	P_{1W} [W]	P_N [W]	Q_{1U} [Var]	Q_{1V} [Var]	Q_{1W} [Var]	Q_N [Var]	$\cos_1\phi$ [-]	$\cos_2\phi$ [-]	$\cos_3\phi$ [-]
140	66	65	90,3333	240	255	242	245,667	0,57	0,08	0,32
115	65	78	86	161	223	166	183,333	0,61	0,23	0,41
85	40	44	56,3333	107	141	104	117,333	0,57	0,32	0,47
48	26	30	34,6667	65,6	84	61,6	70,4	0,48	0,39	0,34
25	15	14	18	33,7	40,8	33,2	35,9	0,52	0,41	0,35
7,5	7	5,2	6,56667	11,3	14,9	11,2	12,4667	0,58	0,42	0,44
0,76	1,16	0,46	0,79333	1,43	1,54	2,73	1,9	0,13	0,82	0,21

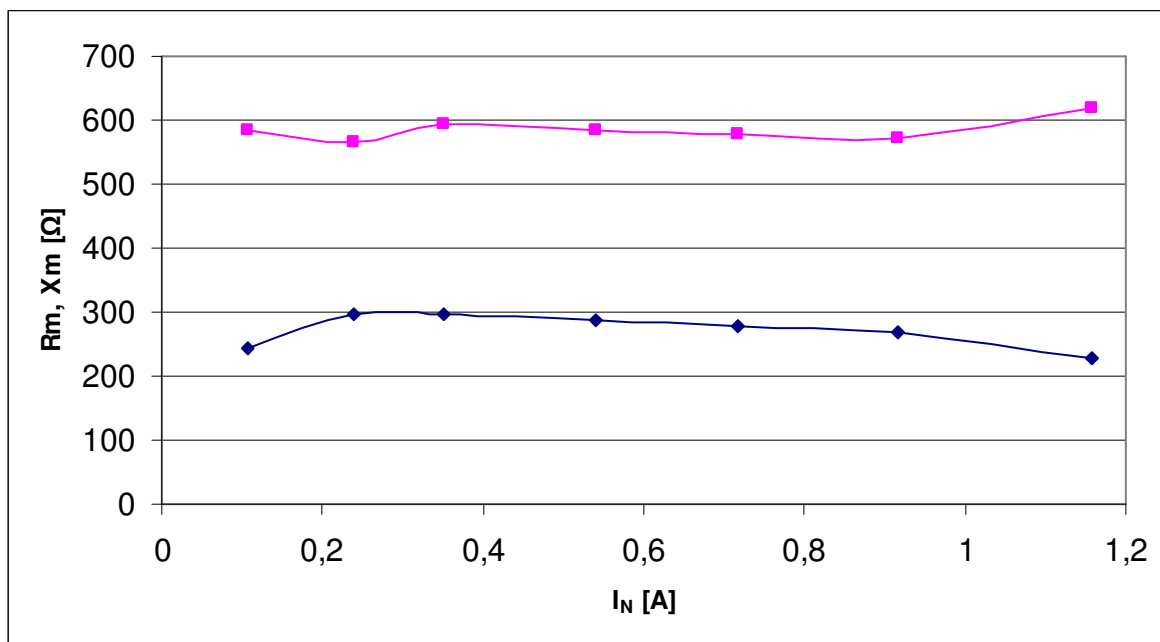
Tab. 5: Naměřené hodnoty při měření transformátoru naprázdno

9.4 Vypočtené hodnoty

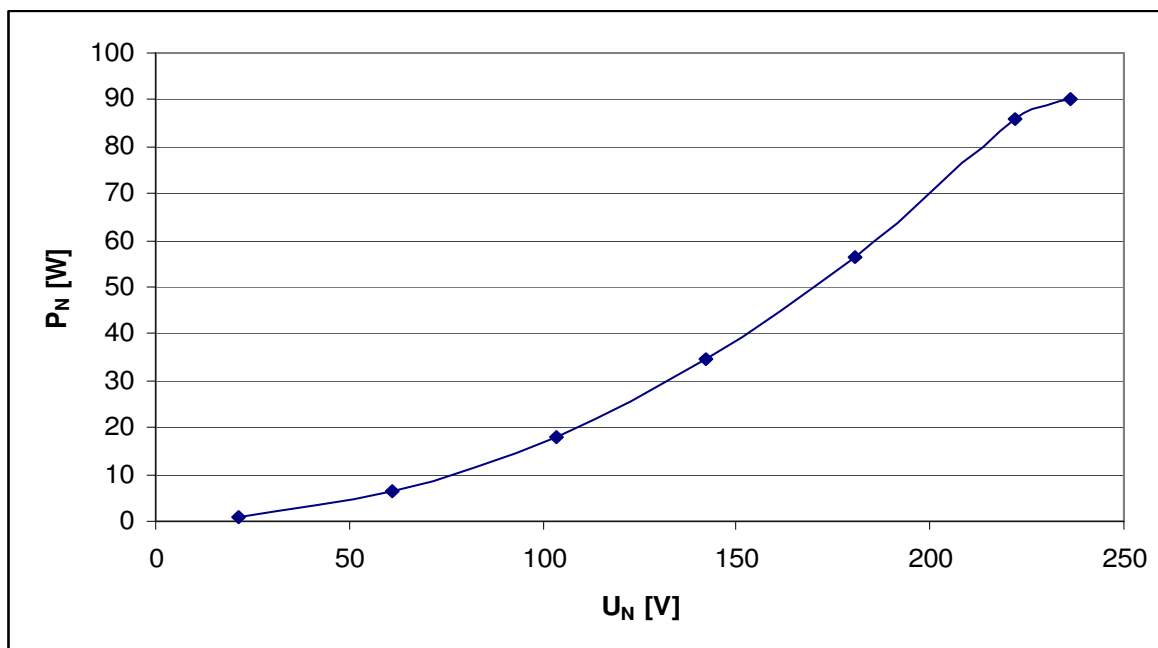
$R_m[\Omega]$	$X_m[\Omega]$	$L_m[H]$
618,3038	227,3546	0,723692
573,0698	268,8218	0,855686
579,4162	278,1856	0,885492
584,3878	287,7667	0,91599
593,2099	297,4311	0,946753
564,7934	297,4981	0,946966
584,4762	244,0444	0,776818

Tab. 6: Vypočtené hodnoty pro prvky náhradního obvodu při měření transformátoru naprázdno

9.5 Výsledné grafy



Graf 3: Parametry náhradního obvodu vinutí měřeného transformátoru z měření naprázdno

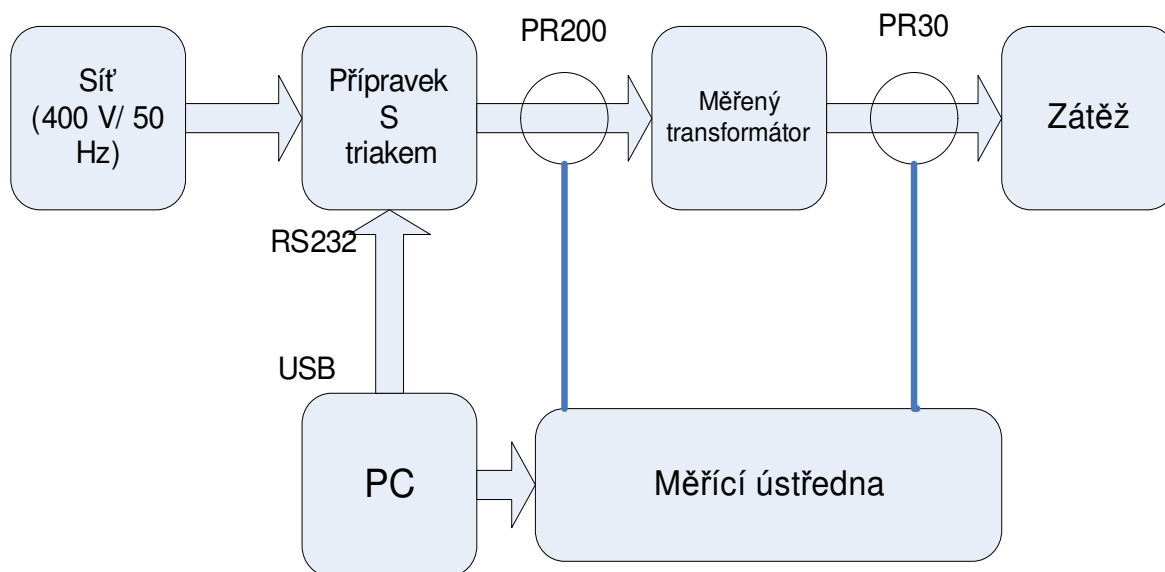


Graf 4: Závislost ztrátového výkonu naprázdno na napětí naprázdno

10. Měření zapínacího proudu

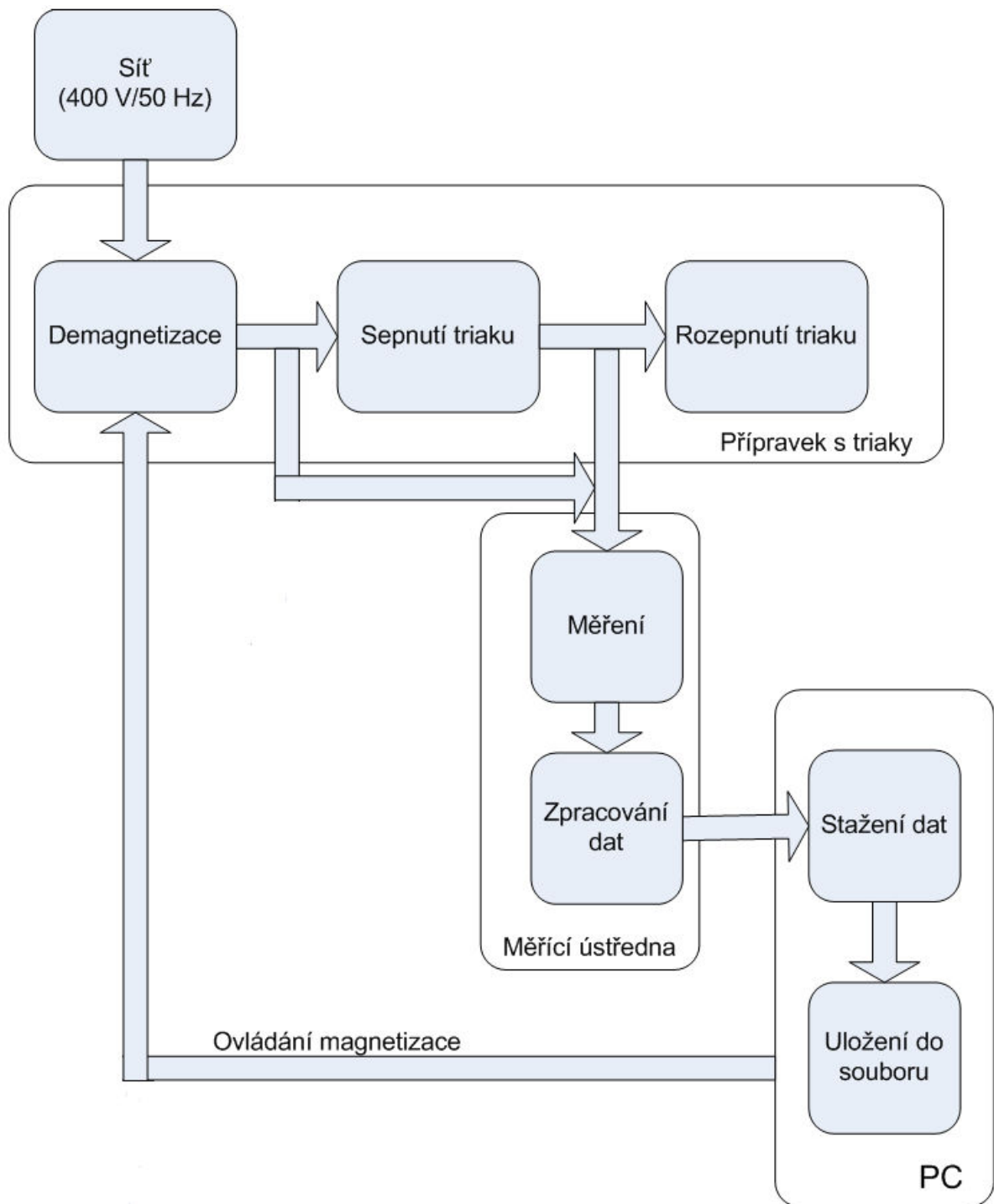
Pro samotné měření zapínacího proudu jsme sestavili obvod, jehož blokové schéma je na Obr. 20. Obvod je připojen na rozvodnou třífázovou síť 400V/50 Hz přes ochranu, kterou tvoří třífázový jistič. Aby při měření nedocházelo díky vysokému zapínacímu proudu k častému vybavování tohoto jističe, byl použit jistič 25 A. Napájecí síť je přivedena na svorky L1, L2, L3 a N přípravku pro měření zapínacího proudu (Obr. 13). Z toho potom jdou ze svorek T1, T2, T3 a N vodiče na třífázový transformátor na primární (vstupní) stranu.

Sekundární strana transformátoru je připojena na zátěž, kterou tvoří tři výkonové reostaty. Použitá zátěž v našem zapojení slouží k tomu, aby potlačovala parazitní vlivy. Velikost a typ námi použité zátěže obecně neovlivní velikost zapínacího proudu. Díky zátěži také zajišťujeme větší hladkost měřených průběhů. Ovlivňuje napěťové špičky, které by později negativně ovlivňovali výsledky měření.



Obr. 20 Blokové schéma zapojení pro měření zapínacího proudu na transformátoru SVED BTV 1,6

Na primární a sekundární stranu transformátoru jsou pak připojeny trojice proudových sond LEM, které měří proud protékající transformátorem. Sondy jsou připojeny k měřicí ústředně, která zpracovává výsledky a posílá do PC pomocí ethernetu protokolem UDP/IP. PC je rovněž propojen s přípravkem pro měření zapínacího proudu rozhraním RS232C. Propojení bylo realizováno pomocí převodníku USB/RS232C. Vlastní ovládací signál je pouze na pinu RTS. Tento signál je přiveden na svorky ovládacího vstupu ExIn (Obr. 13). Chování přípravku, tj. sekvence sepnutí triaků a případná demagnetizace před měřením, je závislé na softwaru, který je v něm nahrán. Všechna měření jsou potom zpracována offline v PC.



Obr. 21 Vývojový diagram měřicího cyklu pro měření zapínacího proudu

Na Obr. 21 je znázorněn vývojový diagram, který představuje algoritmus při měření zapínacího proudu. Ovládací aplikace z PC řídí spínací přípravek a měřicí ústřednu. Aplikace provádí měření v cyklu a postupně mění úhel sepnutí triaků pro každé měření. Prvním krokem je komunikace s přípravkem s triaky, kterému je zaslána dvou bajtová

informace o sekvenci spínání + demagnetizaci a požadovaný úhel sepnutí triaků. Přípravek pak sám autonomně zajišťuje magnetizaci jádra před samotným měřením, která má pevnou dobu

1 s. Poté následuje prodleva 0,2 s a sepnutí triaku v nastaveném úhlu a sekvenci.

Po odeslání povelu spínacímu přípravku je po zadaném časovém intervalu odeslán požadavek začátku měření měřicí ústředně tak, aby byl zachycen signál ještě před sepnutím triaků cca 40-60 ms. Tento úsek měření se později při zpracování používá pro eliminaci offsetu proudových sond. Doba měření ústřednou je nastavena pro změření signálu před sepnutím plus cca 10 period po sepnutí triaku. Měřicí ústředna zaznamenává průběhy napětí a proudů transformátoru a po ukončení měření je aplikace na PC stahuje pomocí ethernetu a jednoduchého protokolu.

Ovládací aplikace následně kontroluje průběh primárního napětí U_1 ve změřených datech a počítá z něj střední hodnotu usměrněného signálu. Ta je následně porovnána s mezemi. Nízká hodnota znamená, že změřený průběh neobsahuje signál nebo je počet period po sepnutí malý. Velká hodnota znamená, že v měření chybí počáteční úsek bez signálu – nebylo zachyceno sepnutí. Normální střední hodnota usměrněného signálu pro napětí v síti 230 V je cca 207 V. Pro výše popsané časové souvislosti signálu byly meze zvoleny 70 V a 120 V. Při překročení mezí bylo měření automaticky zopakováno. Tímto způsobem byla eliminována vadná a chybně načasovaná měření, ke kterým docházelo díky chybám komunikace a rušení.

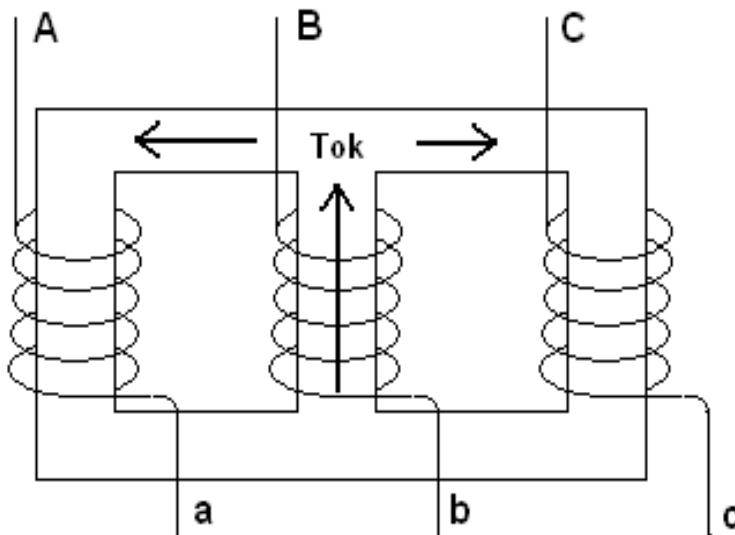
Změřená data se ukládají automaticky do souborů s názvem odpovídajícím úhlu sepnutí. Vyhodnocení měření se provádělo off-line v prostředí Matlab bez potřeby měřicího obvodu.

10.1 Předmagnetování transformátoru

Pro měření zapínacích proudů byla zvolena metoda definování magnetického toku v jádře před měřením pomocí přípravku se stejnosměrným zdrojem proudu a ovládacím relé. Tak byl definován tok jednoho ze sloupků transformátoru.

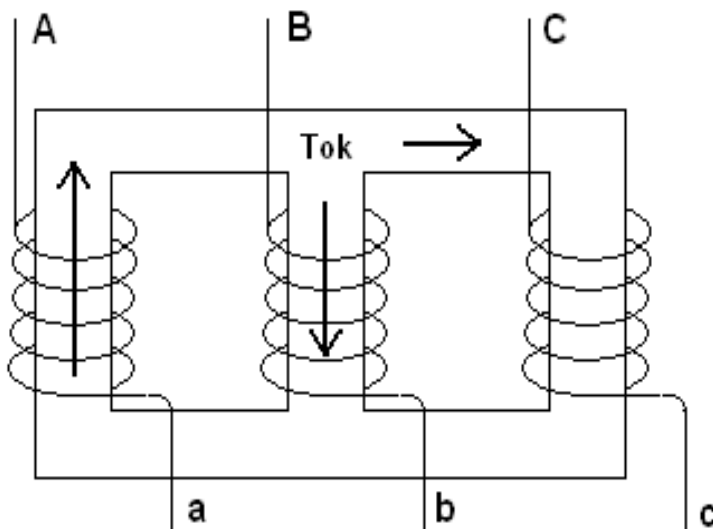
Při předmagnetování fáze, která využívá prostřední sloupek se magnetický tok uzavírá krajními sloupkami. Teoreticky by se měl rovnoměrně rozdělit do krajních sloupků (Obr. 22). V praxi tomu tak nebývá díky nelineární závislosti permeability na toku. I minimální nerovnováha nebo vliv okolního magnetického pole způsobí nerovnoměrné rozdělení toku.

To se následně projeví na změřených grafech – zapínací proud magnetované fáze je dobře definován a hraniční křivka je hladká, kdežto zapínací proudy nemagnetovaných fází se mění právě v závislosti na proměnlivé počáteční remanentní magnetizaci – viz obr 25, 39 atp.



Obr. 22 Působení remanentního toku při předmagnetování prostřední fáze

Na Obr. 23 je nakreslena situace, kdy se bude přemagnetovat krajní fáze. Tok se opět rozdělí do sloupků B a C teoreticky podle Hopkinsonova zákona. Prakticky je situace ještě horší než při magnetování středního sloupku. bude potom chovat tak, že se jako první dostane k prostřednímu sloupku.



Obr. 23 Působení remanentního toku při předmagnetování krajní fáze

10.2 Zdrojový kód pro zpracování měřených dat

Program pro zpracování naměřených dat je vytvořený v programovacím jazyce Matlab. Slouží pro výpočet maxim zapínacího proudu. Hlavní funkce tohoto zdrojového kódu spočívá v tom, že na začátku odfiltruje stejnosměrnou (DC) složku ze signálu snímačů proudu. Použité snímače LEM (PR200 a PR30) pracují na kompenzačním principu s Hallovo sondou. Magnetické pole jádra měřené Hallovo sondou je kompenzováno na nulu sekundárním vinutím snímače, jehož proud je úměrný měřenému proudu. Princip snímače je citlivý na vnější pole a při změně polohy sondy se změní stejnosměrná složka signálu. Sondy jsou proto vybaveny nastavovacím prvkem pro nulování offsetu.

Při automatizovaném měření není nulování offsetu praktické, proto se offset nuluje až při zpracování dat. S výhodou využijeme část změřeného průběhu před sepnutím triaků, kdy obvodem neteče žádný proud. V tomto úseku měření zjistíme střední hodnotu proudu, která je právě dána offsetem a tuto hodnotu odečteme jako konstantu od celého průběhu a tak vynulujeme offset.

