

České vysoké učení technické v Praze
Fakulta elektrotechnická
Katedra elektrických pohonů a trakce

Studijní program: Elektrotechnika, energetika a management
Obor: Aplikovaná elektrotechnika



Symetrizační autotransformátor
Symmetrizing transformer

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Vypracoval: Jan Petřík
Vedoucí práce: Ing. Karel Buhr, CSc.
Rok: 2015

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

V Praze dne

Jan Petřík

Poděkování

Rád bych touto cestou poděkoval Ing. Karlu Buhrovi, CSc, za odborné vedení a poskytnuté konzultace v průběhu zpracování bakalářské práce. Dále bych rád poděkoval Ing. Pavlu Mňukovi, CSc, za zapůjčení měřicího přístroje. Také bych rád poděkoval katedře elektrických pohonů a trakce za umožněné měření a zapůjčení vybavení. Velký dík také patří mé rodině za obrovskou mentální podporu v průběhu mého studia.

Anotace

Tato bakalářská práce se zabývá problematikou symetrizace odběru v distribuční soustavě. Na úvodních stránkách je popsána problematika symetrizace odběru elektrické energie, je zde vysvětleno, jak se chovají spotřebiče, které jsou připojeny k nesymetrické soustavě. Dále je podrobně vysvětlen princip výpočtu nesymetrické soustavy, tedy rozkladem na symetrické složky. Další část mé práce se věnuje realizaci měření na laboratorním transformátoru 3,3kVA. Pro simulaci v programu Maxwell 3D jsem vytvořil 3D model laboratorního transformátoru pro možné simulace.

Klíčová slova

Autotransformátor, transformátor, symetrizace, nesymetrie, symetrické složky, simulace, model, Maxwell 3D.

Abstract

This bachelor thesis deals with the issue of the symmetrization of distribution in the electrical network. In the beginning of the thesis the symmetrization of distribution in the electrical network is dealt with. Explained here is the behavior of appliances that are connected to the asymmetric electric system. Hereinafter with the method of decomposition on symmetrical components the principle of calculating an asymmetrical system is explained. The next part of the thesis is dedicated to the practical measurements using a laboratory 3,3kVA transformer. In order to simulate the whole situation in Maxwell 3D software, a 3D model of laboratory transformer was created.

Key words

Autotransformer, transformer, symmetrization, asymmetry, stimulation, model, Maxwell 3D.

Obsah:

| | |
|---|--------|
| Úvod | - 1 - |
| 1 Symetrizace odběru | - 2 - |
| 1.1 Rozklad nesymetrické soustavy na symetrické složky | - 4 - |
| 1.2 Zapojení a hodinové číslo transformátoru | - 6 - |
| 1.2.1 Zapojení do hvězdy | - 7 - |
| 1.2.2 Zapojení do trojúhelníka..... | - 8 - |
| 1.2.3 Zapojení do lomené hvězdy..... | - 9 - |
| 1.3 Nesymetrické zatížení transformátoru | - 10 - |
| 1.3.1 Trojfázový transformátor, jednopólově zatížený | - 15 - |
| 1.3.2 Trojfázový transformátor, dvoupólově zatížený | - 17 - |
| 2 Měření na laboratorním transformátoru | - 20 - |
| 2.1 Symetrizační autotransformátor..... | - 22 - |
| 2.2 Měření hlavního transformátoru naprázdno | - 23 - |
| 2.3 Měření hlavního transformátoru nakrátko | - 25 - |
| 2.4 Měření jednofázové zátěže bez symetrizačního transformátoru, zapojení Y/y- 26 - | |
| 2.5 Měření jednofázové zátěže bez symetrizačního transformátoru, zapojení D/y- 28 - | |
| 2.6 Měření jednofázové zátěže se symetrizačním transformátorem, zapojení D/y- 31 - | |
| 2.7 Použitý přístroj UNI-T UT231 | - 32 - |
| 3 3D model transformátoru..... | - 35 - |
| 4 Analýza shromážděných dat..... | - 38 - |
| 4.1 Měření nakrátko | - 39 - |
| 4.2 Měření naprázdno | - 40 - |
| 4.3 Analýza symetrizace | - 40 - |
| 5 Závěr..... | - 44 - |
| Použitá literatura..... | - 45 - |
| Přílohy | - 47 - |

Seznam obrázků a tabulek:

| | |
|---|--------|
| Obr. č. 1 Vektory nesymetrického napětí | - 2 - |
| Obr. č. 2: Zobrazení sousledné, zpětné a netočivé složky..... | - 4 - |
| Obr. č. 3: Schéma zapojení a vektorový diagram Y_0 | - 7 - |
| Obr. č. 4: Schéma zapojení a vektorový diagram Y_6 | - 7 - |
| Obr. č. 5: Schéma zapojení a vektorový diagram D_{11} | - 8 - |
| Obr. č. 6: Schéma zapojení a vektorový diagram D_1 | - 8 - |
| Obr. č. 7: Schéma zapojení a vektorový diagram Z_{11} | - 9 - |
| Obr. č. 8: Schéma zapojení a vektorový diagram Z_1 | - 9 - |
| Obr. č. 9: Trojfázový transformátor zapojený Yy_0 , jednopólově zatížený | - 10 - |
| Obr. č. 10: Jednopólově zatížený transformátor Yy_0 , řez vinutí..... | - 11 - |
| Obr. č. 11: Transformátor jádrového typu | - 12 - |
| Obr. č. 12: Transformátor plášťového typu | - 13 - |
| Obr. č. 13: Magnetická tok uzavírající se přes nádobu transformátoru jádrového typu. - 14 - | |
| Obr. č. 14: Náhradní schéma transformátoru, jednopólově zatíženého..... | - 15 - |
| Obr. č. 15: Trojfázový transformátor zapojený Yy_0 , dvoupólově zatížený | - 17 - |
| Obr. č. 16: Náhradní schéma transformátoru, jednopólově zatíženého..... | - 18 - |
| Obr. č. 17 symetrizační autotransformátor | - 20 - |
| Obr. č. 18 hlavní transformátor 20kVA..... | - 21 - |

| | |
|--|--------|
| Obr. č. 21 Zapojení symetrizačního TR. | - 23 - |
| Obr. č. 22 Hlavní transformátor naprázdno | - 23 - |
| Obr. č. 23 Fázorový diagram pro TR naprázdno | - 24 - |
| Obr. č. 24 Hlavní transformátor nakrátko..... | - 25 - |
| Obr. č. 25 Fázorový diagram pro TR nakrátko..... | - 26 - |
| Obr. č. 26 Hlavní transformátor Y/y s 1f zátěží | - 27 - |
| Obr. č. 27 Fázorový diagram pro TR Y/y | - 28 - |
| Obr. č. 28 Hlavní transformátor D/y s 1f zátěží | - 29 - |
| Obr. č. 29 Fázorový diagram pro TR D/y | - 30 - |
| Obr. č. 30 Hlavní transformátor se symetrizačním autotransformátorem | - 31 - |
| Obr. č. 31 Fázorový diagram pro TR D/y se symetrizačním TR | - 32 - |
| Obr. č. 32 Princip Hallova jevu | - 33 - |
| Obr. č. 33 vnitřní zapojení klešťového přístroje..... | - 34 - |
| Obr. č. 34 Transformátor 3,3kVA | - 35 - |
| Obr. č. 35 3D model v prostředí Maxwell 3D..... | - 36 - |
| Obr. č. 36 Sekce vinutí 3D modelu | - 36 - |
| Obr. č. 37 Vstupní napětí do primárního vinutí..... | - 37 - |
| Obr. č. 38 Rozložení magnetické indukce v jádře TR..... | - 37 - |
| Obr. č. 39 Rozložení magnetické indukce v jádře TR..... | - 38 - |
| Obr. č. 40 Porovnání fázorových diagramů..... | - 42 - |
| Obr. č. 41 zapojení symetrizačního TR 2 | - 43 - |
| | |
| Tab. č. 1 štítkové hodnoty hlavního TR 20 kVA..... | - 21 - |
| Tab. č. 2 Štítkové hodnoty symetrizačního TR | - 22 - |
| Tab. č. 3 Naměřené hodnoty naprázdno | - 24 - |
| Tab. č. 4 Naměřené hodnoty nakrátko..... | - 25 - |
| Tab. č. 5 Naměřené hodnoty hlavní TR-Y/y-prim. | - 27 - |
| Tab. č. 6 Naměřené hodnoty hlavní TR-Y/y-sek..... | - 27 - |
| Tab. č. 7 Naměřené hodnoty hlavního TR-D-prim. | - 29 - |
| Tab. č. 8 Naměřené hodnoty hlavního TR-D-sek..... | - 30 - |
| Tab. č. 9 Naměřené hodnoty hlavního TR se symetrizačního TR-prim..... | - 31 - |
| Tab. č. 10 Naměřené hodnoty hlavního TR se symetrizačním TR-sek. | - 32 - |
| Tab. č. 11 Naměřené a dopočtené hodnoty, nakrátko | - 39 - |
| Tab. č. 12 Naměřené a dopočtené hodnoty, naprázdno..... | - 40 - |
| Tab. č. 13 Naměřené a dopočtené hodnoty, bez symetrizace..... | - 41 - |
| Tab. č. 14 Naměřené a dopočtené hodnoty, se symetrizací..... | - 41 - |