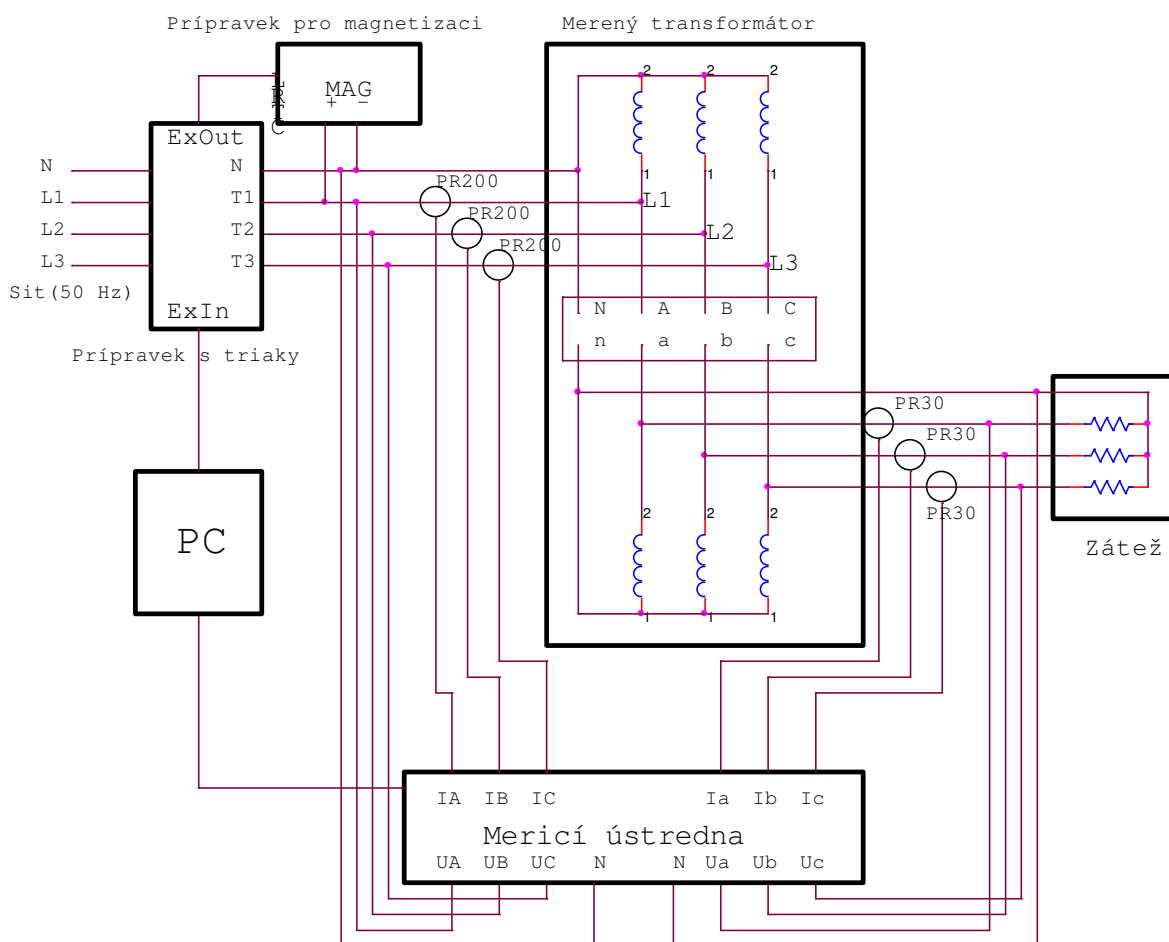
Další funkcí programu je výpočet proudu ve středním vodiči soustavy, ten je prováděn podle Kirchhoffova zákona.

Okamžik sepnutí se zjišťuje přesně až z měřených signálů. Od počátku měření se hledá nárůst primárního napětí přes hodnotu 5 V a z tohoto bodu se vypočítá fáze následujícího sinusového průběhu pomocí Fourierovy transformace. Tento způsob detekce není dokonalý a způsobuje chyby odečtu úhlu kolem průchodu napětí nulou. Chyba ovšem není velká a teoreticky je menší než 50 μ s. V praxi k ní přibude chyba způsobená vzorkovacím kmitočtem tj. dalších 78 μ s. Pro třífázové měření bereme jako referenční fázi L3. Úhel sepnutí je tedy v grafech vztažen vždy k L3.

Poslední krok spočítá v určení maxim zapínacího proudu v jednotlivých fázích. Aby nedošlo k záměně zapínacího proudu s proudem procházejícím do zatěžovacích rezistorů je maximum proudu vyhledáváno pouze v okolí průchodu napětí nulou, kde je proud ovlivněn hlavně magnetizačním proudem. Zjištěné hodnoty jsou ukládány a slouží k vykreslení grafů.

11. Měření zapínacího proudu v zapojení hvězda/hvězda s vyvedeným středním vodičem (YNyn)

Na Obr. 24 je uvedeno schéma zapojení, ve kterém je vinutí transformátoru zapojeno na primární i sekundární straně do hvězdy s vyvedeným středním vodičem.



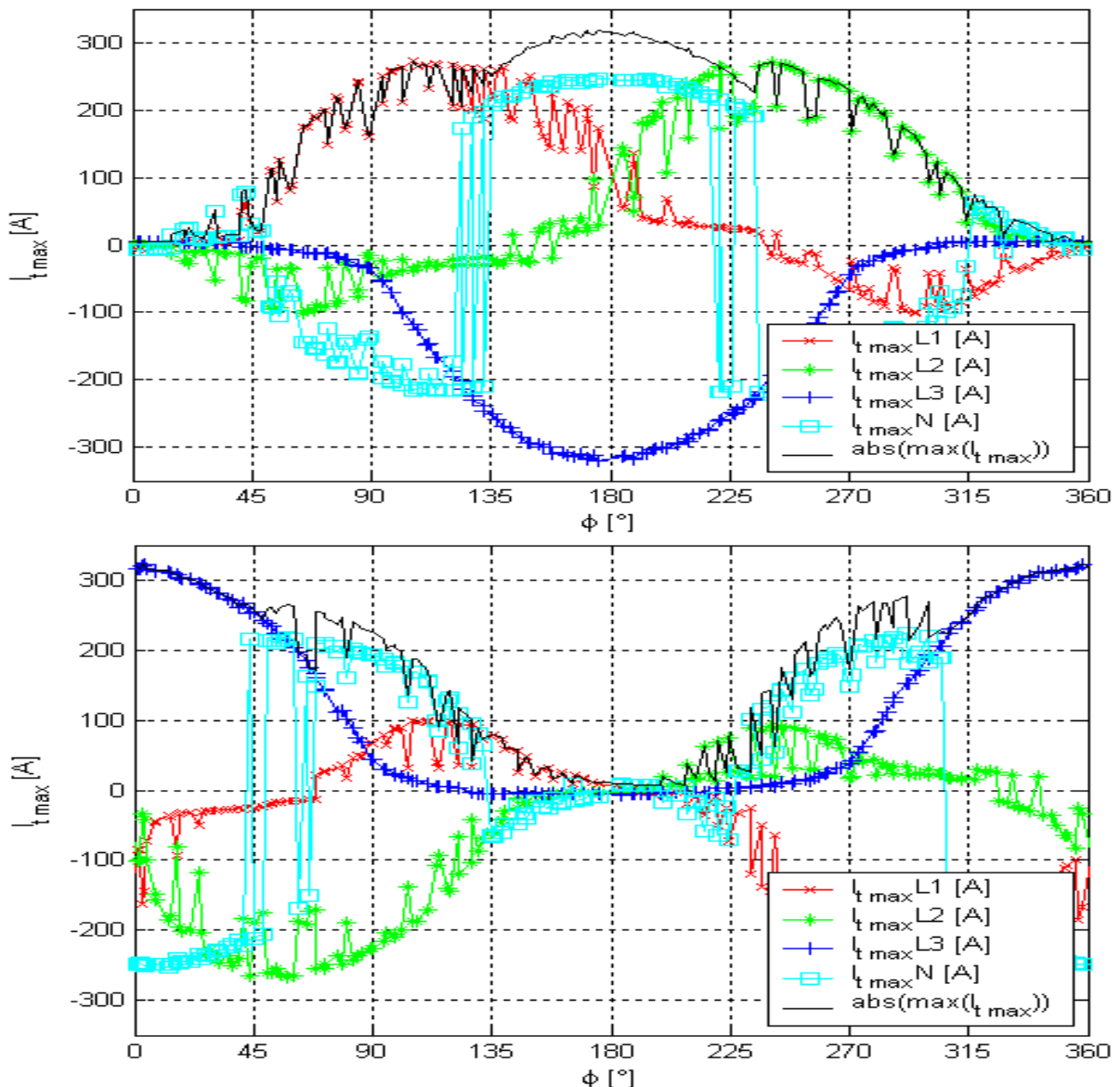
Obr. 24 Schéma zapojení obvodu pro měření zapínacího proudu v zapojení YNyn s vyvedeným středem

Každé měření bylo měřeno s předmagnetizací jádra transformátoru před měřením. V každém měření byla před připnutím magnetizována vždy jedna fáze. A to nejprve v kladném a v další sadě měření záporném smyslu. Díky definování počáteční remanentní indukce pro každou fázi zvlášť jsme získali hraniční křivky ploch zapínacích proudů. Při

magnetování v jednom sloupku EI transformátoru nedošlo bohužel k definování remanentní magnetizace celého jádra, ale především jen magnetovaného sloupku. Ostatní sloupky se zmagnetovali různě, což se v grafech projevilo kolísáním zapínacích proudů právě ve sloupcích, které nebyly magnetovány.

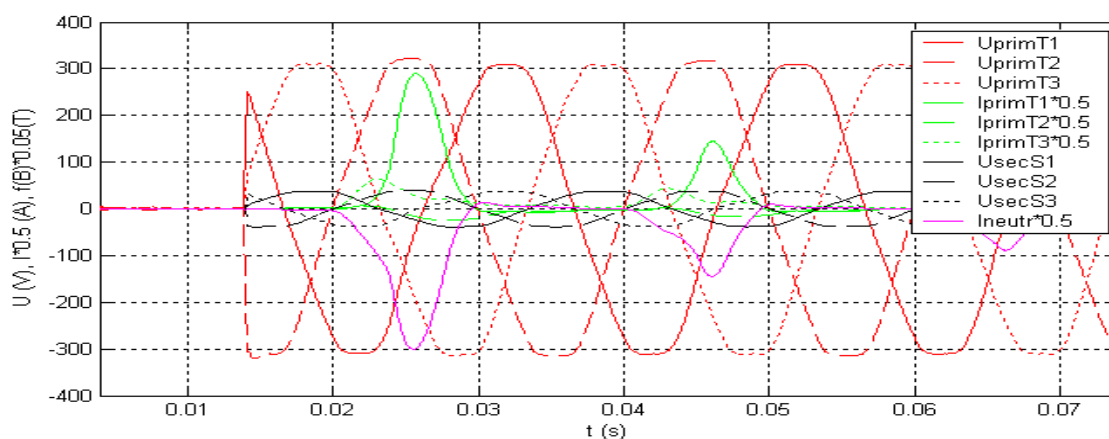
Automatizované nastavování úhlu připínání transformátoru zajistilo rovnoměrné proměření celé charakteristiky. Výsledky jsou výrazně lepší, než by tomu bylo při ručním nastavení úhlu připnutí transformátoru, které bylo použito při měřeních diplomové práce [9].

Na Obr. 25 jsou znázorněny diagramy zapínacího proudu v zapojení YNyn s vyvedeným středním vodičem. Průběhy zapínacího proudu jsou téměř identické pro jednotlivé fáze, ale jsou posunuty o 120° . Maxima zapínacího proudu středním vodičem $I_{t_{\max}N}$ jsou znázorněna světle modrou čarou.



Obr. 25 Maxima zapínacího proudu EI transformátoru SVED BTV 5,0 v závislosti na Φ v zapojení YNyn, První průběh: Předmagnetována fáze L3, zapojení v kladném smyslu, Druhý průběh: Předmagnetována fáze L3, zapojeno v záporném smyslu, File: Y0y_IR01_demFaze3P_, Y0y_IR01_demFaze3M_

V tomto zapojení se zapínací proud uzavírá podle Kirchhoffova zákona do ostatních fází, ale většina odtéká právě středním vodičem [7]. Nejdůležitější část diagramu je průběh znázorněný černou čarou, který představuje absolutní hodnotu nejvyššího zapínacího proudu ze všech třech fází.

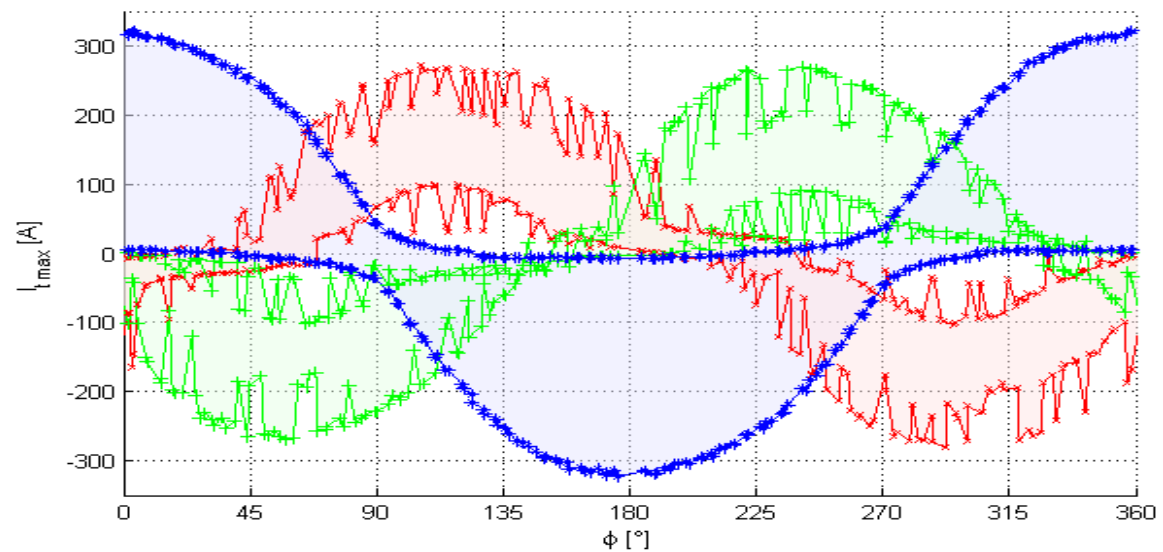
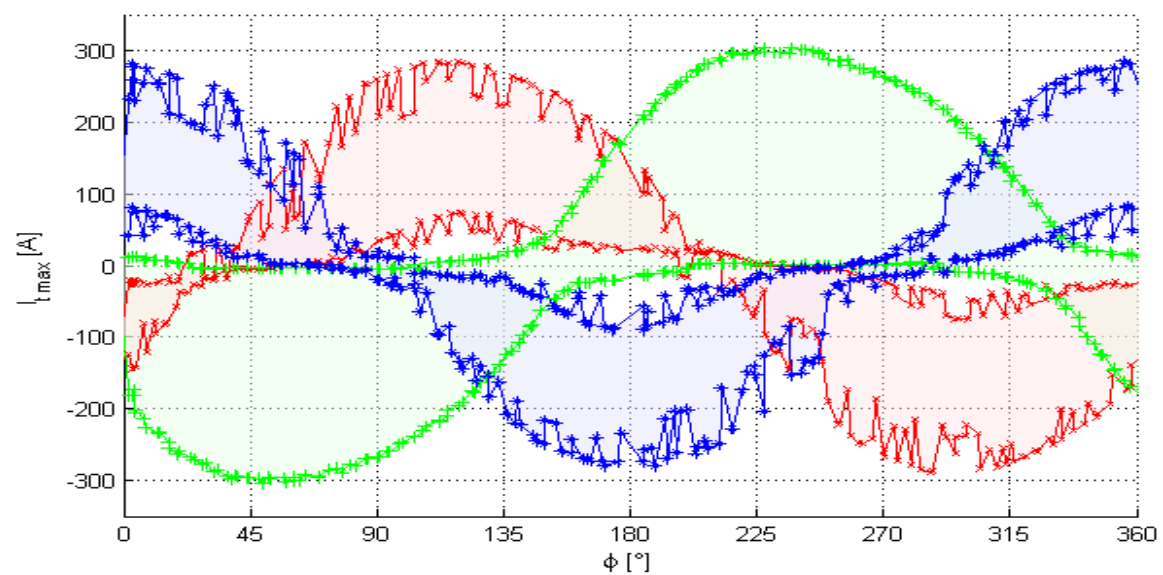
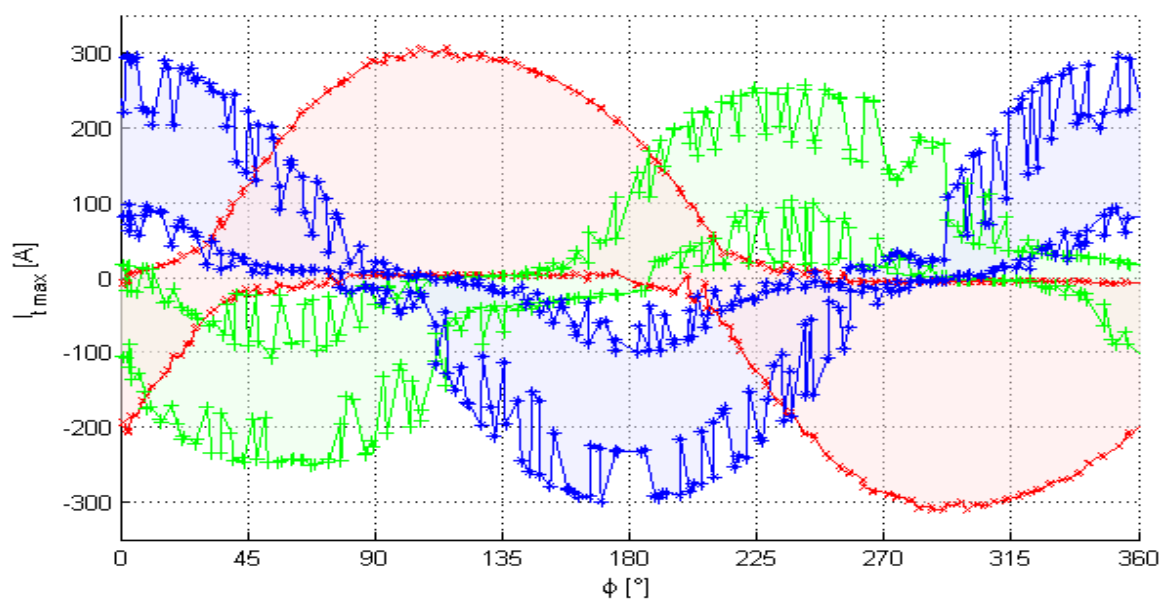


Obr. 26 Základní průběhy napětí a proudů v zapojení Ynyn, File: Y0y_IR01_demFaze2M_005_002.mat

Na Obr. 26 je uveden graf, na němž jsou zobrazeny průběhy napětí a proudů při připnutí transformátoru k síti. V grafech je vidět, že nárůst zapínacího proudu je vždy při průchodu napětí nulou v dané fázi. Je také vidět, že hodnota zapínacího proudu se s počtem period snižuje až zaniká.

Zapínací proud takto zapojeného třífázového transformátoru není ovlivňován volbou okamžiku připnutí transformátoru k síti, což plyne z průběhů na Obr. 27, kde jsou znázorněny hraniční křivky ploch zapínacích proudů. Maximum zapínacího proudu je tedy v tomto zapojení nezávislé na úhlu připnutí. Pro toto zapojení se hodnota maximálního proudu pohybuje přibližně okolo 320 A, což je patrné z průběhu na Obr. 25.

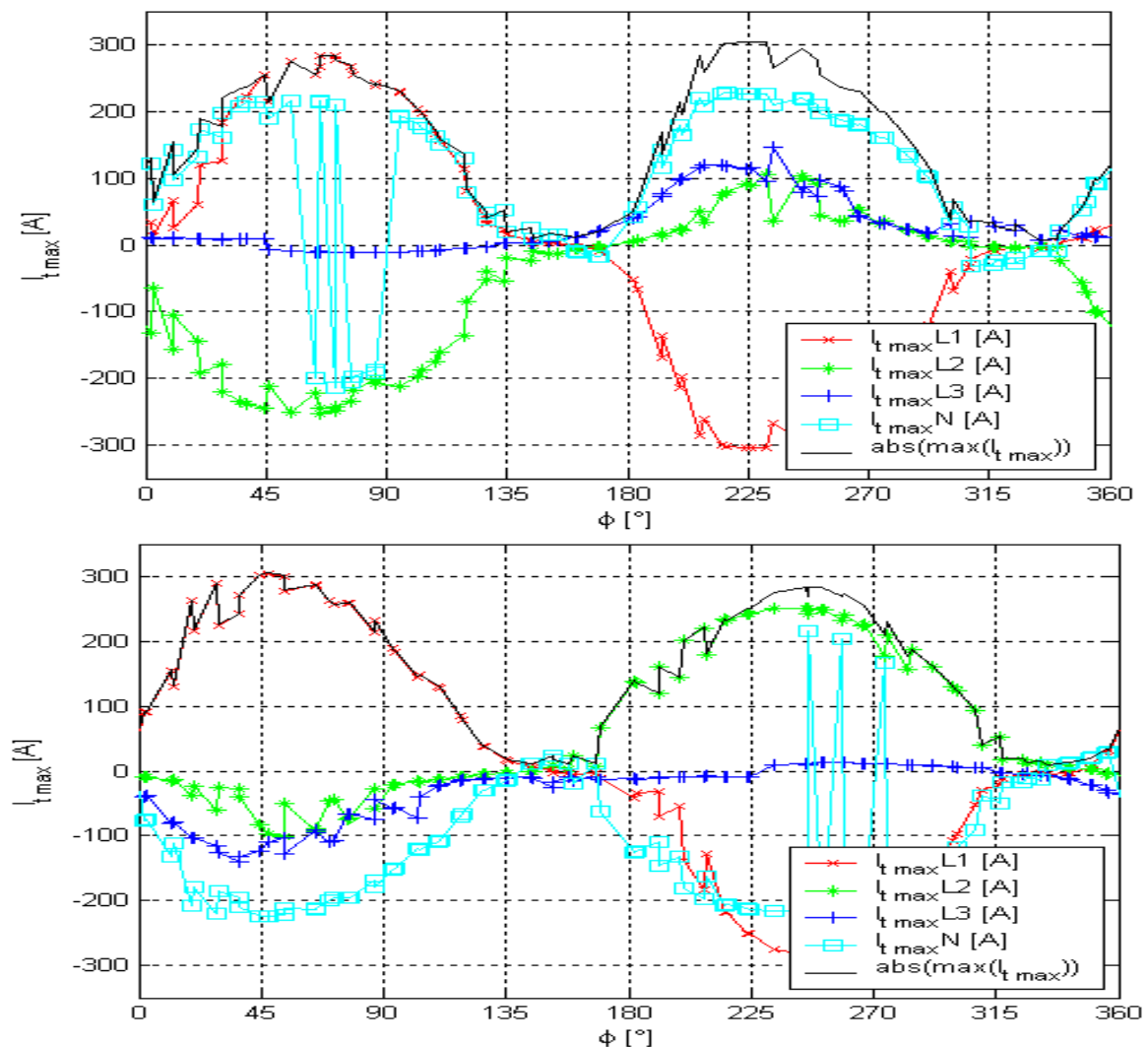
Na každém ze třech průběhů na Obr. 27 je vidět, že vždy jedna fáze byla před měřením předmagnetována. V prvním průběhu je to fáze L1 označena červeně, v druhém průběhu je to fáze L2 označena zeleně a ve třetím průběhu je to fáze L3 označena modře. Jelikož byl vždy magnetován jen jeden sloupek tak nedošlo k definování remanentní magnetizace celého jádra.