Seznam použitých značek

| Značka | Veličina | jednotky |
|----------------|-----------------------------|--------------|
| a | operátor natočení | [-] |
| a^2 | operátor natočení | [-] |
| $\cos \varphi$ | účinník | [-] |
| k | materiálová konstanta | [-] |
| α | úhel | [°] |
| C | kapacita | [F] |
| L | indukčnost | [H] |
| R | činný odpor | [Ω] |
| x_L | indukční reaktance | [Ω] |
| x_C | kapacitní reaktance | [Ω] |
| Z | impedance | [Ω] |
| r_k | odpor nakrátko | [Ω] |
| x_k | rozptylová reaktance | [Ω] |
| x_0 | netočivá reaktance | [Ω] |
| z_k | impedance nakrátko | [Ω] |
| B | magnetická indukce | [T] |
| Φ | magnetický tok | [Wb] |
| Φ_A | magnetický tok fáze A | [Wb] |
| Φ_B | magnetický tok fáze B | [Wb] |
| Φ_C | magnetický tok fáze C | [Wb] |
| f | frekvence | [Hz] |
| Q | jalový výkon | [VAr] |
| P | činný výkon | [W] |
| S | zdánlivý výkon | [VA] |
| H | intenzita magnetického pole | [A/m] |
| U | elektrické napětí | [V] |
| U_A | napětí fáze A | [V] |
| U_B | napětí fáze B | [V] |
| U_C | napětí fáze C | [V] |

| | | |
|----------|---------------------------|-----|
| U_R | sdužené napětí | [V] |
| U_S | sdužené napětí | [V] |
| U_T | sdužené napětí | [V] |
| U_H | Hallovo napětí | [V] |
| u_2 | činitel nesymetrie napětí | [%] |
| u_2 | činitel nesymetrie proudu | [%] |
| k_{u2} | zpětný činitel nesymetrie | [%] |
| k_{u0} | nulový činitel nesymetrie | [%] |
| I | elektrický proud | [A] |
| I_A | proud fáze A | [A] |
| I_B | proud fáze B | [A] |
| I_C | proud fáze C | [A] |
| I_P | stejnoseměrný proud | [A] |
| I_S | řídící proudu | [A] |
| I_1 | sousledná složka proudu | [A] |
| I_2 | zpětného složka proudu | [A] |
| I_0 | netočivá složka proudu | [A] |

Úvod

V této práci se zabývám problematikou nesymetrického odběru, zejména pak velkou jednofázovou nesymetrickou zátěží. Provedl jsem měření na transformátoru, který jsem nesymetricky jednofázově zatížil a pozoroval jsem vliv této nesymetrie, při dalším měření jsem k tomuto transformátoru připojil symetrizační autotransformátor, po připojení jednofázové zátěže jsem pozoroval, jaký vliv měl připojený autotransformátor oproti předchozímu měření. Dle použitého zapojení se dalo očekávat, že vlivem zapojení autotransformátoru, bude výsledná nesymetrie o něco menší.

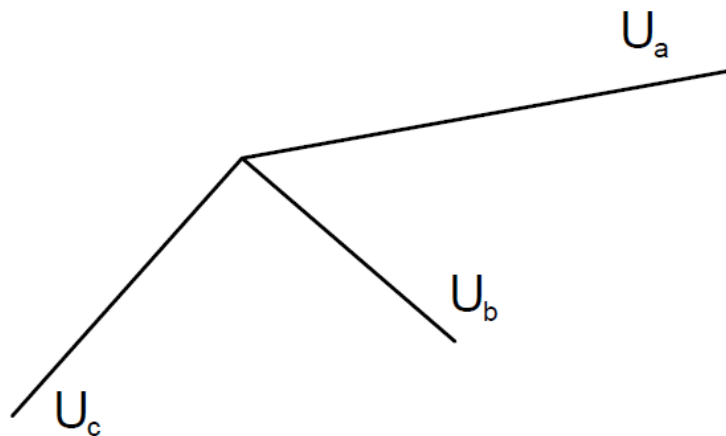
V této práci je uveden podrobný matematický postup při řešení nesymetrických soustav, tyto soustavy se nejčastěji řeší rozkladem nesymetrické soustavy na symetrické složky. Takto nejlépe zjistíme, jak velké proudy tečou v jednotlivých fázích.

Další částí této práce bylo vytvořit 3D model pro simulaci v programu Maxwell 3D, tento model vznikl z přesného odměření, mnou používaného laboratorního transformátoru, z kterého jsem vytvořil 3D model.

1 Symetrizace odběru

Symetrický odběr by se dal definovat jako souměrný energetický systém, kde platí, že trojfázová napětí mají shodnou amplitudu a jsou současně oproti sobě jednotlivé fáze posunuty o 120° . Jestliže nebude splněna jedna ze dvou podmínek, tak nastává nesouměrný stav, tudíž hovoříme o napět'ové nesymetrii, která přímo odpovídá velikosti jednofázové nebo dvoufázové zátěži. Toto nesymetrické zatížení nepříznivě ovlivňuje napájecí síť. Nesymetrie se projevuje tak, že proudy ve fázích si, nejsou rovny:

$I_A \neq I_B \neq I_C$. Proudová nesymetrie dále vede k napět'ové nesymetrii. Z Obr. č. 1 je vidět jak mohou vypadat vektory napět'ové nesymetrie. [9]



Obr. č. 1 Vektory nesymetrického napětí

Toto ovlivňuje soustavu tak, že fáze, které jsou nejvíce zatíženy (kterými protéká největší proud) se nadměrně zahřívají a dochází ke zvětšenému tepelnému namáhání izolace, zkracuje se životnost izolace. Nesymetrie bude dále nepříznivě ovlivňovat chod zařízení připojených na tuto síť.