Obr. 27 Hraniční křivky ploch zapínacího proudu pro předmagnetování jednotlivých fází v zapojení YNyn,
 Legenda: $I_{t\max} L_1$, $I_{t\max} L_2$, $I_{t\max} L_3$

11.1 Zapojení YNyn s použitím metody sekvenčního spínání fází B-AC se zpožděním $1/4 T$ a $(2 + 1/4)T$ podle Brunkeho a Frölicha

V každém zapojení byly řešeny dvě metody sekvenčního spínání fází. A to metody sekvenčního spínání jednotlivých fází B-AC se zpožděním $1/4T$ a se zpožděním $(2 + 1/4)T$. Pro realizaci těchto metod měření je nutno znát remanentní tok v jádře transformátoru, což je zajištěno pomocí přípravku pro předmagnetizaci [7.1] před každým měřením.



Obr. 28 Maxima zapínacího proudu EI transformátoru SVED BTV 5,0 v závislosti na Φ v zapojení YNyn podle metody sekvenčního spínání fází $1/4T$, První průběh:

*Předmagnetována fáze L1, zapojení v záporném smyslu, Druhý průběh:
,Předmagnetována fáze L1, zapojeno v kladném smyslu, File: Y0y_IR03_demFaze1M_
Y0y_IR03_demFaze1P_*

Maxima zapínacího proudu pro sekvenci se zpožděním $1/4T$ jsou znázorněny v grafech na Obr. 28, kde v prvním grafu je průběh pro zapojení v záporné větvi a v druhém grafu pro zapojení v kladné větvi. Maxima zapínacího proudu středním vodičem $I_{\max} N$ jsou zobrazena světle modrou čarou. Absolutní hodnota zapínacího proudu je znázorněna černou čarou. Stejně tak je tomu i v grafech na Obr. 29, kde jsou uvedeny pro ukázkou průběhy zapínacích proudů pro sekvenci $(2 + 1/4)T$.

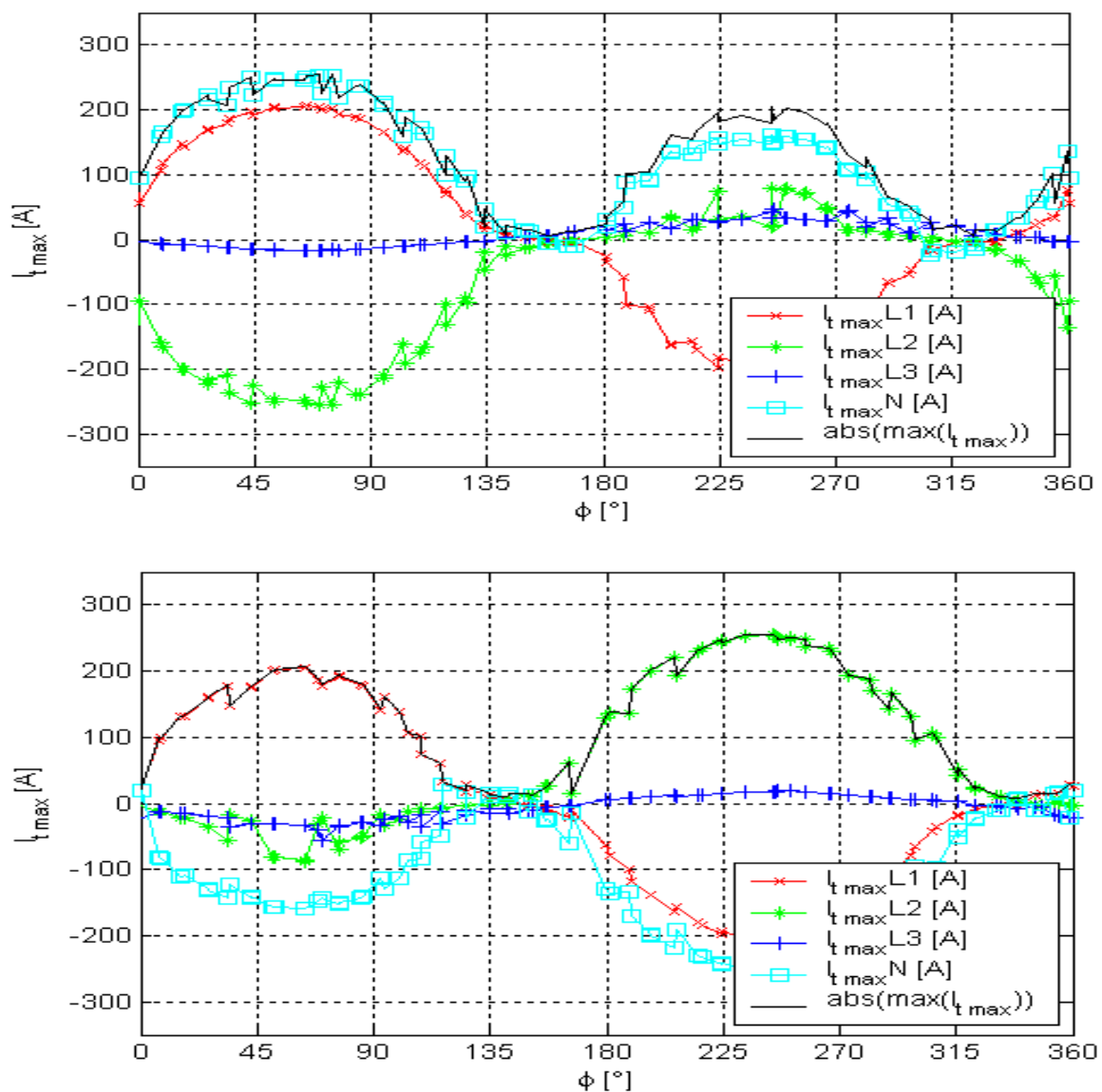
Na Obr. 30, kde jsou znázorněny hraniční plochy pro sekvenci spínání se zpožděním $1/4T$ a na Obr. 31, kde jsou znázorněny hraniční plochy pro sekvenci spínání se zpožděním $(2 + 1/4)T$ je vidět, že u těchto zapojení je hodnota maximálního zapínacího proudu závislá na okamžiku připnutí transformátoru k síti. Jsou vidět dvě oblasti s potlačeným zapínacím proudem. Maximální hodnota zapínacího proudu je u obou sekvencí nejvyšší při připnutí v okolí 45° , kdežto v okolí 145° a potom také v okolí 330° je zapínací proud téměř nulový.

Tyto dvě oblasti jsou pro tuto práci velice důležité, protože jsou to oblasti, ve kterých se dá transformátor připnout k síti a zapínací proud byl v té době maximálně omezen. Především nás zajímá, jak velké je rozmezí, kde je zapínací proud potlačený. Zajímá nás to z toho důvodu, že pro sekvenci spínání se používají relé nebo stykače, které nemají velkou přesnost doby sepnutí. Proto čím delší oblast potlačení zapínacího proudu, tím lepší pro aplikaci v praxi. V porovnání hraničních křivek z Obr. 30 a Obr. 31 je zřejmé, že v obou případech časování jsou oblasti zapínacího proudu pro fázi L2 nejkratší a potlačený zapínací proud dosahuje vyšších hodnot a to okolo 20 A. V průbězích pro fáze L1 a L3 trvají tyto oblasti déle a velikost zapínacího proudu byla téměř nulová. Pro metodu $(2 + 1/4)T$ jsou tyto oblasti přitom nepatrně delší než při sekvenci spínání $1/4T$. Je tedy výhodnější použít spínání $(2 + 1/4)T$ a spínat jako první některou z krajních fází.

U metody se zpožděním $1/4T$ dosahuje zapínací proud největších maxim v první fázi L1 a to přibližně 320 A. U druhé metody se zpožděním $(2 + 1/4)T$ je ovšem patrné, že maximální hodnota zapínacího proudu v žádném z těchto výsledných průběhů, které znázorňují hraniční plochy zapínacího proudu, nepřesáhla 300 A, jako tomu bylo u předchozích. Důvodem je demagnetizační efekt přidaných dvou period signálu v první sepnuté fázi. Jak bylo uvedeno v kapitole 4.3. Největší maximální hodnota je v druhém

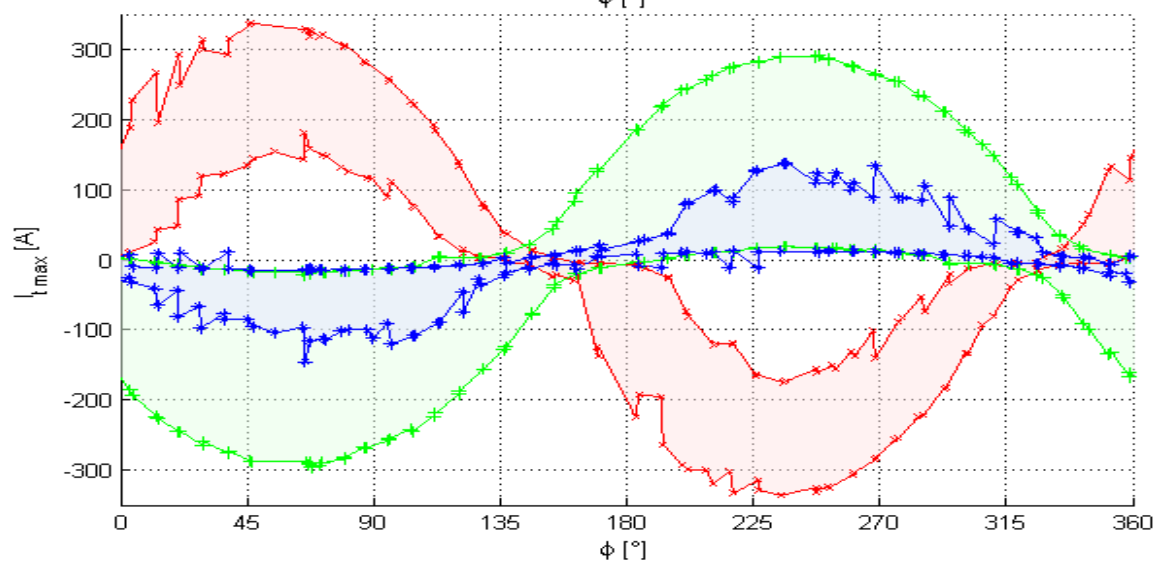
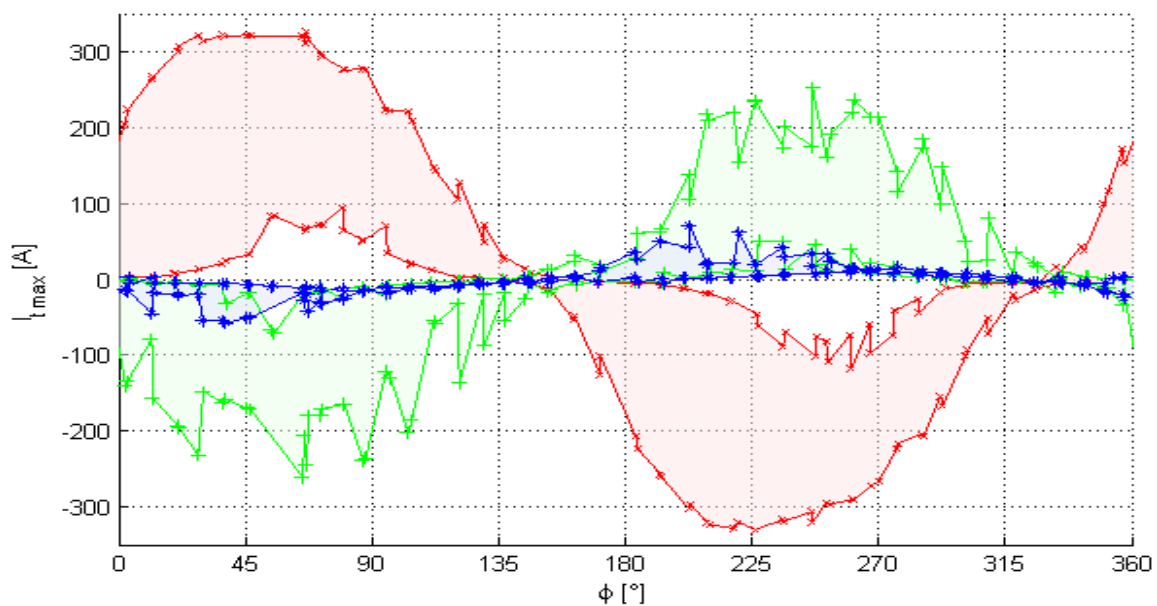
průběhu, kdy byla magnetována fáze L2 a kde tato hodnota činí 300 A. V ostatních grafem (na Obr. 28) se hodnoty zapínacího proudu pohybují maximálně okolo 250 A.

Z výsledků vyplívá, že pro zapojení YNyn mají obě sekvence spínání obdobný efekt. Druhá varianta se zpožděním $(2 + 1/4)T$ vykazuje menší zapínací proud při sepnutí v nevhodném úhlu. Obě sekvence potlačují v určitém okamžiku připnutí zapínací proud téměř na nulu. Z hlediska oblastí potlačení zapínacího proudu je pro nás výhodnější metoda spínání se zpožděním $(2 + 1/4)T$, u které je zejména v prvním průběhu, kde byla přemagnetována fáze L1, delší oblast pro připnutí transformátoru k síti.

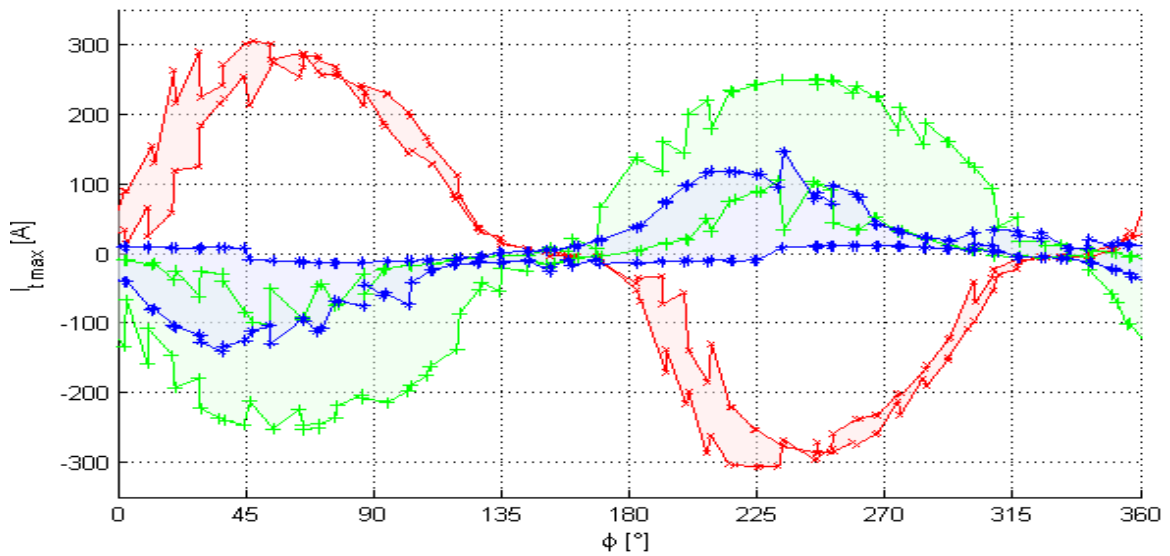


Obr.29 Maxima zapínacího proudu EI transformátoru SVED BTV 5,0 v závislosti na Φ v zapojení YNyn podle metody sekvenčního spínání fází $(2 + 1/4)T$, První průběh: Předmagnetována fáze L1, zapojení v záporném smyslu, Druhý průběh: Předmagnetována

fáze L1, zapojeno v kladném smyslu, File: Y0y_IR05_demFaze1M_,
Y0y_IR05_demFaze1P_

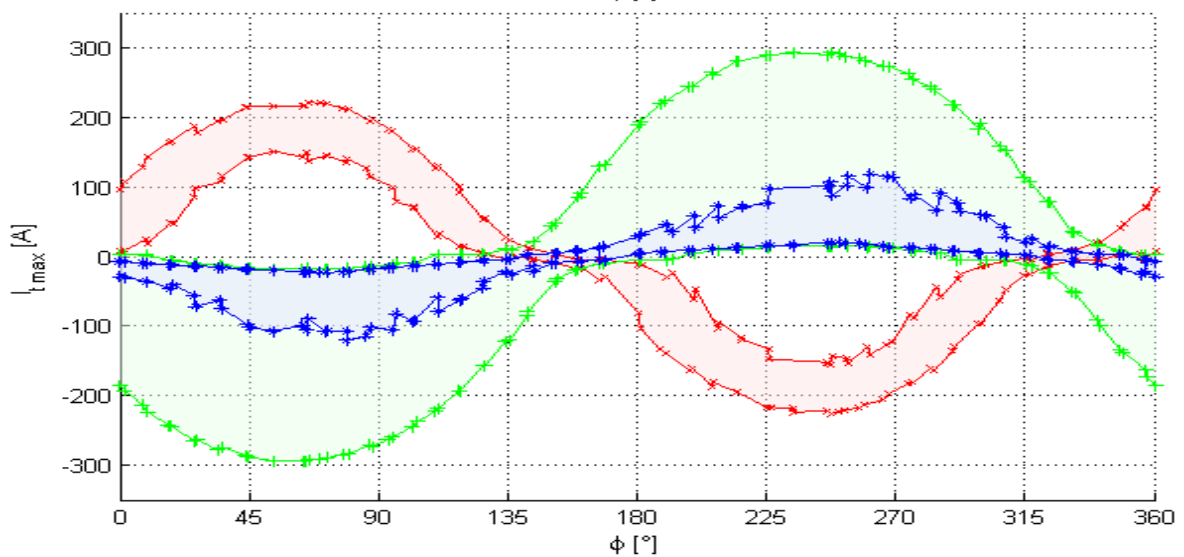
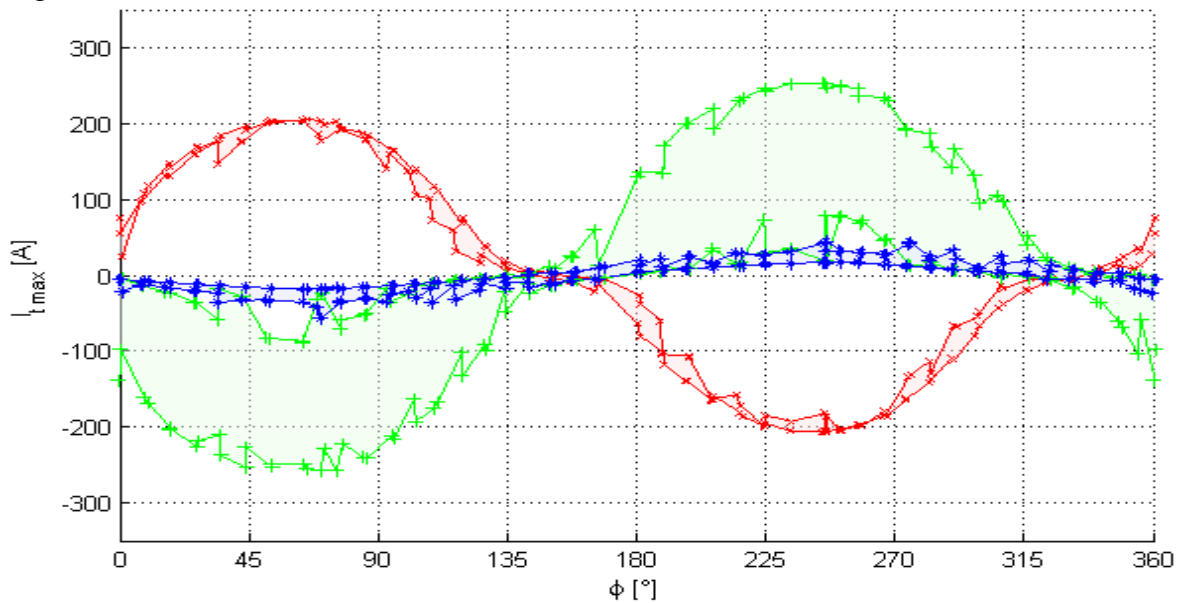


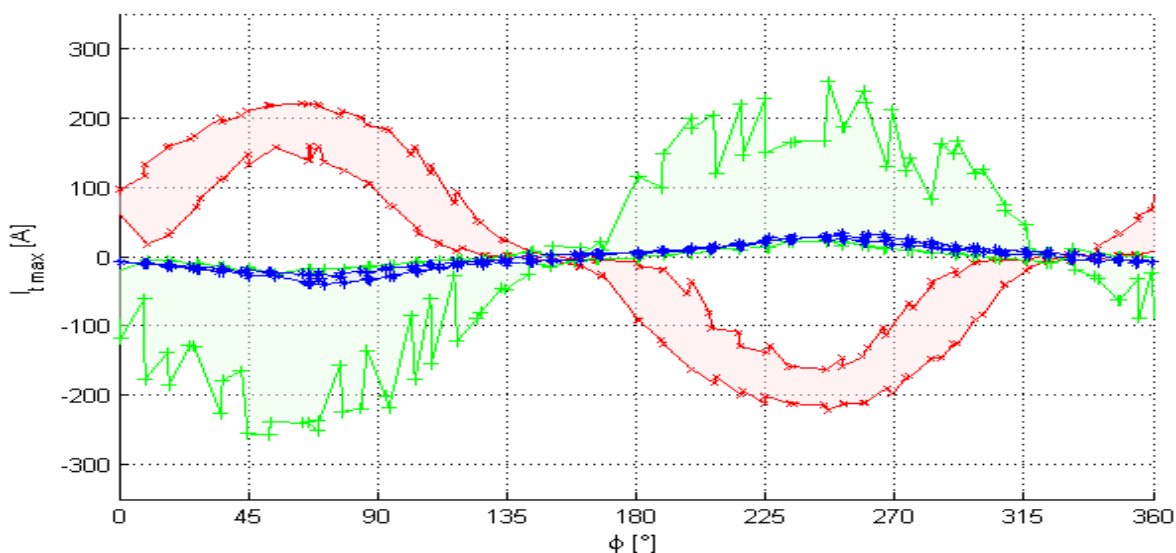
Zapínací proud třífázového transformátoru



Obr.30 Hraniční křivky ploch zapínacího proudu pro přemagnetování v jednotlivých fázích v zapojení YNyn podle Brunkeho a Frölicha metodou sekvenčního spínání fází se zpožděním $1/4 T$

Legenda: — $I_{t \max} L_1$, — $I_{t \max} L_2$, — $I_{t \max} L_3$





Obr. 31 Hraniční křivky ploch zapínacího proudu pro předmagnetování v jednotlivých fázích v zapojení YNyn podle Brunkeho a Frölicha metodou sekvenčního spínání fází se zpožděním $(2+1/4)T$

Legenda: $I_{t\ max\ L1}$, $I_{t\ max\ L2}$, $I_{t\ max\ L3}$

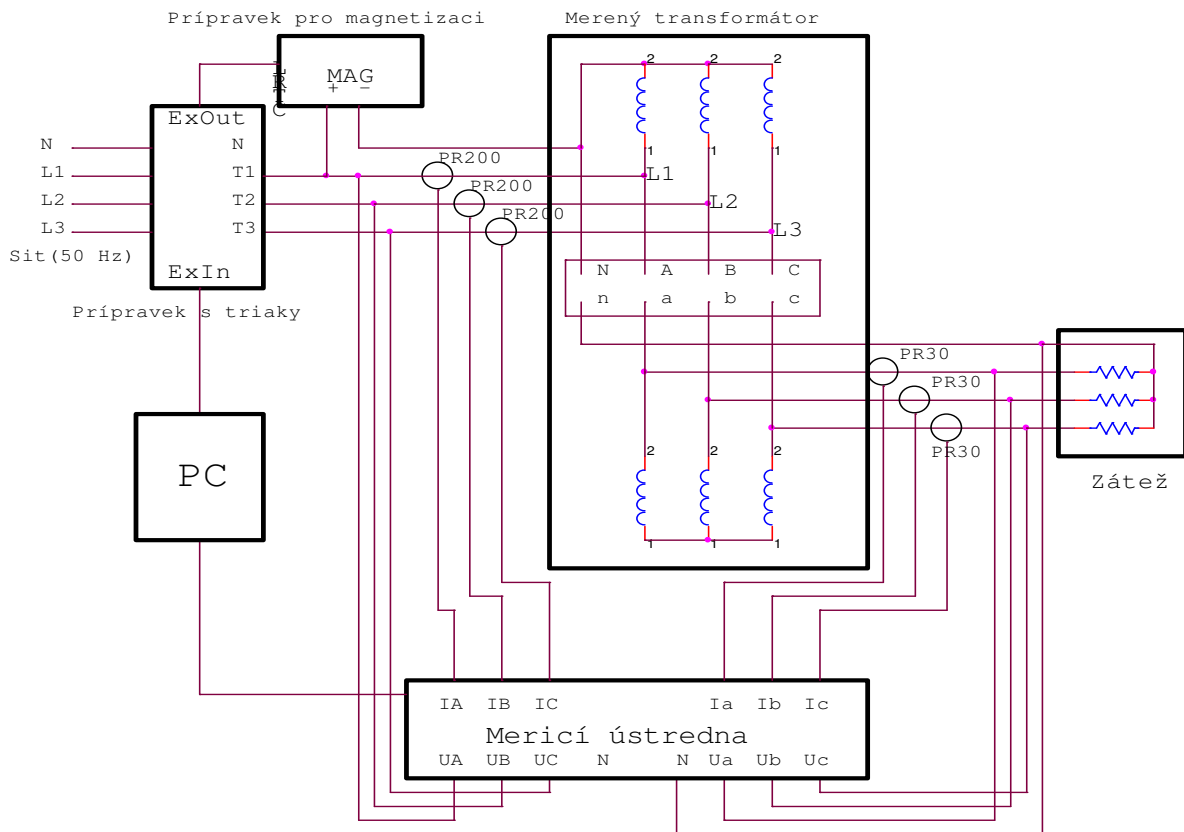
12. Měření zapínacího proudu v zapojení hvězda/hvězda bez vyvedeného středního vodiče(Yyn)

Schéma pro měření zapínacího proudu je pro každé zapojení stejné, liší se jenom ve spojení vinutí transformátoru. Pro toto měření je zapojení obvodu na Obr. 32, kde vinutí transformátoru je zapojeno do obvodu, jako spojení hvězda/hvězda (Yyn) bez vyvedeného středního vodiče.

Při přemagnetování sloupeků transformátoru bylo ovšem středního vodiče použito proto, aby byla měření vzájemně porovnatelná. Takto provedené zapojení zaručuje stejnou magnetizaci jako při zapojení YNyn a přitom neovlivní vlastní proces připínání.

Zátěž transformátoru byla ponechána v zapojení s vyvedeným středem. Tento typ a velikost zátěže obecně neovlivní velikost zapínacího proudu, jak bylo ukázáno [1].

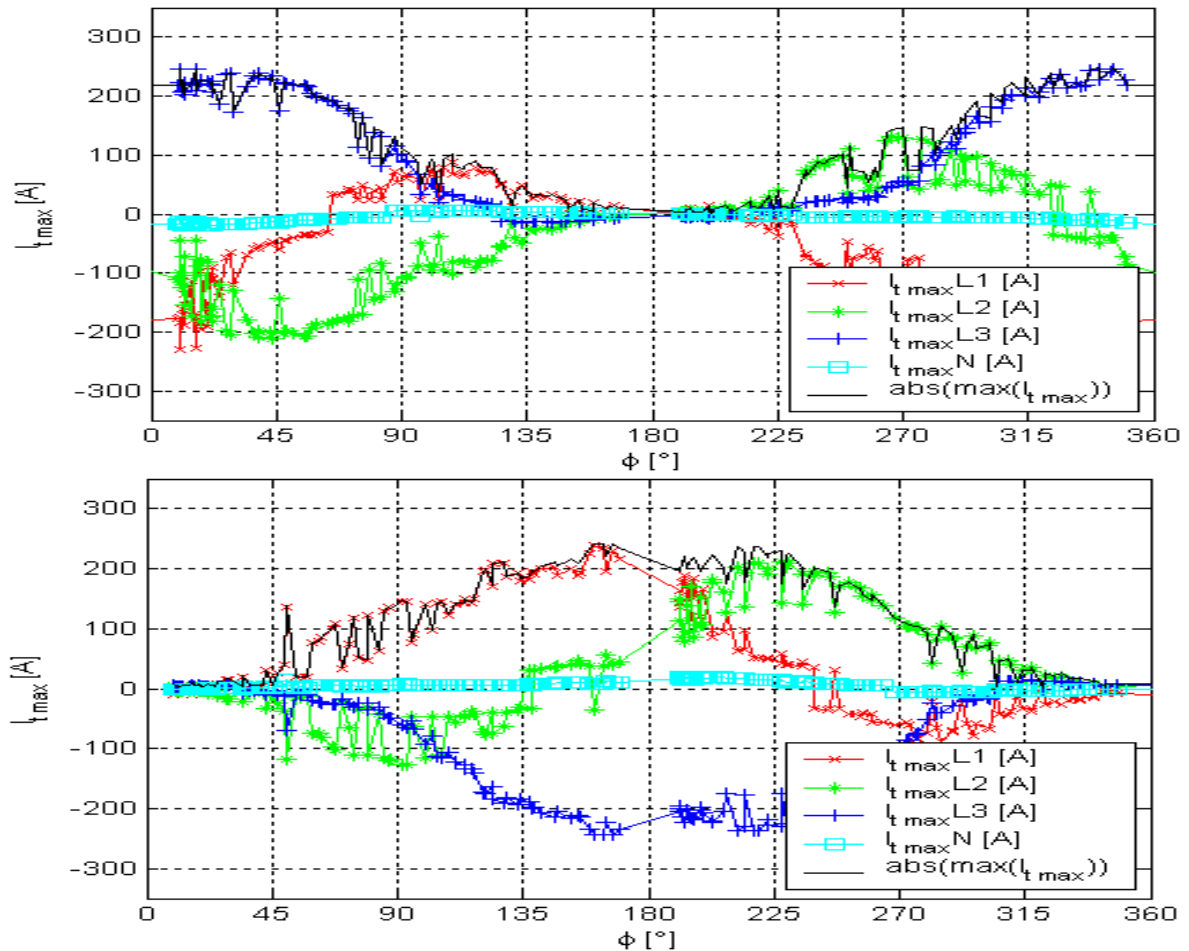
Zapínací proud třífázového transformátoru



Obr. 32 Schéma zapojení obvodu pro měření zapínacího proudu v zapojení Yyn

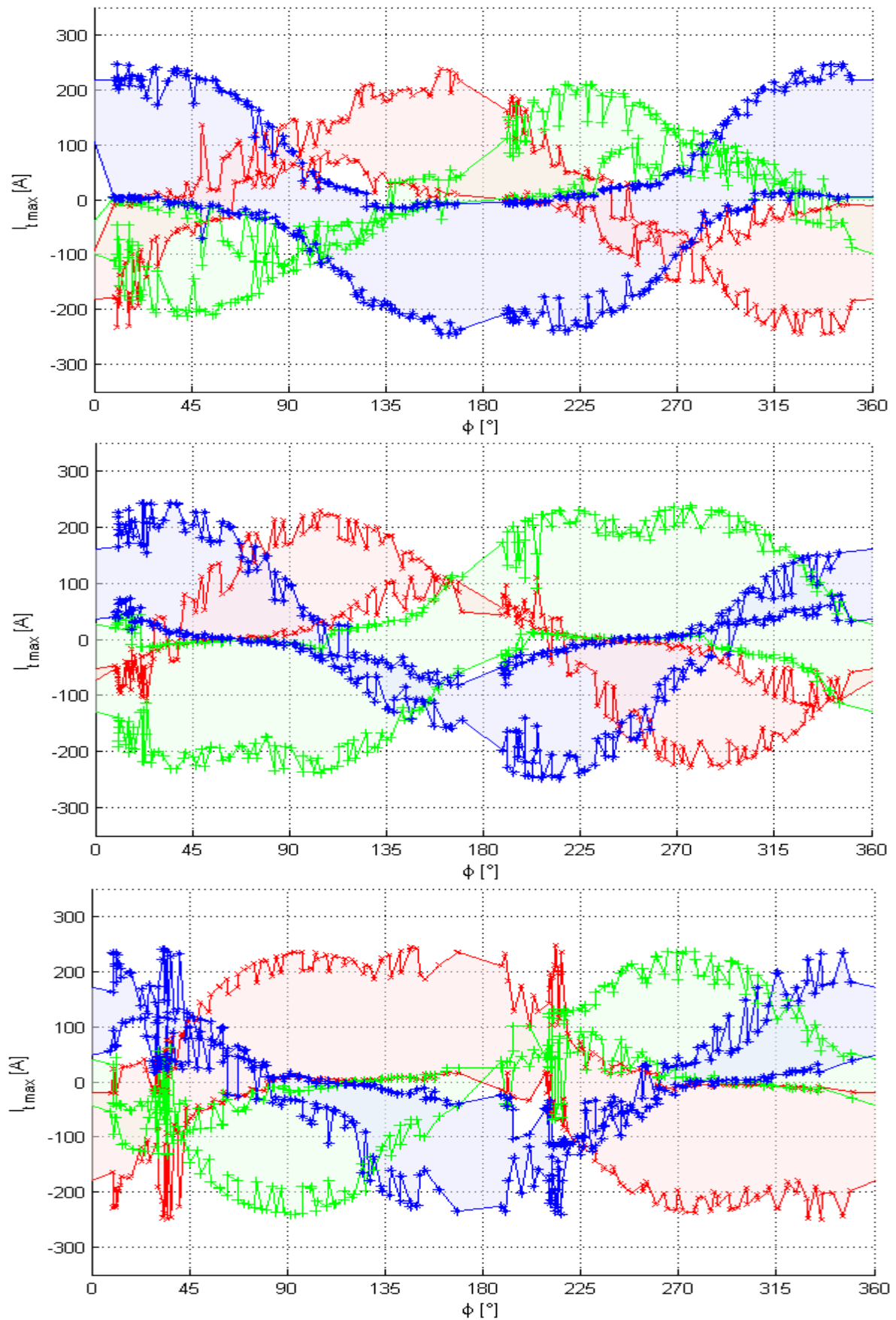
Jak bylo řečeno v kapitole 4.1.4, je vyjadřování zapínacího proudu komplikovanější než u ostatních skupin zapojení. Je to způsobeno přemísťováním nulového bodu vstupní hvězdy díky změně reaktance fázových vinutí, což je způsobeno změnami indukci. Zapínací proud se může uzavírat pouze zbylými vinutími. Jeho velikost tedy navíc omezují rozptylové indukčnosti a činné odpory primárních vinutí dalších fází.

Na Obr. 33 jsou ukázky průběhů zapínacích proudů při zmagetování fáze L3 pro zapojení v záporném a kladném smyslu. Maxima zapínacího proudu se pohybují v okolí 240 A. Důležitá je zde opět absolutní hodnota zapínacího proudu, která je spočítána jako maximální hodnota proudů ze všech fází a je značena černou čarou.



Obr. 33 Maxima zapínacího proudu EI transformátoru SVED BTV 5,0 v závislosti na Φ zapojení Yyn, První průběh: Předmagnetována fáze L1, zapojení v záporném smyslu, Druhý průběh: Předmagnetována fáze L1, zapojeno v kladném smyslu, File: Yy_IR01_demFaze1M_, Yy_IR01_demFaze1P_

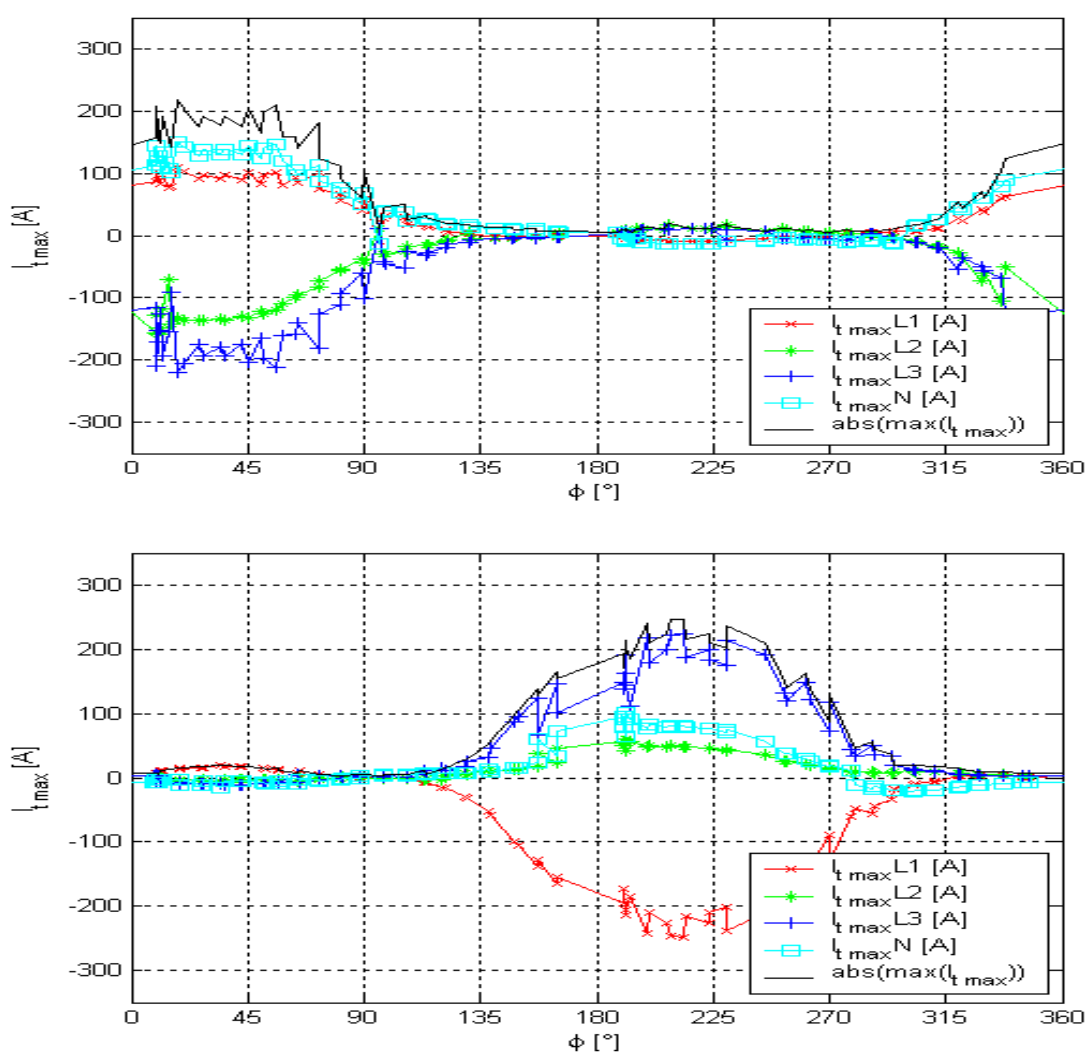
Na Obr. 34 jsou znázorněny hraniční křivky pro toto zapojení. Maximum zapínacího proudu dosahuje o 25 % nižších hodnot, než je tomu u předchozího zapojení YNyn. Z pohledu omezení zapínacího proudu je tedy toto zapojení výhodnější. Samozřejmě také platí, že zapínací proud není ovlivňován úhlem připnutí transformátoru k síti. Kolísání proudu v grafech je způsobeno tím, že při předmagnetizaci jedné fáze není dobře definována předmagnetizace v ostatních dvou fázích a v tomto zapojení se uzavírá zapínací proud právě i těmito fázemi.



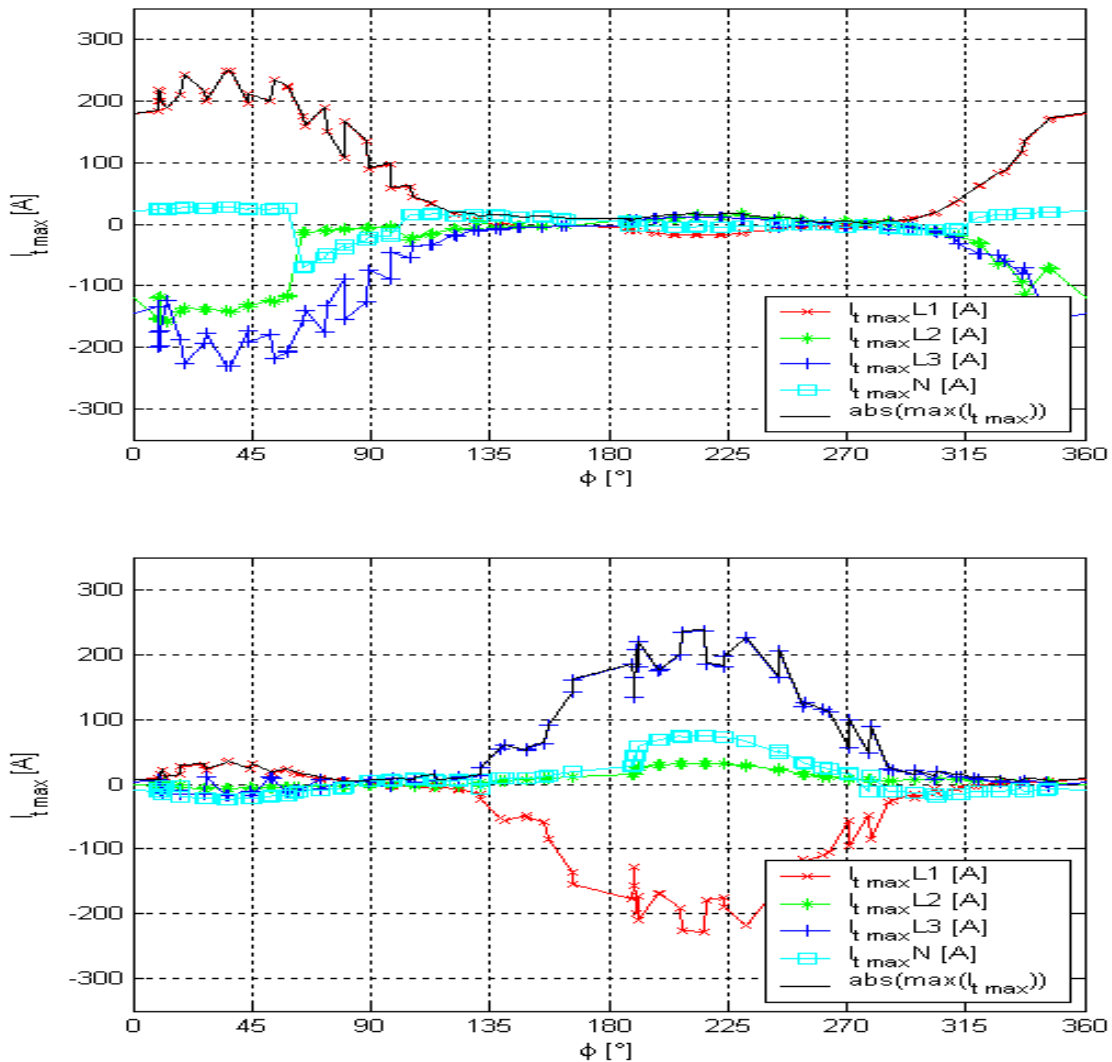
Obr. 34 Hraniční křivky ploch zapínacího proudu pro předmagnetování v jednotlivých fázích v zapojení Y_{yn} ,
 Legenda: — $I_{t \max} L_1$, — $I_{t \max} L_2$, — $I_{t \max} L_3$

12.1 Zapojení Yyn s použitím metody sekvenčního spínání fází AC-B se zpožděním $1/4 T$ a $(2 + 1/4)T$ podle Brunkeho a Frölicha

V zapojení vinutí Yyn je metoda sekvenčního spínání po $1/4 T$ a po $(2 + 1/4)T$ stejná jako v kapitole 11.1. Průběhy s absolutní hodnotou zapínacího proudu a maximy zapínacího proudu středním vodičem $I_{t_{\max}} N$ jsou pro sekvenci se zpožděním $1/4T$ na Obr. 35 a pro sekvenci se zpožděním $(2 + 1/4)T$ na Obr. 36. V porovnání s předešlými sekvencemi v zapojení YNyn je vidět, že maxima zapínacího proudu se pohybují v okolí maximálně 250 A. U předešlého zapojení dosahovala maxima i 300 A.