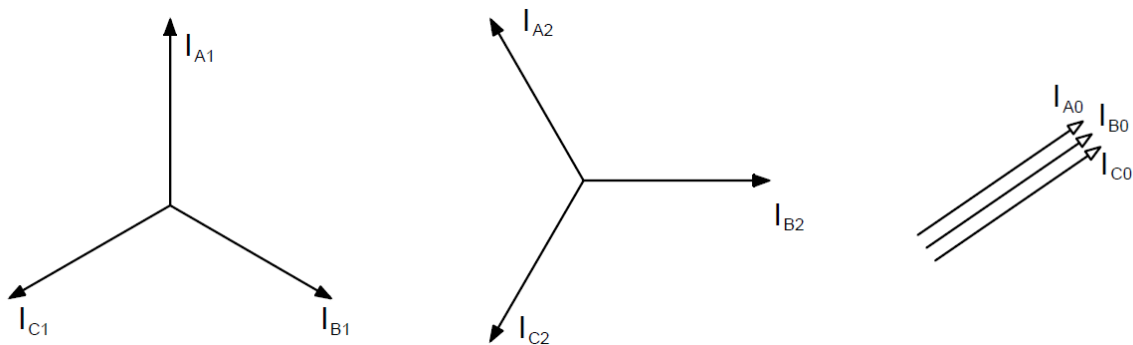
V případě, že bude napájen transformátor z nesymetrické sítě, tak bude docházet k transformaci sousledné složky napětí, ale i k transformaci zpětné složky, což je nechtěné, protože vliv zpětné složky nám bude ovlivňovat velikost přenášeného výkonu. Pro transformaci nulové složky bude záležet na druhu zapojení transformátoru, jestli bude zapojen do trojúhelníku, do hvězdy či do lomené hvězdy (složky napětí a zapojení transformátoru bude probráno dále). Při zapojení transformátoru v provozu se musí nastavit ochrany, které reagují na celkový proud. Ten je složen ze všech složek, sousledné, zpětné a netočivé. Proto je podstatné zapojení a vliv nesymetrie sítě pro správné nastavení ochran. Někdy se udává u transformátorů činitel snížení zatížení s ohledem na nesymetrii.[9]

Samozřejmě nás vliv nesymetrie zajímá i u točivých strojů. Ta se zde projevuje ještě ve větším měřítku. Dochází ke změně kruhového magnetického pole na eliptické magnetické pole, zde se opět negativně projevuje zpětná složka, která vyvolává brzdny moment, tím klesá točivý moment. U některých motorů, může nesymetrie jednotek % způsobit, že výstupní jmenovité hodnoty motoru budou sníženy až o 10%. Podle studie: [Stier J.: Die elektrische Maschine am unsymmetrischen Mehrphasensystem, ETZ A 11/53] může napěťová nesymetrie 4% způsobit zkrácení životnosti asynchronního motoru na polovinu. U větších a drahých motorů se používají ochrany proti nesymetrii, a to takové, že při velké jednofázové zátěži dojde k odpojení stroje, aby nedošlo k jeho destrukci. Nesymetrie dále vede k mechanickému namáhání stroje, což se projevuje vibracemi stroje. Vibrace ovlivňují uložení stroje v ložiscích. I zde je ovlivněno vinutí stroje a to jak statorové tak i rotorové vinutí, dochází zde k tepelnému namáhání a tudíž k tepelnému stárnutí stroje i zde je toto způsobeno vlivem zpětné složky. Toto je asi nejzásadnější problém, aby nedošlo k poškození stroje, je nutné buď snížit odebíraný výkon stroje, to skoro není v praxi realizovatelné. Proto se musí zvolit motor s vyšším jmenovitým výkonem a tudíž motor předdimenzujeme, což vede ke zvýšení nákladů na pořízení motoru.

Samotná nesymetrie může nastat již při výrobě elektrické energie a to tak, že bude špatně vyroben generátor, bude tedy vyroben nesymetricky. Toto se samozřejmě dnes již takřka nemůže stát, protože dnešní výrobní procesy jsou velice kvalitní a samotný generátor je podroben zkouškám, které ověří funkčnost a správnost vyrobeného generátoru. Generátory dnes generují čistě harmonické napětí dle stanovených norem. Toto se mohlo stát dříve u výroby generátorů, která nebyla na takové úrovni, jako je dnes. Tato nesymetrie mohla nastat vlivem špatného (nekvalitního) opracování komponentů nebo špatné jakosti těchto komponentů. Bohužel dnes se s nesymetrií setkáváme u fotovoltaických zařízení, kde se využívají polovodičové střídače energie. Polovodičový střídač působí na síť jako velká impedance, mají malý zkratový výkon a to vede k vzniku nesymetrie. Takto vzniklá nesymetrie je v podstatě zanedbatelná oproti nesymetrii, která vzniká nevhodným zapojením zátěže v odběrných místech.[10] [15]

1.1 Rozklad nesymetrické soustavy na symetrické složky

Trojfázové soustavy s nesymetrickou zátěží se dají nejlépe řešit pomocí známého rozkladu nesymetrické soustavy proudů na symetrické složky. **Souslednou** I_1 , **zpětnou** I_2 a **netočivou** (nulovou) I_0 . Základní grafické zobrazení těchto složek je na Obr. č. 2. Každá z těchto složek má frekvenci základní harmonické, u nesymetrické zátěže transformátoru platí, že sousledná a zpětná složka mají stejnou rozptylovou reaktanci. Jejich rozptylová reaktance je shodná, protože se vinutí a magnetický obvod u transformátoru nepohybují.



Obr. č. 2: Zobrazení sousledné, zpětné a netočivé složky

Netočivá soustava je tvořena soustavou veličin základní frekvence, to znamená, že mají v každém okamžiku stejnou fázi a velikost, jsou to konfázní veličiny. Tato netočivá složka má špatný vliv na samotný chod transformátoru, spolu se zpětná složkou zhoršuje provoz transformátoru.[7]

Pro řešení symetrických složek se nejčastěji využívá Fourtescueho matice, která využívá symetrických složek. U této metody si zvolíme referenční fázi, pro kterou provedeme výpočty, ostatní fáze se poté přepočítají. Přepočítají se tak, že fázi otočíme o 120° a poté 240° pro poslední fázi. Provedeme rozklad na symetrické složky, kde sousledná složka má stejný sled fází jako původní soustava, oproti tomu zpětná složka má opačný sled fází než původní soustava. Netočivá složka je specifická v tom, že má nulový úhel mezi fázory.[1]

Pro matematický zápis rozložení platí:

$$\bar{I}_A = \bar{I}_{A1} + \bar{I}_{A2} + \bar{I}_{A0} \quad (1)$$

$$\bar{I}_B = \bar{I}_{B1} + \bar{I}_{B2} + \bar{I}_{B0} \quad (2)$$

$$\bar{I}_C = \bar{I}_{C1} + \bar{I}_{C2} + \bar{I}_{C0} \quad (3)$$

Ted' si musíme zvolit fázi, pro kterou se budou provádět výpočty, pro fázi A platí:

$$\bar{I}_a = \bar{I}_1 + \bar{I}_2 + \bar{I}_0 \quad (4)$$

$$\bar{I}_b = \bar{a}^2 \bar{I}_1 + \bar{a} \bar{I}_2 + \bar{I}_0 \quad (5)$$

$$\bar{I}_c = \bar{a}\bar{I}_1 + \bar{a}^2\bar{I}_2 + \bar{I}_0 \quad (6)$$

Symboly \bar{a}^2 a \bar{a} nám označují natočení fáze o 120° a 240° :

$$\bar{a} = e^{j120^\circ} = -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2} \quad (7)$$

$$\bar{a}^2 = e^{j240^\circ} = -\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2} \quad (8)$$

Už podle názvu této metody nám napovídá, že se tato problematika bude řešit v maticovém tvaru:

$$\mathbb{I} = \mathbb{I}_s * \mathbb{F}_s; \quad \mathbb{I} = \begin{bmatrix} \bar{I}_A \\ \bar{I}_B \\ \bar{I}_C \end{bmatrix}; \quad \mathbb{I}_s = \begin{bmatrix} \bar{I}_1 \\ \bar{I}_2 \\ \bar{I}_0 \end{bmatrix}; \quad \mathbb{F}_s = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ \bar{a}^2 & \bar{a} & 1 \\ \bar{a} & \bar{a}^2 & 1 \end{bmatrix};$$

$$\mathbb{I}_s = \mathbb{F}_s^{-1} * \mathbb{I}; \quad \mathbb{F}_s^{-1} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & \bar{a}^2 & \bar{a} \\ 1 & \bar{a} & \bar{a}^2 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

Nyní již můžeme rozepsat výsledný tvar rovnic pro jednotlivé symetrické složky:

$$\bar{I}_1 = \frac{1}{3}(\bar{I}_a + \bar{a}\bar{I}_b + \bar{a}^2\bar{I}_c) \quad (9)$$

$$\bar{I}_2 = \frac{1}{3}(\bar{I}_a + \bar{a}^2\bar{I}_b + \bar{a}\bar{I}_c) \quad (10)$$

$$\bar{I}_0 = \frac{1}{3}(\bar{I}_a + \bar{I}_b + \bar{I}_c) \quad (11)$$

Takto upravené rovnice samozřejmě platí analogicky i pro napěťové rovnice.[10]