Obr. 35 Maxima zapínacího proudu EI transformátoru SVED BTV 5,0 v závislosti na Φ v zapojení Yyn podle metody sekvenčního spínání fází $1/4T$, První průběh: Předmagnetována fáze L1, zapojení v záporném smyslu, Druhý průběh: Předmagnetována fáze L1, zapojeno v kladném smyslu, File: Yy_IR06_demFaze1M_, Yy_IR06_demFaze1P_



Obr. 36 Maxima zapínacího proudu EI transformátoru SVED BTV 5,0 v závislosti na Φ v zapojení Yyn podle metody sekvenčního spínání fází $(2 + 1/4)T$, První průběh: Předmagnetována fáze L1, zapojení v záporném smyslu, Druhý průběh: Předmagnetována fáze L1, zapojeno v kladném smyslu, File: Yy_IR06_demFaze1M_ , Yy_IR06_demFaze1P_

Také v těchto zapojení platí, že z pohledu zapínacího proudu záleží na úhlu připnutí transformátoru k síti, což můžeme sledovat na Obr. 37, kde jsou znázorněny hraniční plochy zapínacího proudu pro sekvenci se zpožděním spínání $1/4T$ a na Obr. 38, kde jsou znázorněny hraniční plochy zapínacího proudu pro sekvenci se zpožděním spínání $(2 + 1/4)T$.

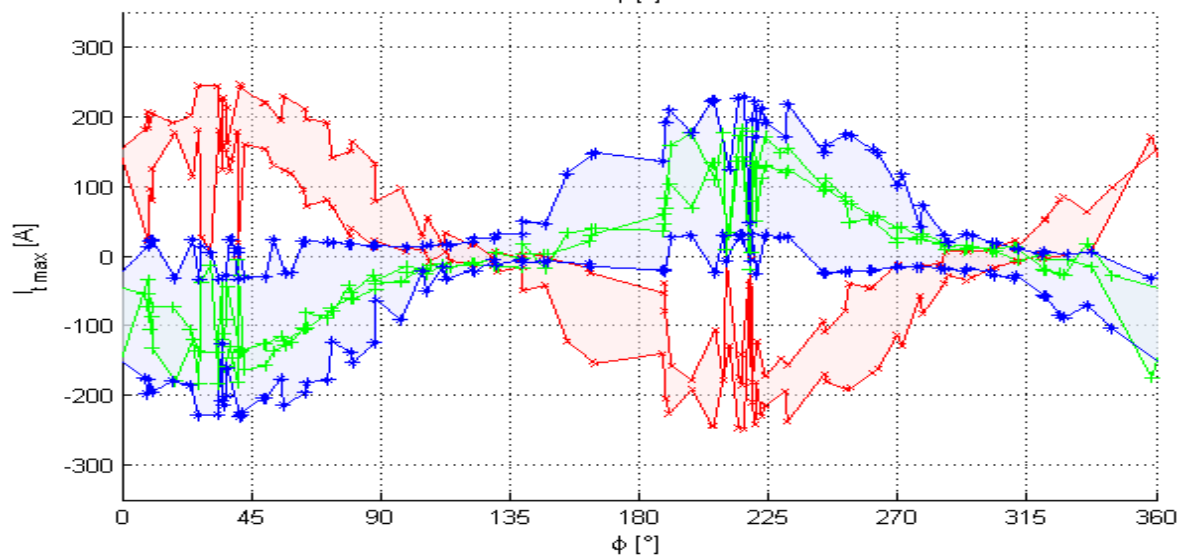
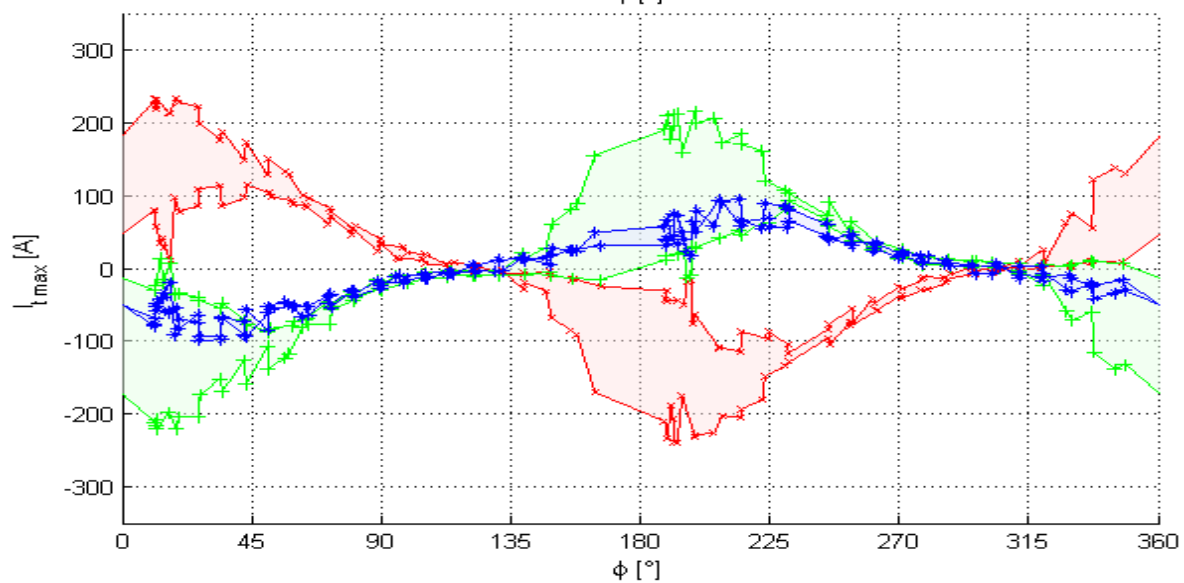
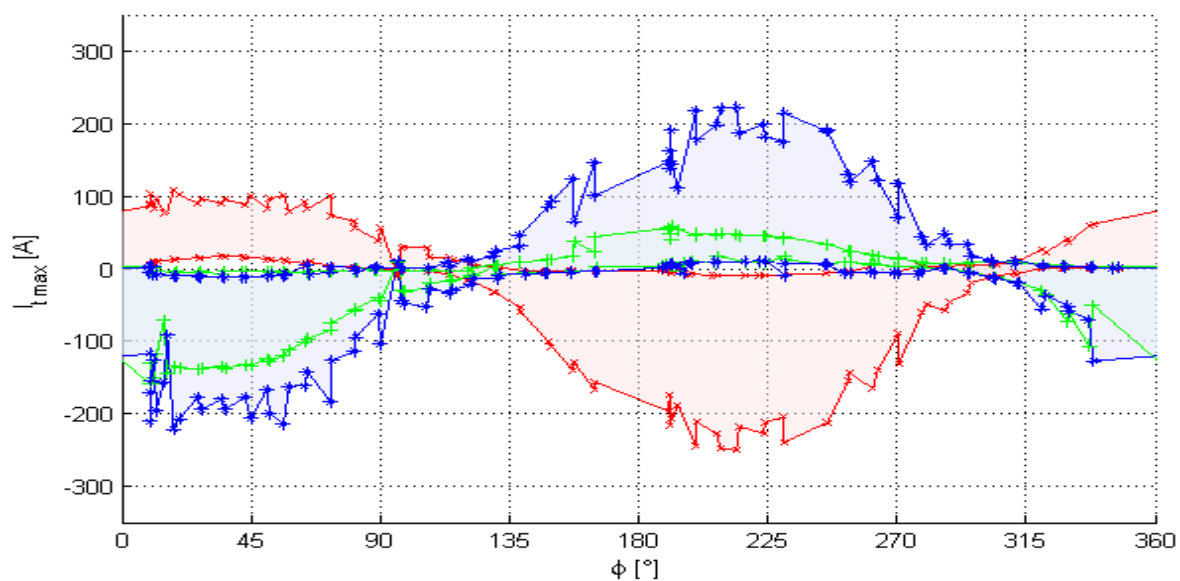
Opět jsou v nich viditelné dvě oblasti potlačení zapínacího proudu. Ovšem na rozdíl od metody pro zapojení YNyn se nám okolí, kde zapínací proud je téměř nulový, posunulo. V zapojení YNyn se téměř nulový zapínací proud pohyboval v okolí 145° a potom v okolí 330° . V tomto případě se hodnota zapínacího proudu, která je téměř nulová, pohybuje

v okolí 115° a 305° a to v obou sekvencích spínání. V porovnání s oblastmi v předchozím zapojení YNyn v kapitole 11.1 je vidět, že situace je opačná. U obou metod v 11.1

(Obr. 30, 31) je oblast pro potlačení zapínacího proudu jednak delší než v krajních průbězích a taky hodnoty maxim potlačeného zapínacího proudu v těchto oblastech jsou nižší. Naopak v krajních průbězích pro obě metody v zapojení Yyn pro přemagnetování fáze L1 a ve spodním grafu fáze L3 není v našich oblastech zapínací proud tak potlačený jako v zapojení YNyn a jeho hodnota se pohybuje okolo 20 A. Pro aplikaci omezení zapínacího proudu by situace, kdy by zapínací proud při připnutí transformátoru k síti dosahoval maximálně 20 A, byla samozřejmě přijatelná varianta.

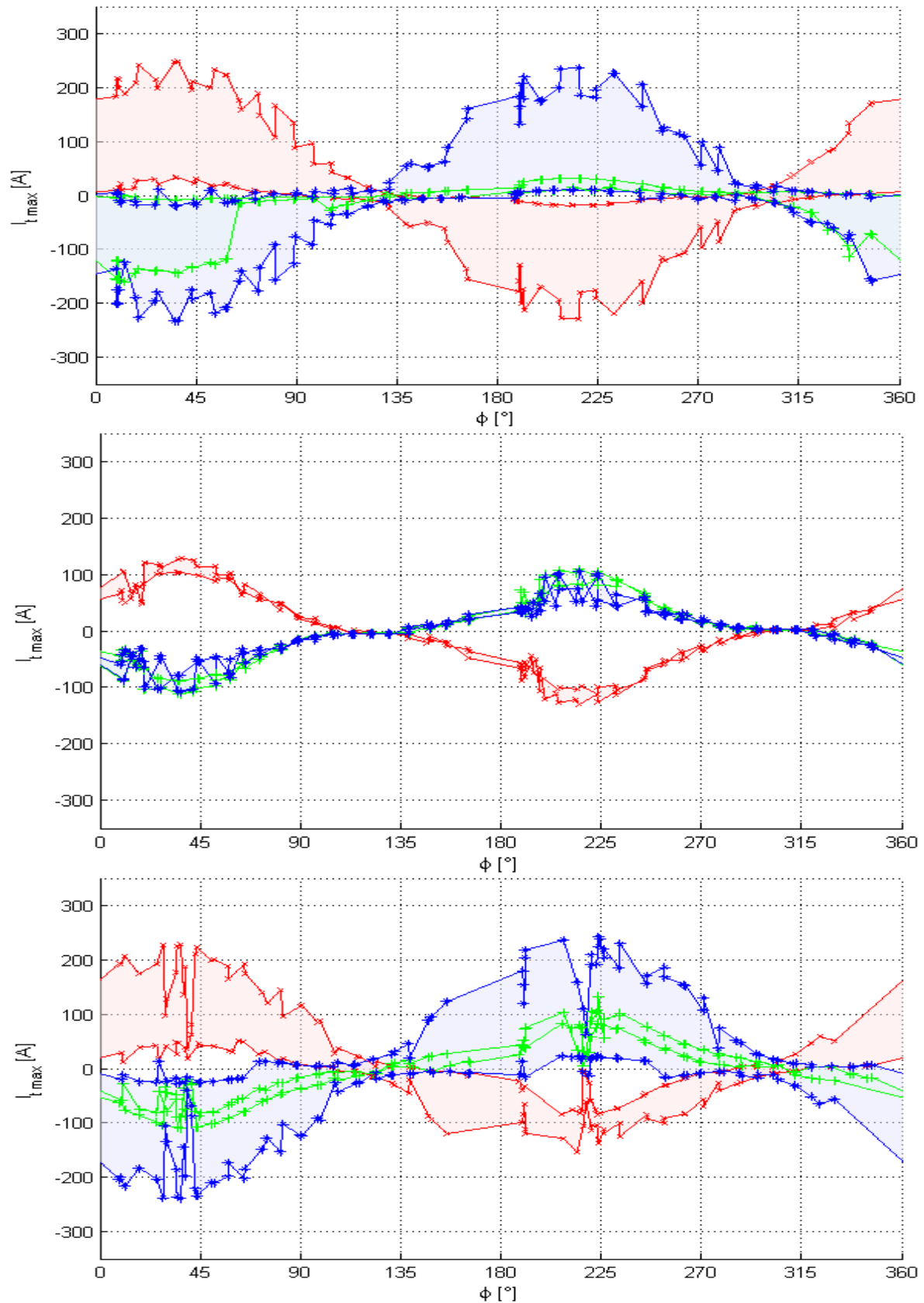
Při porovnání pouze metod v tomto zapojení na Obr. 37, 38 je na oblastech, kde je potlačen zapínací proud vidět, že průběhy v obou metodách, kdy byla v prvním předmagnetizována fáze L1 a ve třetí fázi L3, mají tyto oblasti prakticky shodné velikosti. A to jak v rozmezí úhlu, tak v maximu hodnoty zapínacího proudu. Za povšimnutí však stojí v obou metodách oba prostřední průběhy, kdy byly přemagnetovány vždy fáze L2. Pro nás významné oblasti s potlačeným zapínacím proudem jsou zde v rozmezí úhlu připnutí nejdelší a hodnota zapínacího proudu je minimální oproti ostatním, a to zejména v metodě pro spínání se zpožděním $(2 + 1/4)T$. Oblast potlačení se v této metodě $(2 + 1/4)T$ pohybuje zhruba v rozmezí od 115° do 135° , což je pro použití stykače jako spínacího prvku přijatelné rozmezí. Maximální hodnota zapínacího proudu se pohybuje přibližně v okolí 250 A, což platí pro obě sekvence.

Z výsledků pro toto zapojení vyplývá, že z hlediska zapínacího proudu mají obě metody opět obdobný efekt. Obě varianty vykazují přibližně stejný zapínací proud při sepnutí v nevhodném úhlu. Z vyhodnocení oblastí, kde je potlačen zapínací proud, se dá konstatovat, že výhodnější je opět druhá metoda se spínáním fází se zpožděním $(2 + 1/4)T$, která má nejlepší oblast při předmagnetování fáze L2, kde je oblast malého zapínacího proudu nejdelší – oproti zapojení YNyn kde tomu tak bylo při předmagnetování krajních fází. V porovnání s předešlým zapojením YNyn je také rozdíl v tom, že oblasti potlačení zapínacího proudu se posunuly přibližně o 25° zpět.



Obr. 37 Hraniční křivky ploch zapínacího proudu pro předmagnetování v jednotlivých fázích v zapojení Yyn podle Brunkeho a Frölichova metodou sekvenčního spínání fází se zpožděním $1/4 T$

Legenda: $I_{t \max} L_1$, $I_{t \max} L_2$, $I_{t \max} L_3$

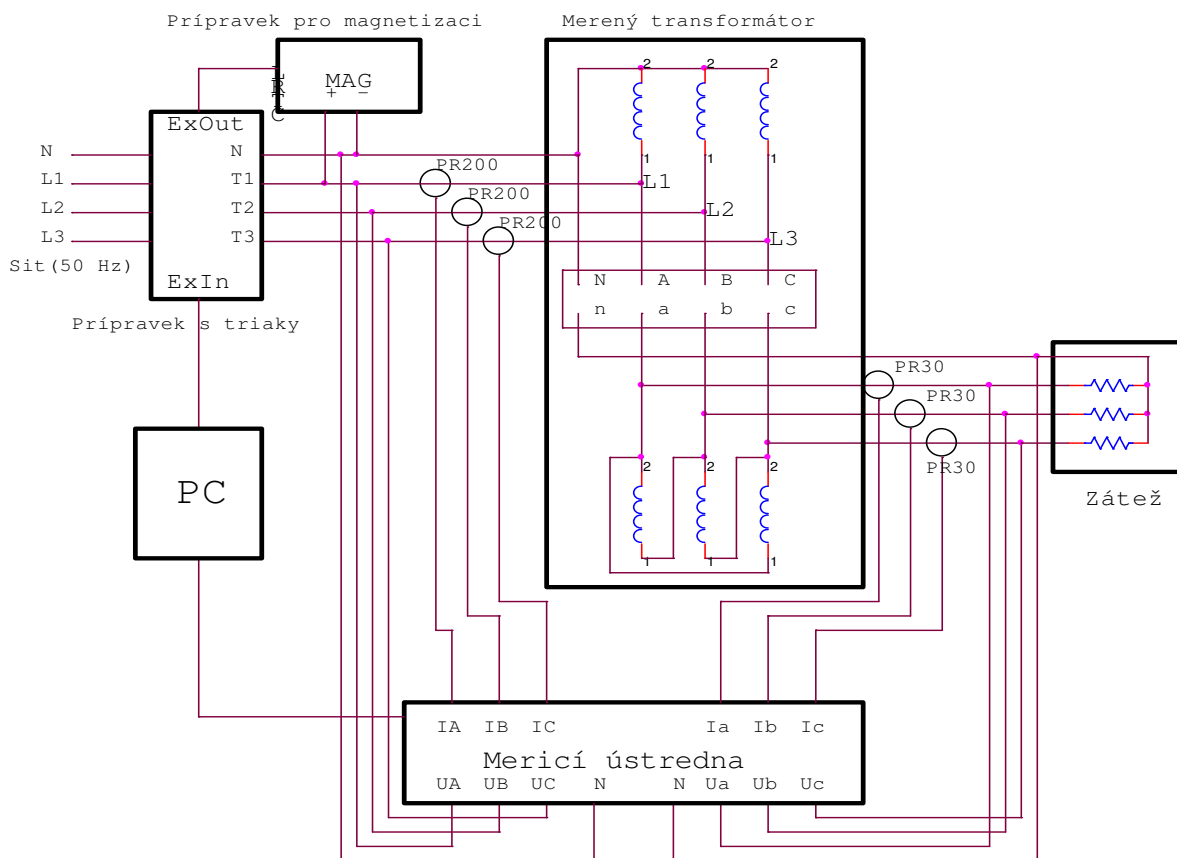


Obr. 38 Hraniční křivky ploch zapínacího proudu pro předmagnetování v jednotlivých fázích v zapojení Yyn podle Brunkeho a Frölicha metodou sekvenčního spínání fází se zpožděním $(2+1/4) T$

Legenda: $I_{t \max} L_1$, $I_{t \max} L_2$, $I_{t \max} L_3$

13. Měření zapínacího proudu v zapojení hvězda/trojúhelník (YNd)

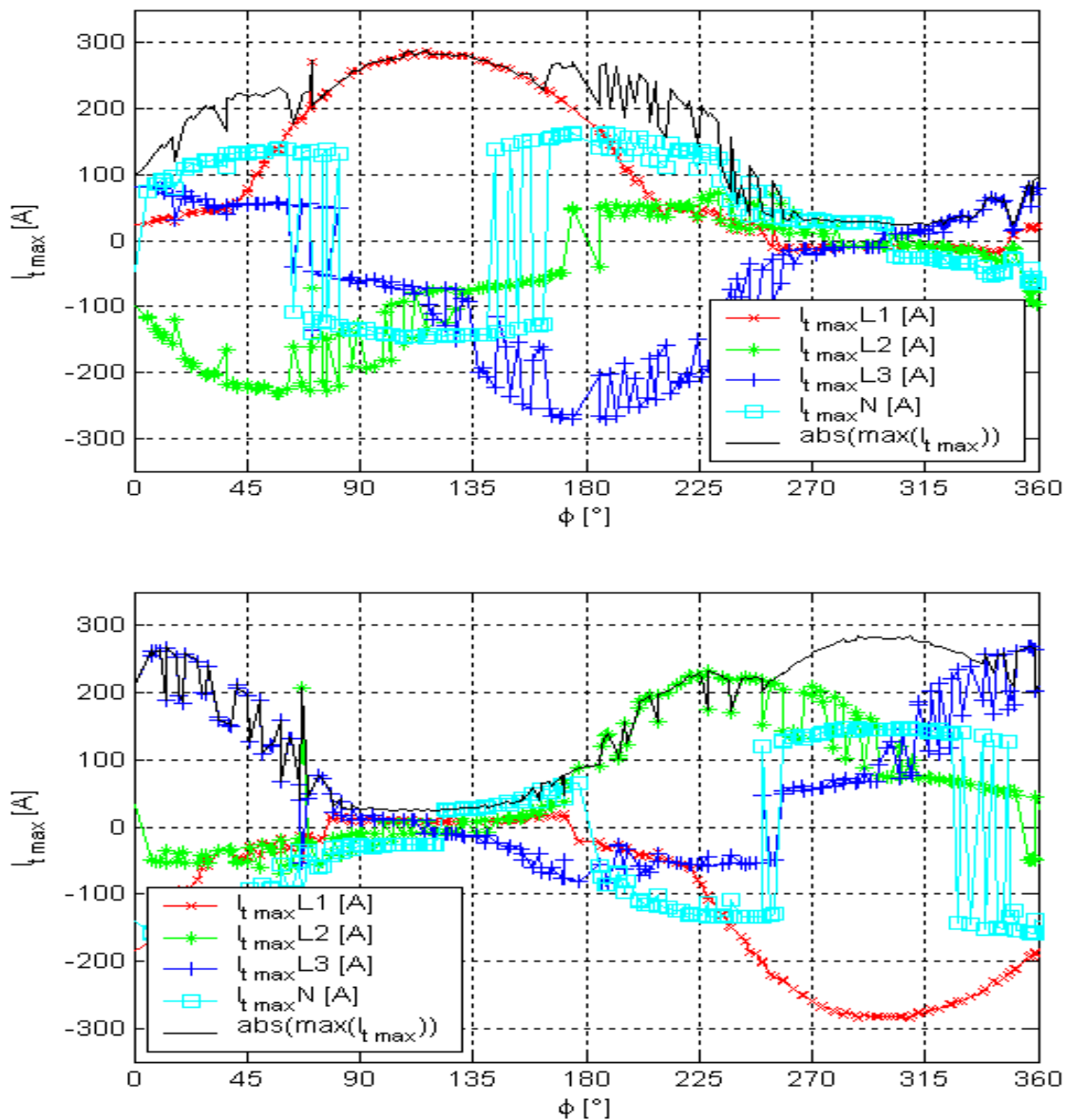
Schéma zapojení pro toto měření je na Obr. 39. Primární strana je v tomto měření zapojena do hvězdy a sekundární strana je zapojena do trojúhelníka. Zátěž byla přitom ponechána v zapojení do hvězdy. Jak bylo uvedeno výše, velikost a zapojení zátěže má na ovlivnění zapínacího proudu pouze nepatrný vliv.