Aby se dalo posuzovat velikost nesymetrie, tak je potřeba zvolit určitý parametr. Tento parametr můžeme najít v podnikových normách PNE 33 3430-3ed.3, které jsou v souladu s českými normami ČSN EN 61000-4-27 a ČSN EN 61000-4-30. V těchto normách je parametr určující činitel nesymetrie napětí u_2 , velikost tohoto napětí je dán jako podíl absolutní hodnoty zpětné složky napětí a absolutní hodnoty sousledné složky napětí základního kmitočtu:

$$u_2 = \frac{|U_2|}{|U_1|} * 100 \quad (12)$$

Stejný vztah bude platit i pro činitel nesymetrie proudu i_2 :

$$i_2 = \frac{|I_2|}{|I_1|} * 100 \quad (13)$$

Dále v těchto normách můžeme nalézt **zpětný činitel nesymetrie** $k_{u2} = U_2/U_1$, který je obdobou rovnice (12).

Nulový činitel nesymetrie se určuje jako poměr nulové složky napětí a sousledné složky napětí $k_{u0} = U_0/U_1$. Ve vedení zabraňují šíření nulové složky napětí transformátory, které mají zapojené vinutí do trojúhelníka. [13] [14] [15]

Z normy ČSN EN 50160 ed. 3 víme, že pro dodávku elektrické energie v nn, vn a vvn platí: za standardních provozních podmínek musí být v týdenním období 95% 10 minutových středních efektivních hodnot U_2 složky napájecího napětí v rozsahu 0 až 2 % U_1 .

Ve speciálních případech může být nesymetrie ve trojfázových předávacích místech do 3%. Velikost nesymetrie nepříznivě (snižuje) celkovou účinnost. [12]

1.2 Zapojení a hodinové číslo transformátoru

Pro pochopení dalšího textu je nezbytně nutné, aby bylo podrobně vysvětleno možné zapojení transformátoru a jeho hodinové číslo. Samotné zapojení transformátoru bude mít vliv na celkovou nesymetrii. Tento vliv zapojení se budu snažit realizovat na laboratorním transformátoru.

V případě, že se budeme bavit o dvouvinutových transformátorech, tak je možné je zapojit až 36 způsoby (6x na primární straně a 6x na sekundární straně), je jasné, že ne každé zapojení transformátoru je vhodné, vždy si musíme uvědomit vlastnosti zapojení, pro daný účel. Jedním z kritérií, které zejména rozhoduje při paralelním chodu, je fázové natočení vektorů napětí strany výstupní vzhledem ke straně vstupní. To se vyjadřuje takzvaným hodinovým číslem (úhlem). Hodinové číslo náleží každé kombinaci zapojení, každou kombinaci odpovídají alespoň 3 různá hodinová čísla, některým zapojením odpovídá dokonce 6 hodinových čísel.

Dle norem se v literatuře pro značení zapojení transformátoru používají dvě písmena případně i dvě číslice, které značí hodinový úhel. První velké písmeno nám říká jak je zapojena strana vyššího napětí, z toho vyplývá, že druhé malé písmeno nám značí zapojení na straně nižšího napětí. U dvouvinutového transformátoru se setkáváme s písmeny:

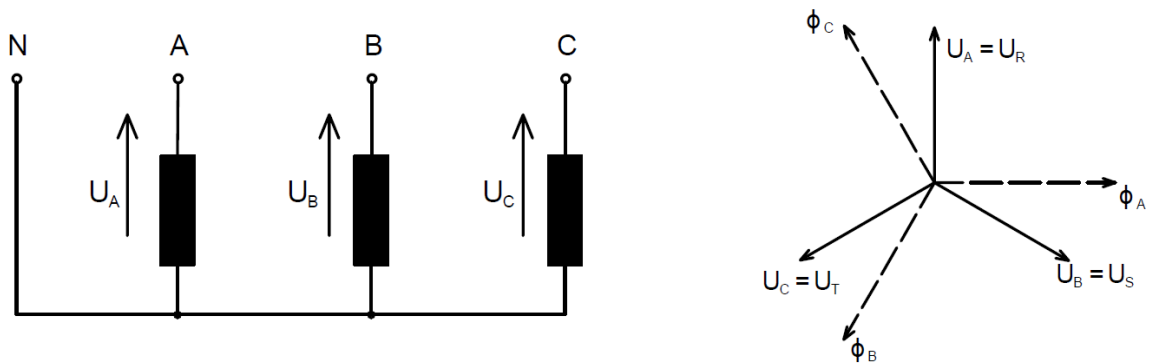
- 1) Y, y - označení pro zapojení do hvězdy (Obr. č. 3)
- 2) D, d - označení pro zapojení do trojúhelníka (Obr. č. 5)
- 3) Z, z - označení pro zapojení do lomené hvězdy (Obr. č. 7)