Obr.39 Schéma zapojení obvodu pro měření zapínacího proudu v zapojení YNd

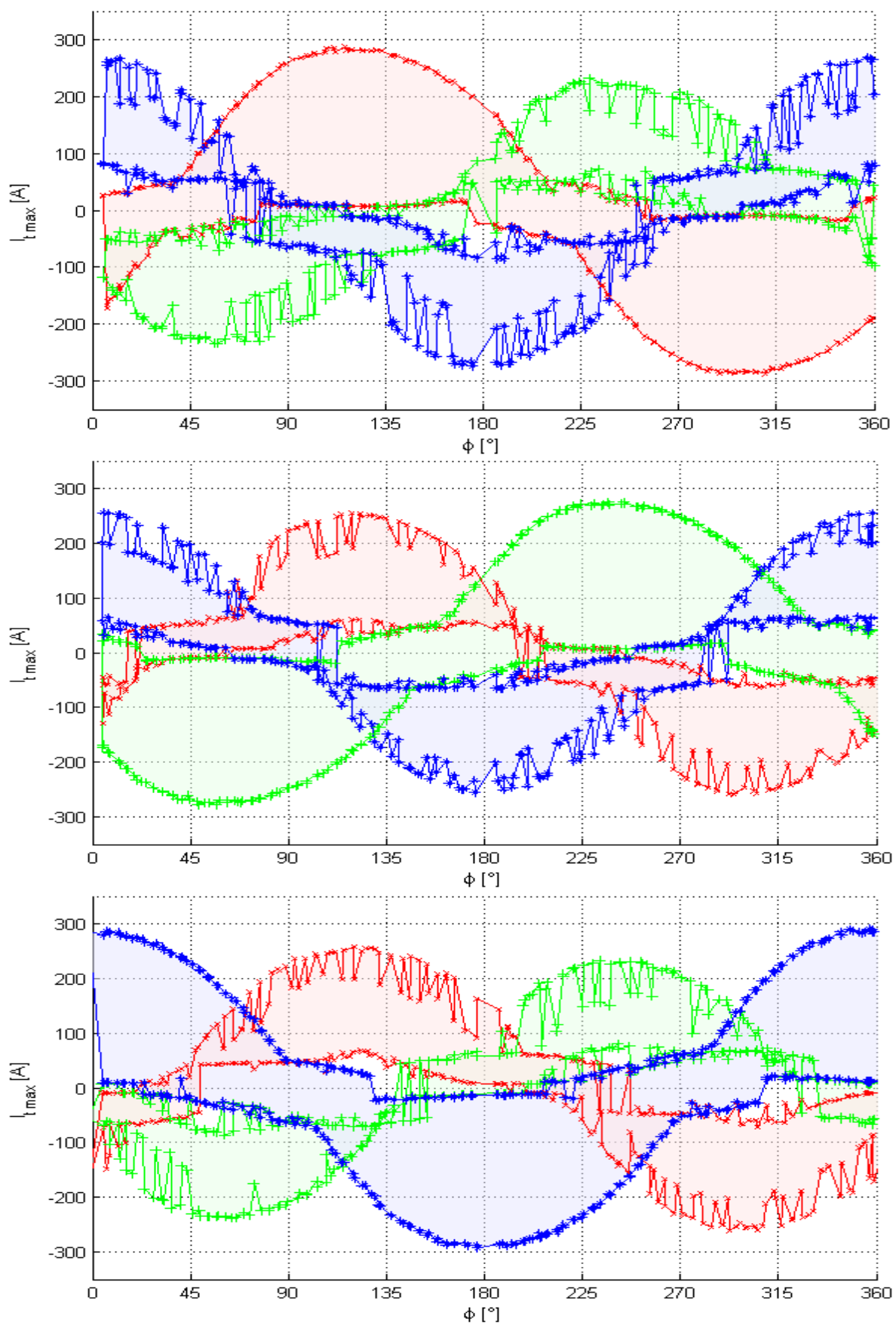
Výstupní vinutí zapojené do trojúhelníka způsobuje vyrovnávání magnetických toků jednotlivých sloupků jádra transformátoru. Na Obr. 40 jsou uvedeny základní příklady průběhů zapojení v kladném a záporném smyslu, kde byla přemagnetizována fáze L1.

Můžeme opět vidět absolutní hodnoty zapínacího proudu a zapínací proud procházející středním vodičem.






Obr. 40 Maxima zapínacího proudu EI transformátoru SVED BTV 5,0 v závislosti na Φ zapojení YNd, První průběh: Předmagnetována fáze L1, zapojení v záporném smyslu, Druhý průběh: Předmagnetována fáze L1, zapojeno v kladném smyslu, File: YNd_IR01_demFaze1M_, YNd_IR01_demFaze1P

V porovnání se zapojením YNyn jsou průběhy, kde jsou znázorněny hraniční křivky zapínacích proudů (Obr. 41) prakticky totožné. Z hlediska omezení zapínacího proudu se zde nevytvářejí žádné oblasti, kde by byla významně potlačena hodnota maximálního zapínacího proudu. Rozdíl je pouze v maximálních hodnotách zapínacího proudu, kdy v tomto zapojení YNd dosáhla maxima zapínacího proudu 290 A, kdežto v zapojení YNyn dosahovaly tyto hodnoty přes 300 A, konkrétně až 320 A.



Obr. 41 Hraniční křivky ploch zapínacího proudu pro předmagnetování v jednotlivých fázích v zapojení YNd,

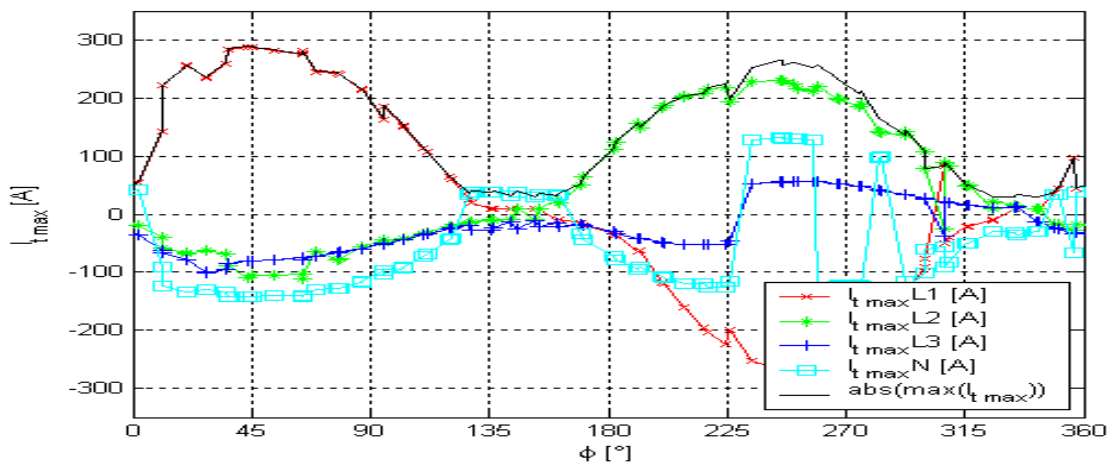
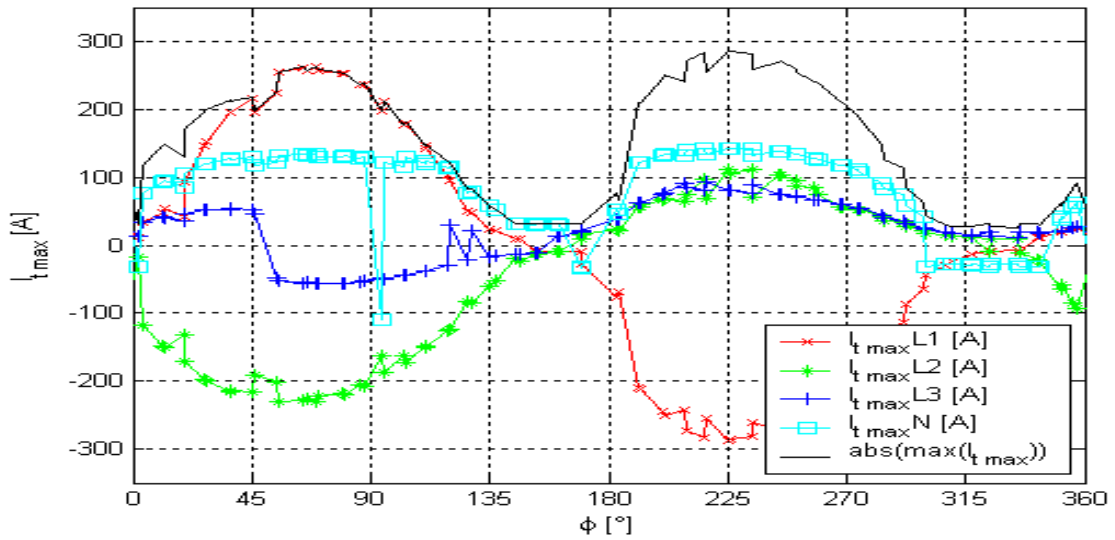
Legenda:  $I_{t \max} L_1$,  $I_{t \max} L_2$,  $I_{t \max} L_3$

13.1 Zapojení YNd s použitím metody sekvenčního spínání fází B–AC se zpožděním $1/4 T$ a $(2 + 1/4)T$ podle Brunkeho a Frölicha

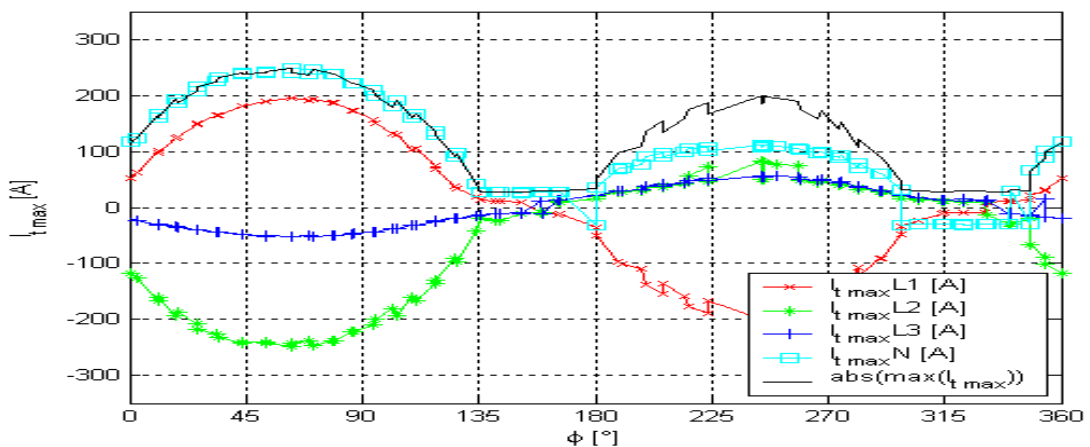
Metody sekvenčního spínání fází se v tomto zapojení chovají podobně jako v zapojení YNyn. Oblasti (Obr. 44, 45), ve kterých dochází k potlačení zapínacího proudu, se nacházejí přibližně ve stejných místech v okolí přibližně 145° a potom v okolí 330° . Tyto dvě oblasti jsou pro tuto práci velice důležité jak bylo řečeno v kapitole 11.1, protože jsou to oblasti, ve kterých se dá transformátor připnout k síti a zapínací proud bude v té době maximálně omezen. Na oblastech je vidět, že jsou prakticky stejné jako v zapojení YNyn v kapitole 11.1. Výhodnější oblasti potlačení zapínacího proudu jsou v prvním a třetím průběhu, kde byly v prvním předmagnetována fáze L1 a v třetím předmagnetována fáze L3.

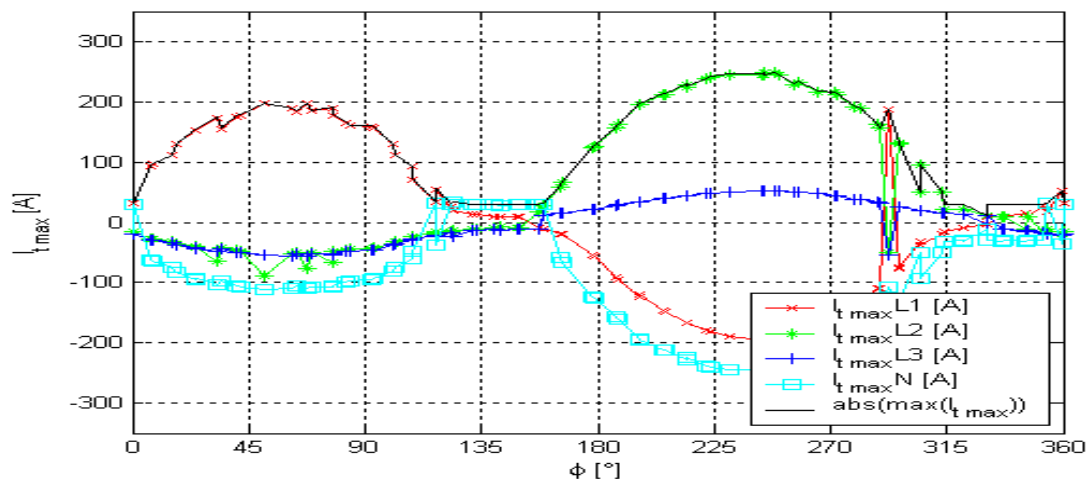
V prostředním průběhu, kde byla předmagnetována fáze L2, je situace odlišná v tom, že oblast potlačení je minimální a hodnota zapínacího proudu zde dosahuje vyšších hodnot.

Maximální hodnota zapínacího proudu v oblastech, kde není potlačený zapínací proud dosahuje až 300 A. Průběhy absolutních hodnot zapínacího proudu ve středním vodiči jsou znázorněny na Obr. 42, kde jsou znázorněny grafy pro spínání se zpožděním $1/4T$ v prvním grafu pro zapojení v kladném smyslu a v druhém pro zapojení v záporném smyslu a na Obr. 43, kde jsou znázorněny grafy pro spínání se zpožděním $(2 + 1/4)T$ ve stejném pořadí.

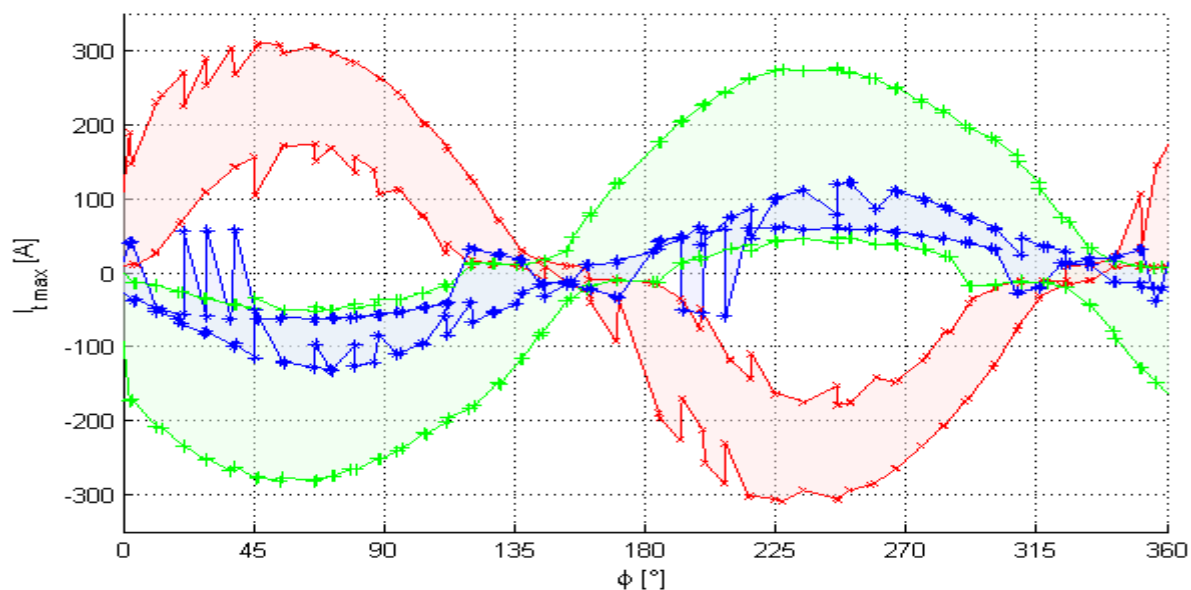
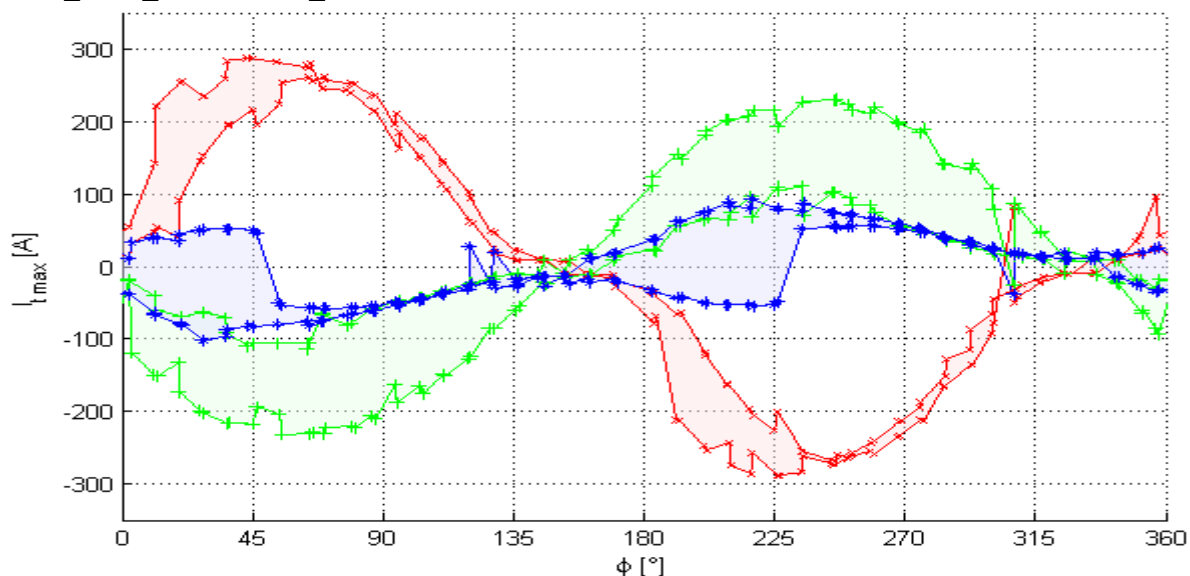


Obr. 42 Maxima zapínacího proudu EI transformátoru SVED BTV 5,0 v závislosti na Φ v zapojení YNd podle metody sekvenčního spínání fází 1/4T, První průběh: Předmagnetována fáze L1, zapojení v záporném smyslu, Druhý průběh: Předmagnetována fáze L1, zapojeno v kladném smyslu, File: YNd_IR03_demFaze1M_ , YNd_IR03_demFaze1P_

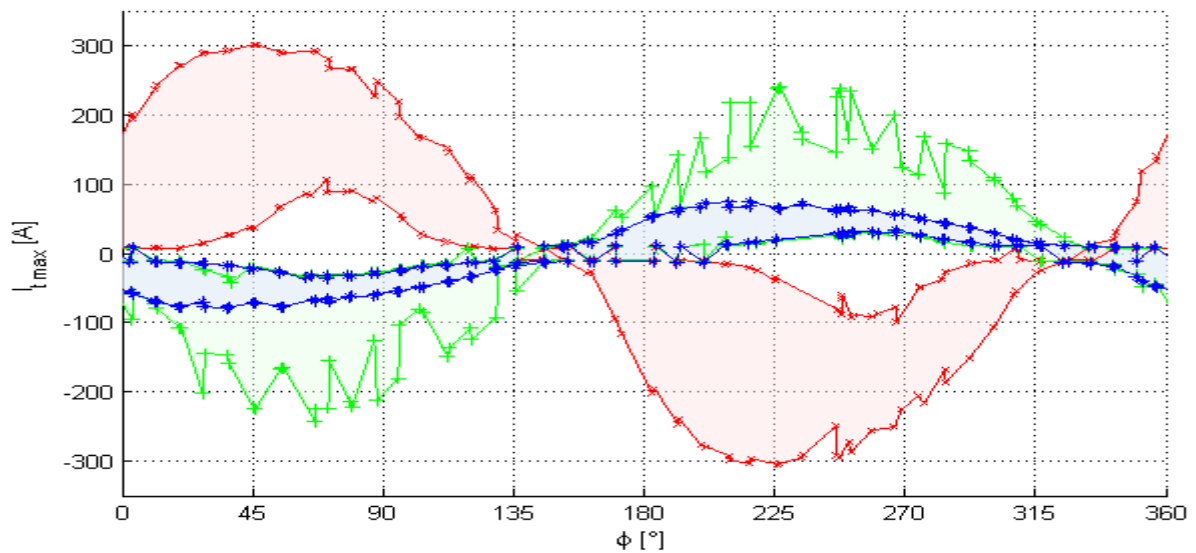




Obr. 43 Maxima zapínacího proudu EI transformátoru SVED BTV 5,0 v závislosti na Φ v zapojení YNd podle metody sekvenčního spínání fází $(2 + 1/4)T$, První průběh: Předmagnetována fáze L1, zapojení v záporném smyslu, Druhý průběh: Předmagnetována fáze L1, zapojeno v kladném smyslu, File: YNd_IR05_demFaze1M_, YNd_IR05_demFaze1P_