Takto se používá značení písmeny, číslice nám udávají zpoždění fáze nižšího napětí za stejnou fází vyššího napětí. Hodinové číslo je to proto, že se toto zpoždění udává v hodinách, které přímo odpovídají úhlu zpoždění. Toto určování odpovídá hodinovému ciferníku, tudíž jedna hodina odpovídá 30° . Hodinové číslo se udává od 0 do 11 hodin. Takovéto značení je umožněno tím, že u trojfázového transformátoru jde vždy o zpoždění, které je násobkem 30° , což odpovídá 1 hodině. V literatuře se používá značení svorek A, B, C na straně vyššího napětí, a, b, c na straně nižšího napětí. Pro svorky uzlů vinutí se používá N, n. [7]

Z teorie je patrné, že lichá hodinová čísla budou odpovídat zapojení, kde jedno z vinutí bude zapojené do trojúhelníka a to druhé do hvězdy nebo do lomené hvězdy. A sudá hodinová čísla budou u zapojení, kde obě zapojení budou do hvězdy nebo obě do trojúhelníka případně vinutí na straně vyššího napětí bude zapojené do trojúhelníka a na straně nižšího napětí do lomené hvězdy. [3]

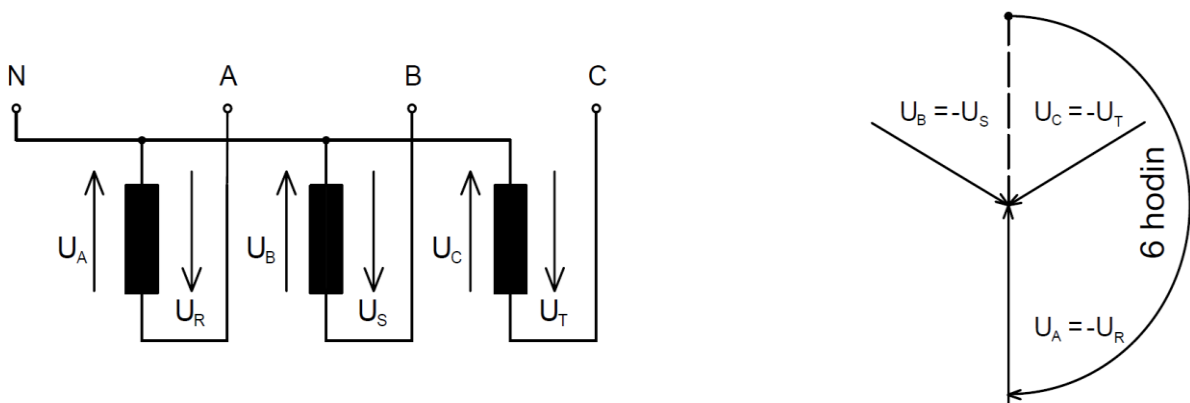
1.2.1 Zapojení do hvězdy

Budeme předpokládat trojfázový magnetický obvod transformátoru, buzený ze sítě, tak že vektory magnetického toku Φ_A , Φ_B , Φ_C tvoří symetrickou hvězdicí. Pro zapojení budeme předpokládat, že vinutí má stejný smysl. Základním zapojením do hvězdy je na obr. 3, z vektorového diagramu je zřejmé, že se zde jedná o zapojení s 0 úhlem natočení. Toto zapojení se značí $Y0$, $y0$.



Obr. č. 3: Schéma zapojení a vektorový diagram $Y0$

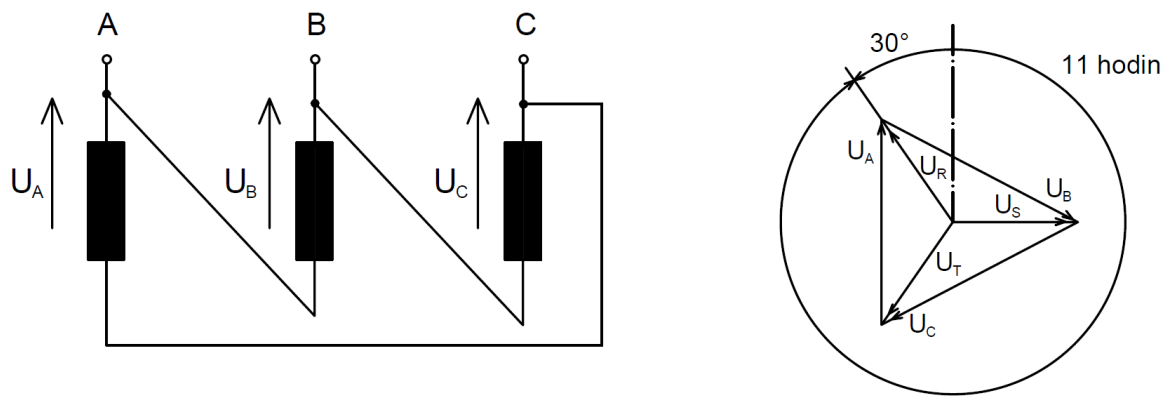
Další zapojení je znázorněno na Obr. č. 4, jedná se opět o zapojení do hvězdy. Oproti předchozímu zapojení je patrné zaměnění síťových svorek u jednotlivých fází, tato záměna vede k otočení směru fázových napětí, jako vektory síťových napětí U_R , U_S , U_T jsou pootočený o 180° , což odpovídá 6 hodinám, proto tomuto zapojení odpovídá značení $Y6$ [1]