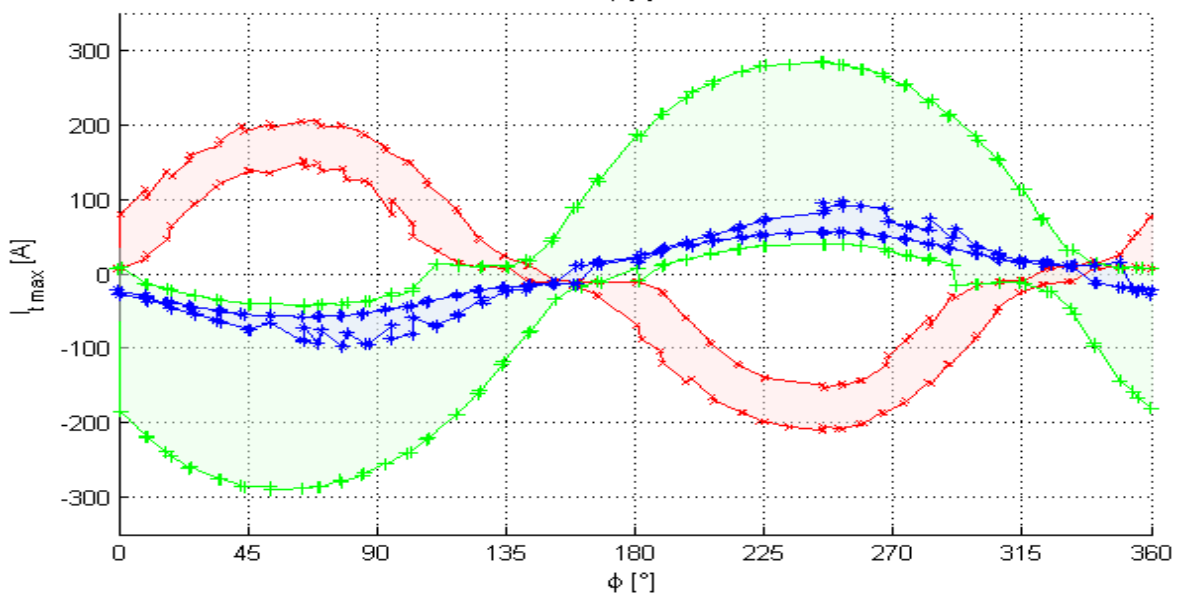
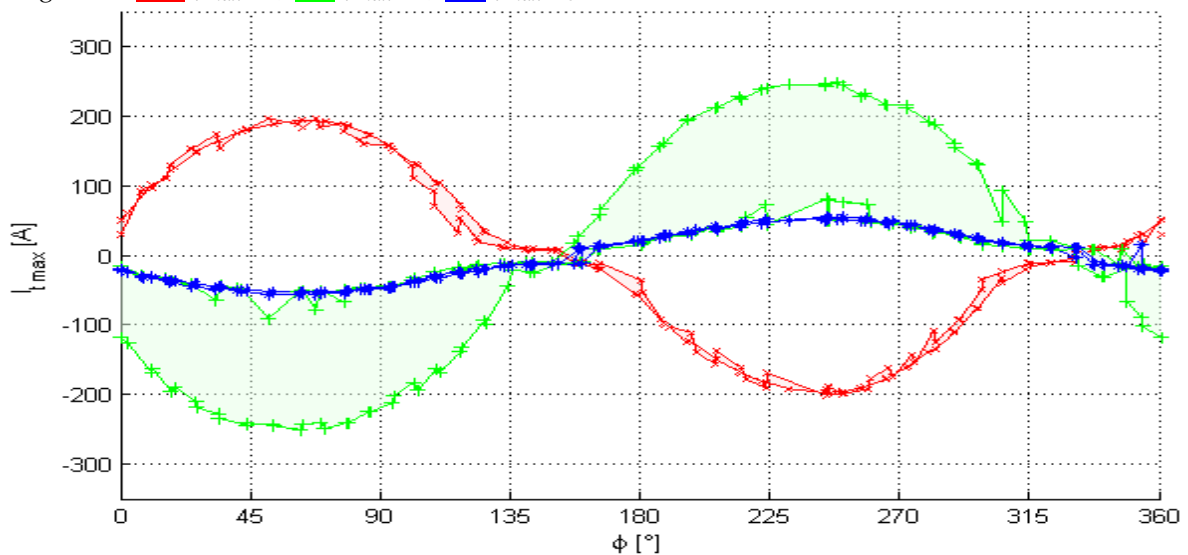


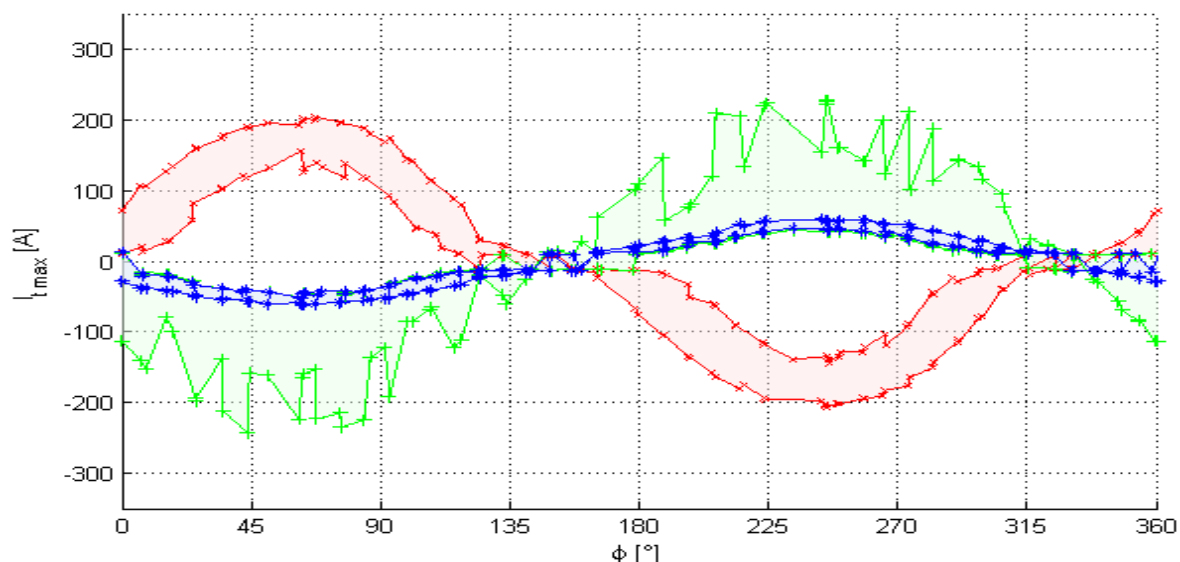
Zapínací proud třífázového transformátoru



Obr. 44 Hraniční křivky ploch zapínacího proudu pro předmagnetování v jednotlivých fázích v zapojení YNd podle Brunkeho a Frölicha metodou sekvenčního spínání fází se zpožděním $1/4 T$

Legenda: — $I_{t \max} L_1$, — $I_{t \max} L_2$, — $I_{t \max} L_3$





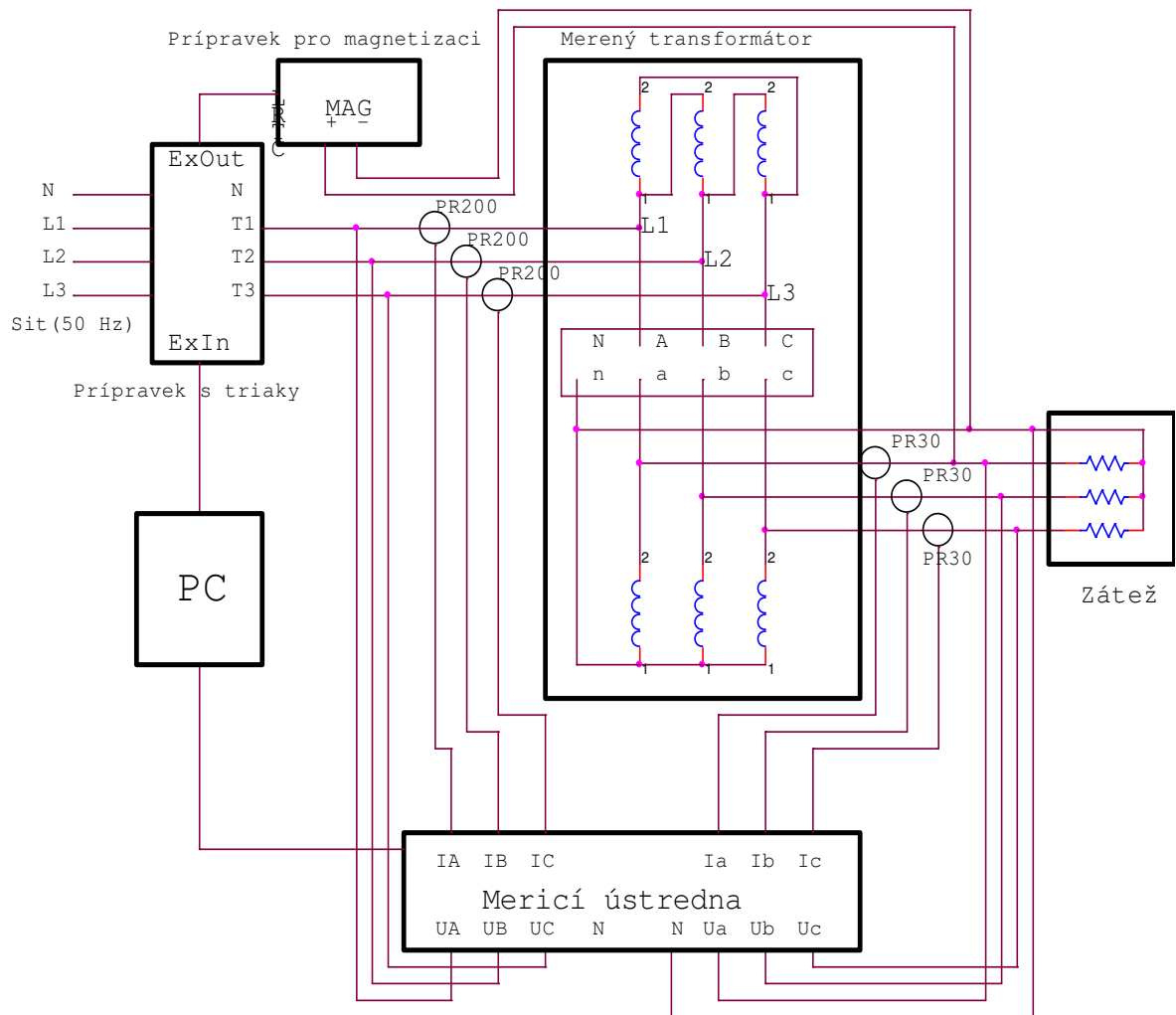
Obr.45 Hraniční křivky ploch zapínacího proudu pro předmagnetování v jednotlivých fázích v zapojení YNd podle Brunkeho a Fröliche metodou sekvenčního spínání fází se zpožděním $(2+1/4)T$

Legenda: — $I_{t\ max} L_1$, — $I_{t\ max} L_2$, — $I_{t\ max} L_3$

Závěrem se dá k této kapitole napsat, že výsledky v tomto zapojení jsou prakticky totožné se zapojením YNyn. Pro toto zapojení YNd je výhodnější použití metody sekvenčního spínání se zpožděním $(2 + 1/4)T$. Zejména v prvním průběhu je oblast, kde hodnoty zapínacího proudu jsou nejmenší, v okolí 145° (cca 140° až 155°) a to je pro využití k omezení zapínacího proudu výhodné.

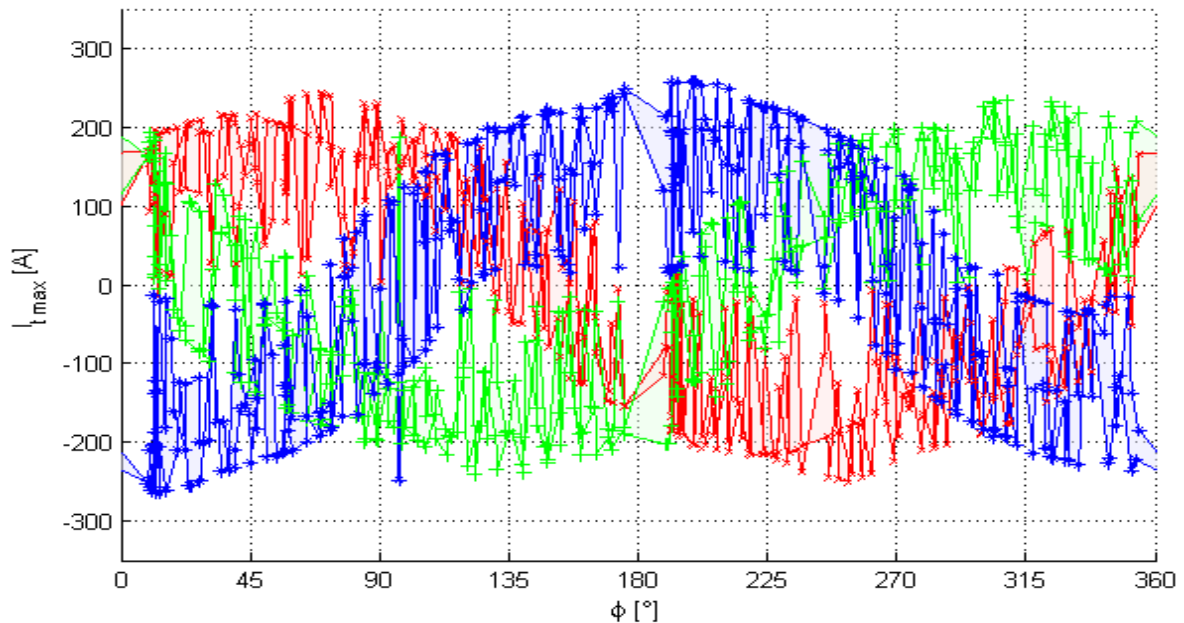
14. Měření zapínacího proudu v zapojení trojúhelník/hvězda (Dyn)

V tomto zapojení bylo primární vinutí transformátoru zapojeno do trojúhelníka a sekundární vinutí do hvězdy. Střední vodič byl připojen z přípravku pro předmagnetování na sekundární stranu transformátoru jako tomu je na Obr. 46.



Obr. 46 Schéma zapojení obvodu pro měření zapínacího proudu v zapojení Dyn

U první metody, kdy byly všechny fáze sepnuty najednou nebyla použita předmagnetizace. Příklad je na Obr. 47, kde jsou vidět hraniční plochy zapínacích proudů bez předmagnetizace fází. Maxima zapínacího proudu dosahují přibližně 260 A.

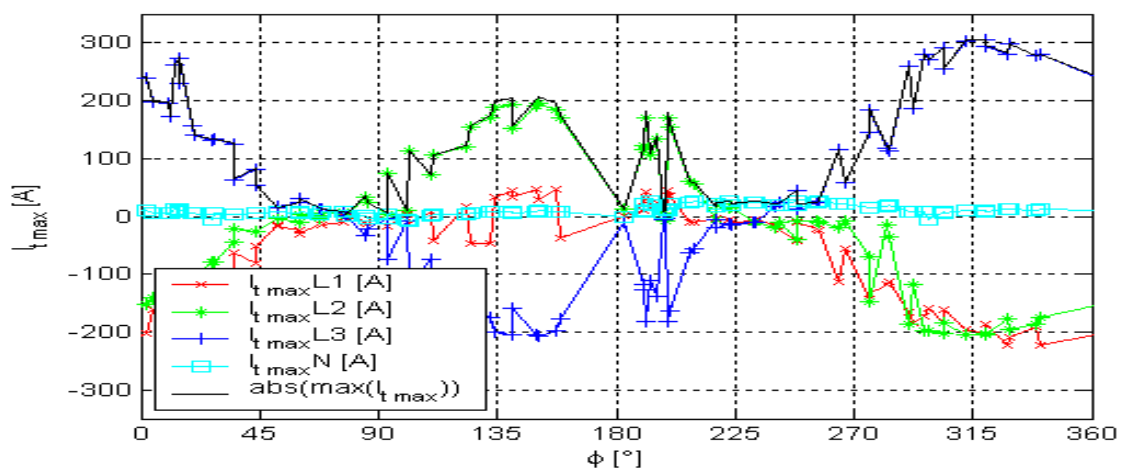


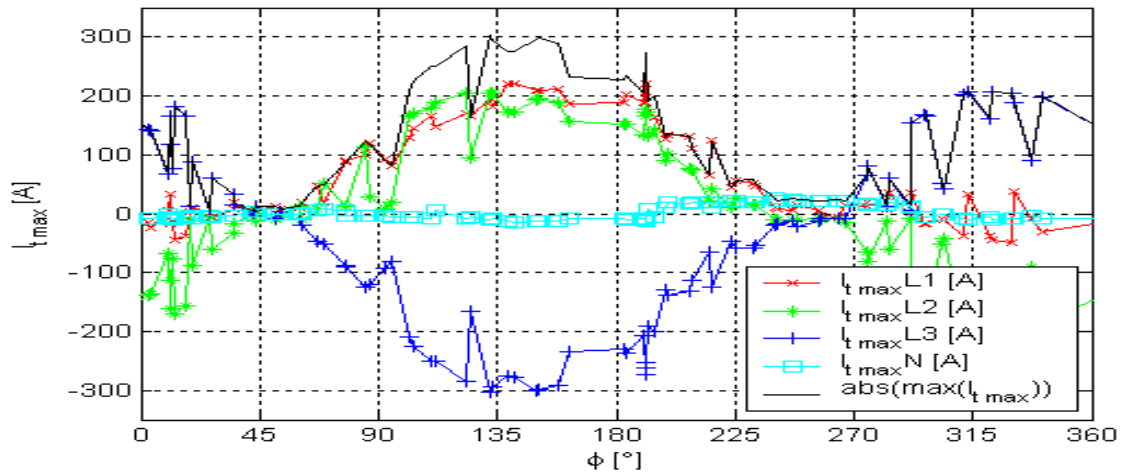
Obr. 47 Hraniční křivky ploch zapínacího proudu bez předmagnetování v jednotlivých fázích v zapojení Dyn,

Legenda: $I_{t \max} L_1$, $I_{t \max} L_2$, $I_{t \max} L_3$

14.1 Zapojení Dyn s použitím metody sekvenčního spínání fází AC-B se zpožděním $1/4 T$ a $(2 + 1/4)T$ podle Brunkeho a Frölicha

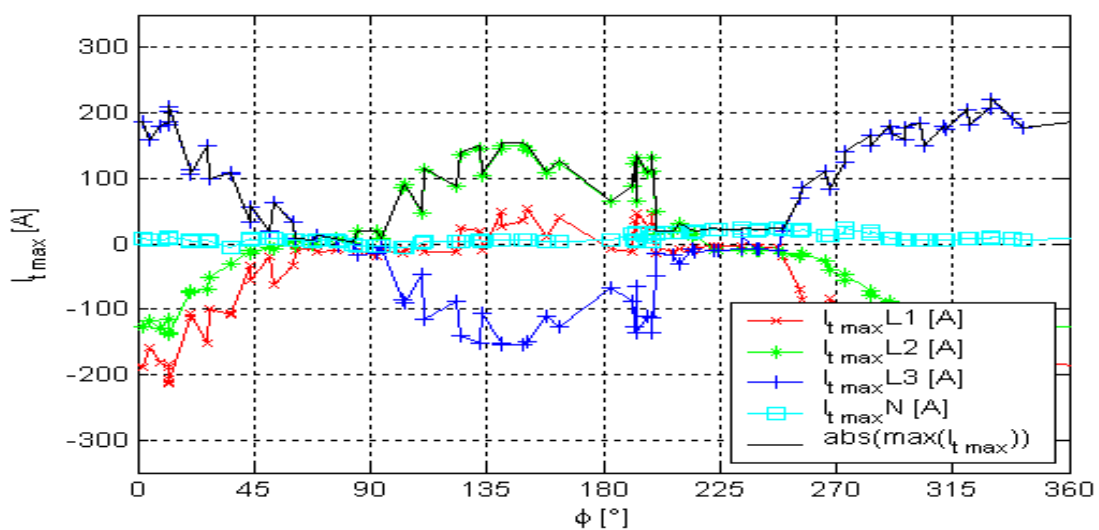
Výsledné průběhy v tomto zapojení jsou pro obě metody sekvenčního spínání kostrbaté, dochází ke kolísání zapínacího proudu.

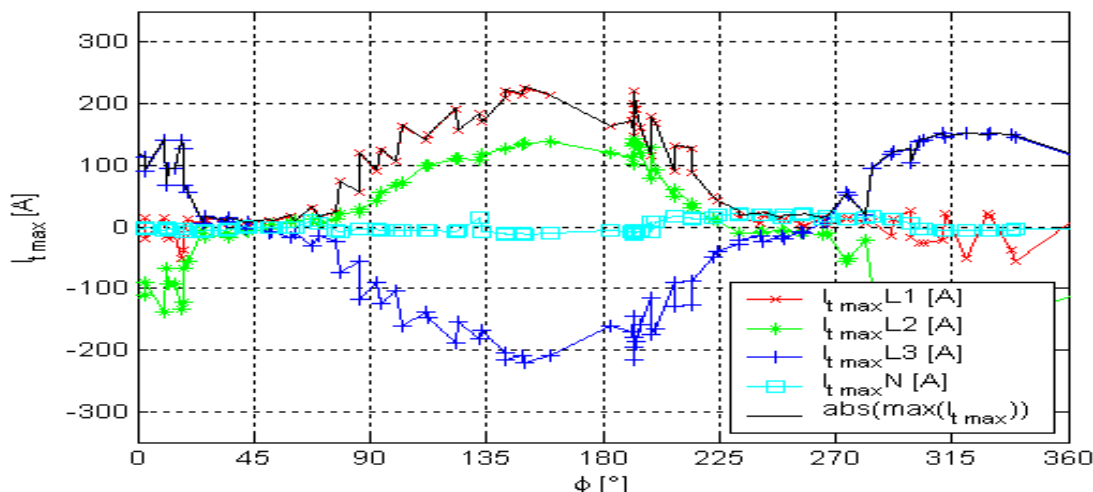




Obr. 48 Maxima zapínacího proudu EI transformátoru SVED BTV 5,0 v závislosti na Φ v zapojení Dyn podle metody sekvenčního spínání fází $1/4T$, První průběh: Předmagnetována fáze L1, zapojení v záporném smyslu, Druhý průběh: Předmagnetována fáze L1, zapojeno v kladném smyslu, File: Dy_IR06_demFaze1M_, Dy_IR06_demFaze1P_

Na Obr. 48 a na Obr. 49 jsou pro příklad znázorněny průběhy jednou pro sekvenci $1/4T$ a potom pro sekvenci $(2 + 1/4)T$, kde stojí za povšimnutí, že zapínací proud středním vodičem je téměř nulový. Je to způsobeno tím, že zapojení středního vodiče na sekundární vinutí způsobuje, že zapínací proud neodtéká středním vodičem.



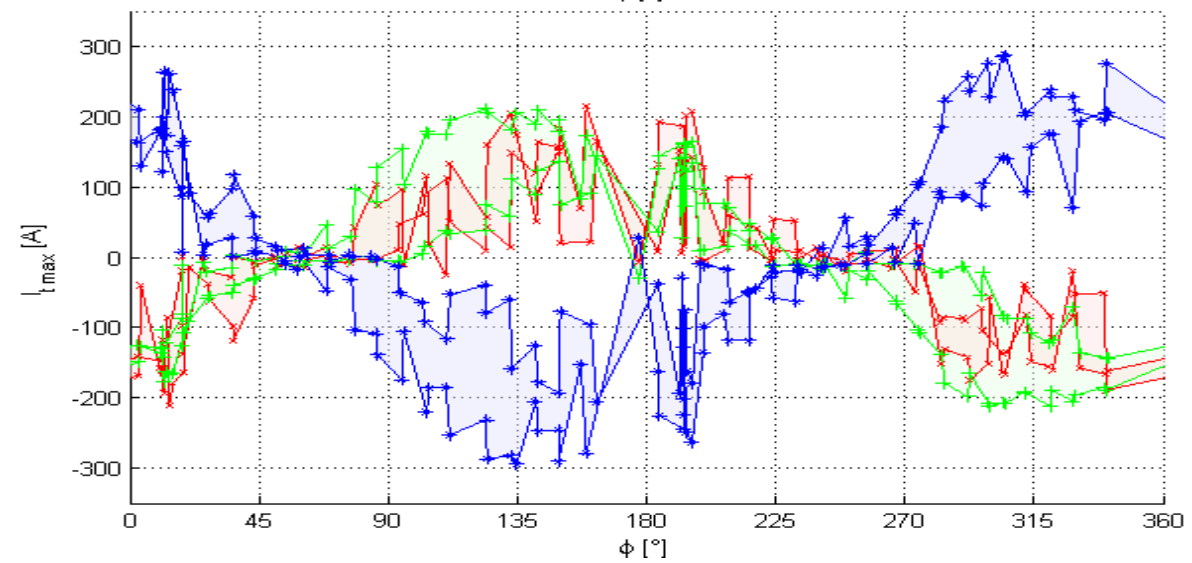
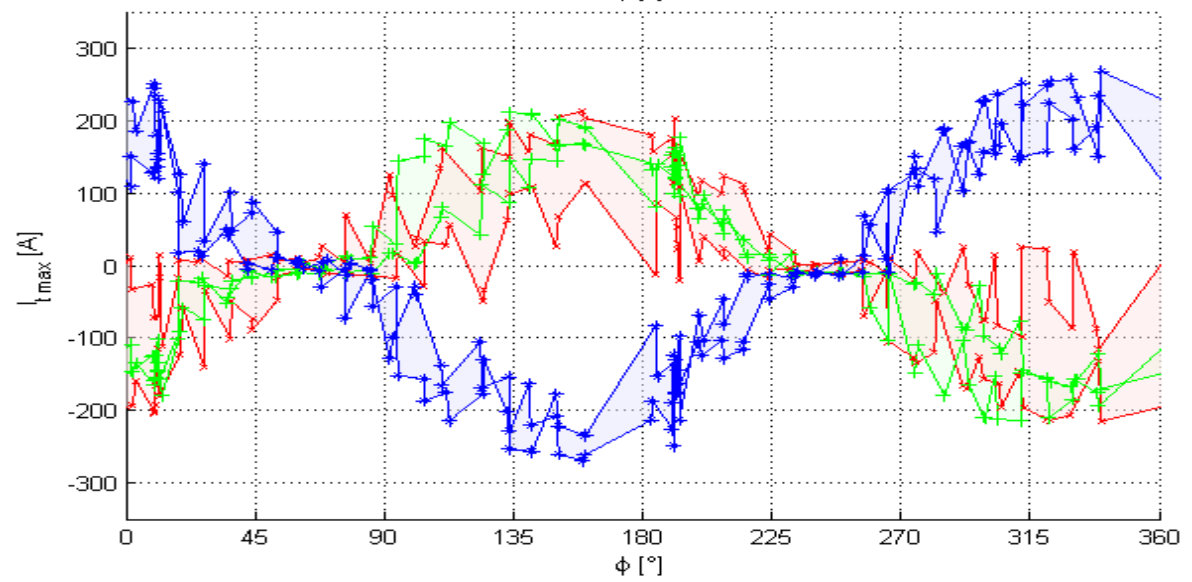
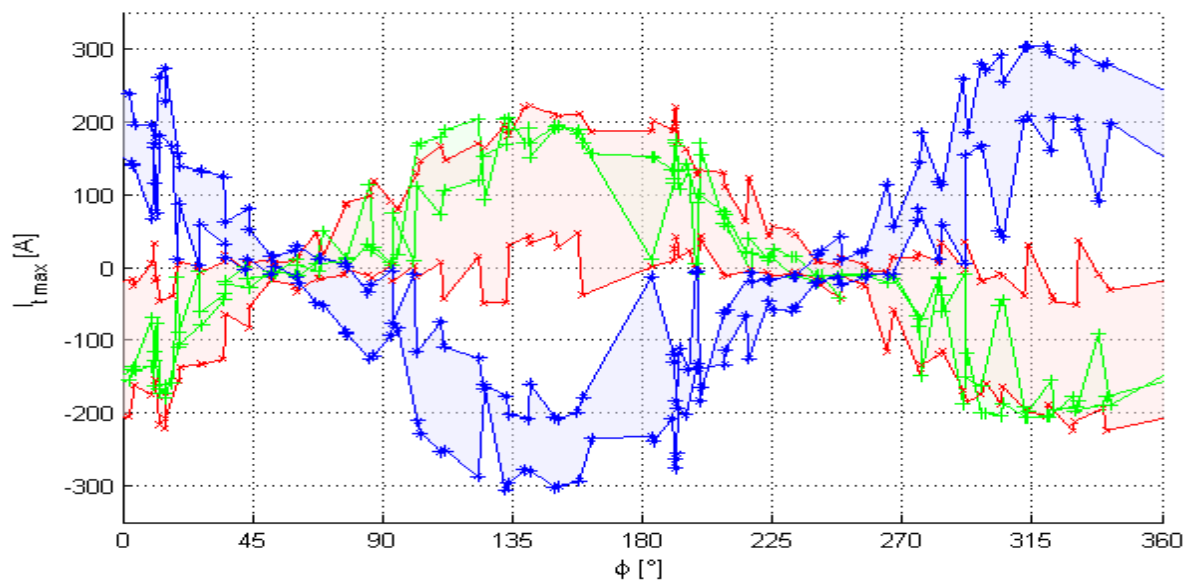


Obr. 49 Maxima zapínacího proudu EI transformátoru SVED BTV 5,0 v závislosti na Φ v zapojení Dyn podle metody sekvenčního spínání fází $(2 + 1/4)T$, První průběh: Předmagnetována fáze L1, zapojení v záporném smyslu, Druhý průběh: Předmagnetována fáze L1, zapojeno v kladném smyslu, File: Dy_IR07_demFaze1M_, Dy_IR07_demFaze1P_

Z Obr. 50, kde jsou zobrazeny hraniční křivky zapínacích proudů pro spínání se zpožděním $1/4T$ a z Obr. 51, kde jsou zobrazeny hraniční křivky pro spínání se zpožděním $(2 + 1/4)T$ je patrné, že situace, kde dochází k potlačení zapínacího proudu je odlišná, než u všech předešlých zapojení. V prvním případě (Obr. 50) pro spínání se zpožděním $1/4T$ se oblasti, kde je zapínací proud potlačen posunuly a jsou přibližně v okolí 50° a potom v okolí 250° . Přitom oblasti nejsou příliš dlouhé. Nejlepší situace je v prostředním průběhu, ve kterém byla předmagnetována fáze L2, kde jsou oblasti nejdelší a hodnota maxima zapínacího proudu je minimální. Nejhorší situace je v prvním průběhu, ve kterém byla předmagnetována fáze L1, kde oblasti potlačení jsou nejkratší a hodnota maxima zapínacího proudu dosahuje minimálně 20 A.

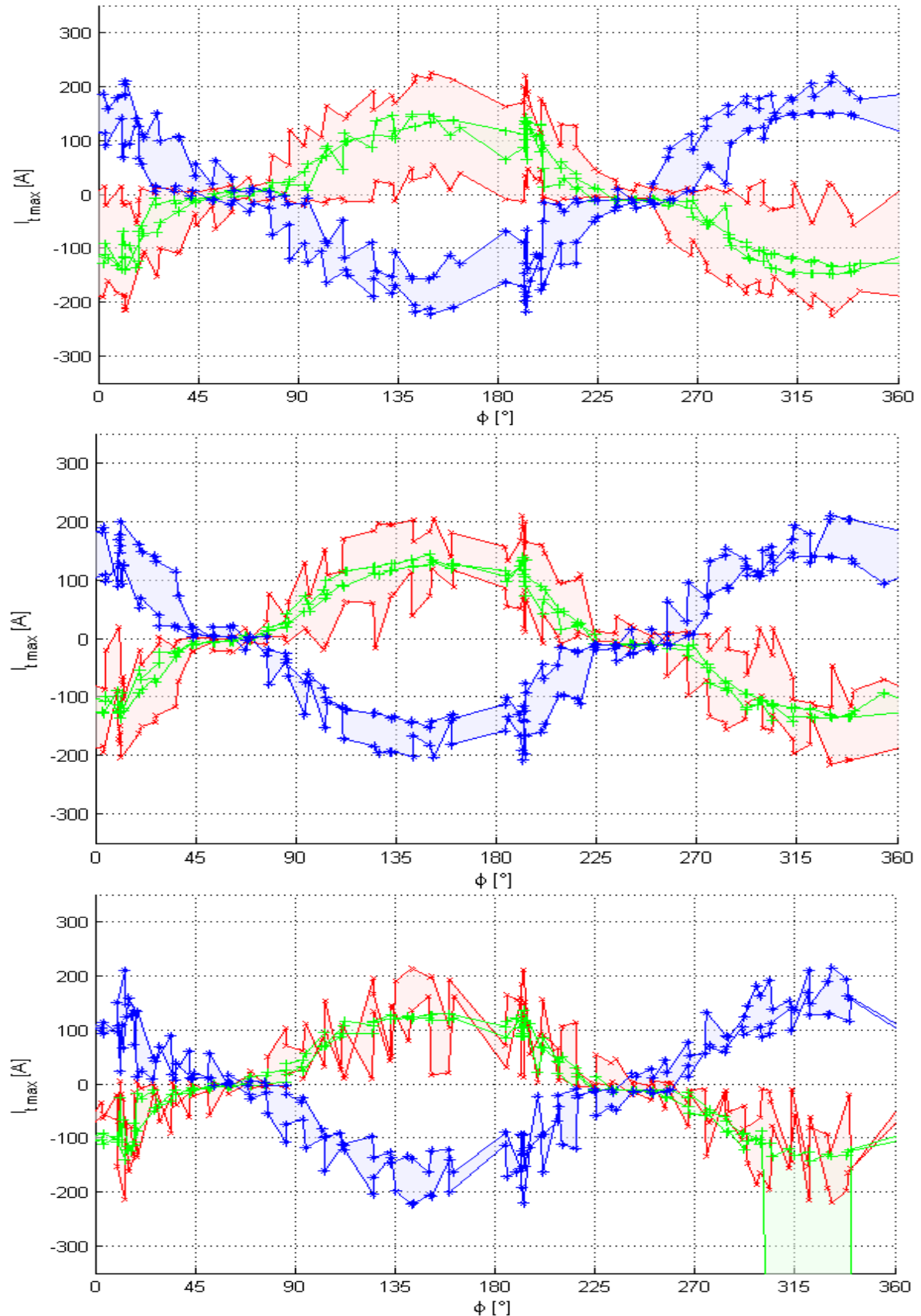
V druhém případě (Obr. 51) se okolí posunulo přibližně do 60° a potom do 250° . Co se týká oblastí, situace je prakticky stejná jako v předchozí metodě (Obr. 50). Viditelný rozdíl je v tom, že zapínací proud nedosáhl větší hodnoty svého maxima, než 220 A, přičemž u předchozí metody dosáhla maxima zapínacího proudu až 300 A. samozřejmě to pro nás není tak podstatné jako to, že existují oblasti potlačení zapínacího proudu.

Nejlepší pro použití k omezování zapínacího proudu z tohoto měření pro zapojení Dyn se jeví první metoda se zpožděním $1/4T$, kde v prostředním průběhu, ve kterém se předmagnetovala fáze L2 jsou nejlepší oblasti s potlačeným zapínacím proudem hlavně v oblasti připnutí v okolí 250° .



Obr. 50 Hraniční křivky ploch zapínacího proudu pro předmagnetování v jednotlivých fázích v zapojení Dyn podle Brunkeho a Frölicha metodou sekvenčního spínání fází se zpožděním $1/4 T$

Legenda: $I_{t \max} L_1$, $I_{t \max} L_2$, $I_{t \max} L_3$



Obr. 51 Hraniční křivky ploch zapínacího proudu pro předmagnetování v jednotlivých fázích v zapojení Dyn podle Brunkeho a Frölicheho metodou sekvenčního spínání fází se zpožděním $(2+1/4)T$

Legenda: $I_{t\ max\ L_1}$, $I_{t\ max\ L_2}$, $I_{t\ max\ L_3}$

15. Závěr

Cílem práce bylo sestavit grafy zapínacích proudů pro různá skupinová zapojení a ověřit metody omezení ZP sekvenčním spínáním jednotlivých fází podle Brunkeho a Fröhlicheho.

Pro každé skupinové zapojení byly měřeny tři metody spínání. První bylo současné sepnutí všech fází najednou. Další dvě byly metody sekvenčního spínání fází podle Brunkeho a Frölicheho se zpožděním spínání $1/4T$ a $(2 + 1/4)T$. V každém měření byla před připnutím předmagnetována vždy jedna fáze, a to nejprve v kladném a v další sadě v záporném smyslu. Díky definování počáteční remanentní indukce pro každou fázi zvlášť jsme získali hraniční křivky ploch zapínacích proudů.

Jako první byl měřen zapínací proud transformátoru pro zapojení vinutí YNyn (hvězda s vyvedeným středem / hvězda s vyvedeným středem). V tomto zapojení se zapínací proud uzavírá podle Kirchhoffova zákona do ostatních fází, ale většina odtéká středním vodičem. Pro současné připnutí všech fází neexistuje bezpečná oblast vhodného okamžiku připnutí a počáteční magnetizace (Obr. 25). Hodnota maximálního zapínacího proudu se pohybuje přibližně kolem 320 A (Obr. 23). Při měření metod pomocí sekvenčního spínání vyplynulo, že tyto obě metody jsou závislé na úhlu připnutí transformátoru k síti a to u všech zapojení. Vždy vznikly v měřených grafech dvě oblasti, kde je potlačen zapínací proud. V zapojení YNyn se tyto oblasti pohybovaly v okolí 145° a potom v okolí 330° . Z výsledků se dá konstatovat, že pro zapojení YNyn mají obě metody sekvenčního spínání obdobný efekt. Varianta se zpožděním $(2 + 1/4)T$ vykazuje menší zapínací proud při sepnutí v nevhodném úhlu. Z hlediska oblastí potlačení zapínacího proudu jsme došli k závěru, že je nejvýhodnější je sekvenční spínání se zpožděním $(2 + 1/4)T$, u které je přemagnetována fáze L1 (Obr. 29).

V další části byl měřen zapínací proud v zapojení vinutí Yyn (hvězda bez vyvedeného středu / hvězda s vyvedeným středem). Maximum zapínacího proudu v tomto zapojení pro metodu připnutí všech fází v jednom okamžiku dosahuje o 25 % nižších hodnot, než je tomu u předchozího zapojení YNyn. Z pohledu omezení zapínacího proudu je toto zapojení výhodnější. Samozřejmě zde také platí, že zapínací proud není ovlivňován volbou okamžiku připnutí transformátoru k síti, jako tomu je u všech zapojení s použitím této metody. V porovnání s předešlými metodami pro sekvenční spínání fází v zapojení YNyn

s těmito, je vidět, že maxima zapínacího proudu se pohybují v okolí maximálně 250 A. U zapojení YNyn dosahovala maxima až 300 A. Na rozdíl od metody v zapojení YNyn se nám oblasti, kde byl potlačený zapínací proud, posunuly přibližně o 25° zpět. V tomto zapojení Yyn se hodnota zapínacího proudu, která je téměř nulová pohybuje v okolí 115° a 305° a to v obou sekvencích spínání. Výhodnější je opět druhá metoda se zpožděním $(2 + 1/4)T$, která má nejdelší oblast nízkého zapínacího proudu při předmagnetování fáze L2. Zapojení YNyn má výhodnější oblasti pro potlačení zapínacího proudu pro předmagnetizaci fáze L1 a L3 a v zapojení Yyn jsou lepší oblasti potlačení pro předmagnetizaci fáze L2.

Dalším zapojením, u kterého byl měřen zapínací proud bylo zapojení YNd (hvězda s vyvedeným středem / trojúhelník). V porovnání se zapojením YNyn jsou průběhy hraničních křivek zapínacího proudu prakticky totožné. Rozdíl je pouze v maximálních hodnotách zapínacího proudu, kdy v tomto zapojení YNd dosáhla maxima zapínacího proudu 290 A, kdežto v zapojení YNyn dosahovaly tyto hodnoty až 320 A. Metody sekvenčního spínání se v tomto případě chovají také podobně jako v zapojení YNyn. Na oblastech potlačení zapínacího proudu je vidět, že jsou prakticky stejné jako v zapojení YNyn. Výhodnější oblasti potlačení zapínacího proudu jsou při předmagnetování fáze L1 a třetí fáze L3. Maximální hodnota zapínacího proudu, kde nedochází k potlačení zapínacího proudu dosahuje v tomto zapojení YNd až 290 A. Závěrem se dá pro tuto metodu YNd říci, že výhodnější je použití metody sekvenčního spínání fází se zpožděním $(2 + 1/4)T$. Oblasti minimálního zapínacího proudu jsou nejdelší v okolí 145° (cca trvá od 140° do 155°).

V poslední metodě zapojení Dyn (trojúhelník / hvězda s vyvedeným středem) se s předmagnetizací fází měřili pouze metody se sekvenčním spínáním. Oblasti potlačení zapínacího proudu se oproti předešlým zapojením také posunuly. Pro sekvenci se zpožděním $1/4T$ se posunuly do okolí 50° a 250° a pro sekvenci se zpožděním $(2 + 1/4)T$ se posunuly do okolí 60° a 250°. Nejlepší pro použití k omezování zapínacího proudu z tohoto měření pro zapojení Dyn se jeví první metoda sekvenčního spínání se zpožděním $1/4T$, kde v prostředním průběhu, ve kterém se předmagnetovala fáze L2 jsou nejlepší oblasti s potlačeným zapínacím proudem hlavně v oblasti připnutí v okolí 250°. Maxima zapínacího proudu dosáhly maximálně 220 A.

Pro porovnání jsou v tabulce 6 uvedeny hodnoty naměřených maximálních zapínacích proudů pro jednotlivá skupinová zapojení a hodnoty spočítané ze vzorců z kapitoly 4. Tyto vzorce slouží pro výpočet maxim zapínacích proudů I_{\max} pro jednotlivá zapojení. Je vidět,

že naměřené hodnoty se zvláště u zapojení YNyn téměř shodují s teoretickým výpočtem. Největší odchylka hodnot je potom v zapojení Dyn.

	Teoretické hodnoty	Naměřené hodnoty
YNyn	326 A	320 A
Yyn	282 A	250 A
YNd	266 A	290 A
Dyn	326 A	260 A

Výsledek této práce bude využit pro návrh omezovače zapínacího proudu pro třífázové transformátory. Vytipování vhodných oblastí spínání bude doufám cennou informací. V dalším pokračování měření zapínacích proudů by bylo dobré zaměřit se na vliv prodlevy sepnutí dalších fází u sekvenčního spínání.

Použitá literatura

- [1] Novák M. Přechodový děj při zapnutí transformátoru – způsoby omezování zapínacího proudu. [disertační práce] 1. vyd. Liberec: TU, 2003. Dostupné na [www <http>://www.fm.vslib.cz/~kel/research/projects/trafostart/disertace_Miroslav_Novak.pdf](http://www.fm.vslib.cz/~kel/research/projects/trafostart/disertace_Miroslav_Novak.pdf)
- [2] Jezierski E. Transformátory, Theoretické základy. Academia ČSAV, 1973
- [3] Keppert S., Čermák T. Elektrické stroje, 2. vyd. Ediční středisko VŠB, Ostrava 1984
- [4] Petrov G. N. Elektrické stroje 1, Úvod { Transformátory. 3. dopl. vyd. Praha: Academia, 1980
- [5] Bašta J. a kolektiv. Měření na elektrických strojích – 2. Měření na transformátorech, SNTL Praha, 1957
- [6] ČSN 35 1086 Metody elektromagnetických zkoušek a měření odporu vinutí stejnosměrným proudem. Praha: Vydavatelství norem, 1981.
- [7] Novák M., Zapínací proud třífázových transformátorků, 2005, 3.vydání časopisu K7. Dostupné na [www <http://k7.tul.cz/download/k7_05_3.pdf >](http://k7.tul.cz/download/k7_05_3.pdf)
- [8] Novák M., Přípravek pro měření zapínacího proudu [E-mail], Uloženo na miroslav.novak@tul.cz
- [9] Hynková E., Nelineární vlastnosti transformátorů v závislosti na pracovní indukci. [Diplomová práce] TU v Liberci, 2004.

[10] Brunke J. H., Fröhlich K. J. Elimination of Transformer Inrush Currents by Controlled Switching - Part II: Application and Performance Considerations. IEEE Transactions on Power Delivery. Vol. 16, No. 2, 2001.

[11] Novák M., TrafoStarter – výkonová část, ovládání, kontroler [E-mail], Uloženo na miroslav.novak@tul.cz

[12] Kelbich M., Prezentace z předmětu Speciální číslicové systémy, ČVUT Praha, Dostupné na www

<http://noel.feld.cvut.cz/vyu/scs/prezentace2003/CC1010/main_window.htm>

Struktura příloh na DVD

Na přiloženém DVD je uložena kompletní dokumentace k diplomové práci. Dále jsou uloženy programy pro zpracování výsledných grafů, které jsou v dokumentaci a naměřené soubory.

Seznam adresářové struktury na DVD:

„*Dokumentace*“

V tomto adresáři je uložena dokumentace k diplomové práci.

„*Měření/Základní_grafy*“

V tomto souboru jsou nahrána základní měření, ze kterých byly později zpracovány výsledné grafy pro přemagnetování jednotlivých fází ukazující absolutní hodnotu zapínacího proudu a proud středním vodičem, z nichž byly složeny křivky výsledných zapínacích proudů.

„*Měření/Absolutní_Zap_proud*“

Tento soubor obsahuje data měření, kdy výsledné grafy ukazují absolutní hodnotu zapínacího proudu + program pro vykreslení těchto grafů „*T_GraphFinal*“

„*Měření/Hraniční_křivky_Zap_proud*“

Soubor s daty měření hraničních křivek zapínacího proudu. Soubor obsahuje také program pro zpracování těchto dat a vykreslení grafů „*T_GraphFinal*“.