Obr. č. 4: Schéma zapojení a vektorový diagram $Y6$

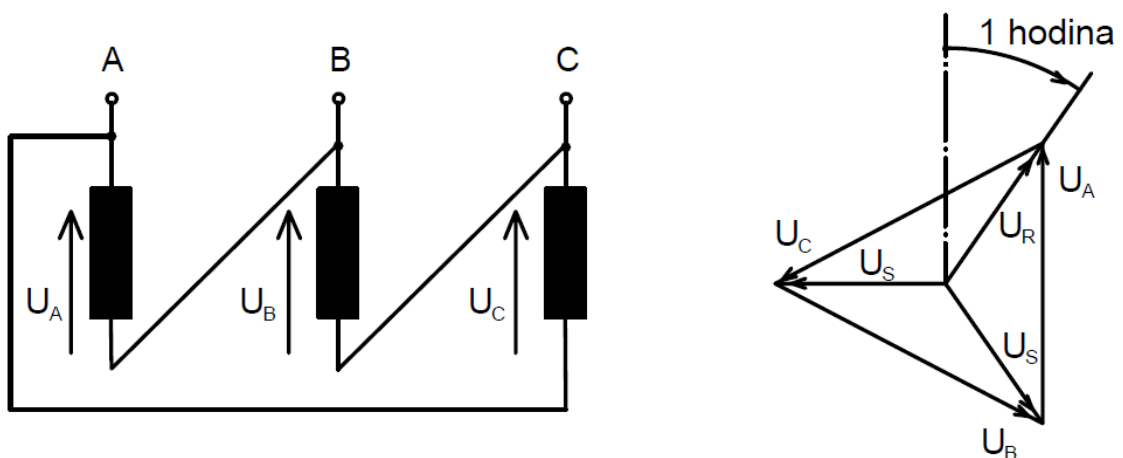
1.2.2 Zapojení do trojúhelníka

V tomto zapojení se objevují sdružená napětí U_A, U_B, U_C , indukovaná v jednotlivých fázích. V případě, že doplníme do vektorového diagramu sdružených napětí, fázové napětí U_R, U_S, U_T , hvězdy z obr. 3, tak můžeme porovnat jejich směr se směrem fázových napětí ze zapojení do hvězdy. Touto metodou vložení fázových napětí a následným porovnání dospějeme k hodinovému úhlu, který je roven 11 hodinám (330°), proto budeme toto zapojení značit D11. Toto zapojení je na Obr. č. 5



Obr. č. 5: Schéma zapojení a vektorový diagram D11

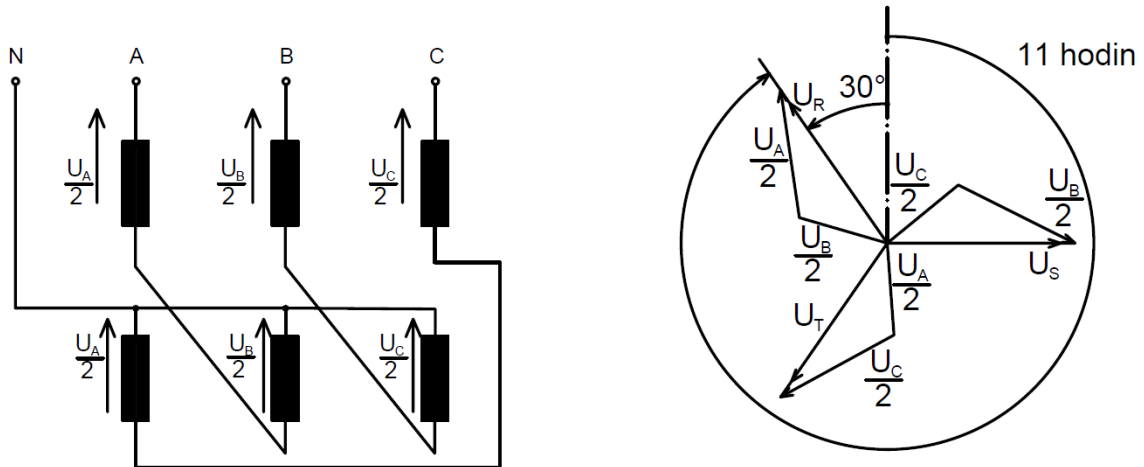
Další možnou variantou zapojení do trojúhelníka je na Obr. č. 6, toto zapojení je velice podobné předchozímu zapojení, jen se změnil směr zapojení. Tato změna vede k tomu, že už se nejedná o zpoždění 11 hodin, ale pouze 1 hodiny. Takto zapojené schéma značíme D1. [1]



Obr. č. 6: Schéma zapojení a vektorový diagram D1

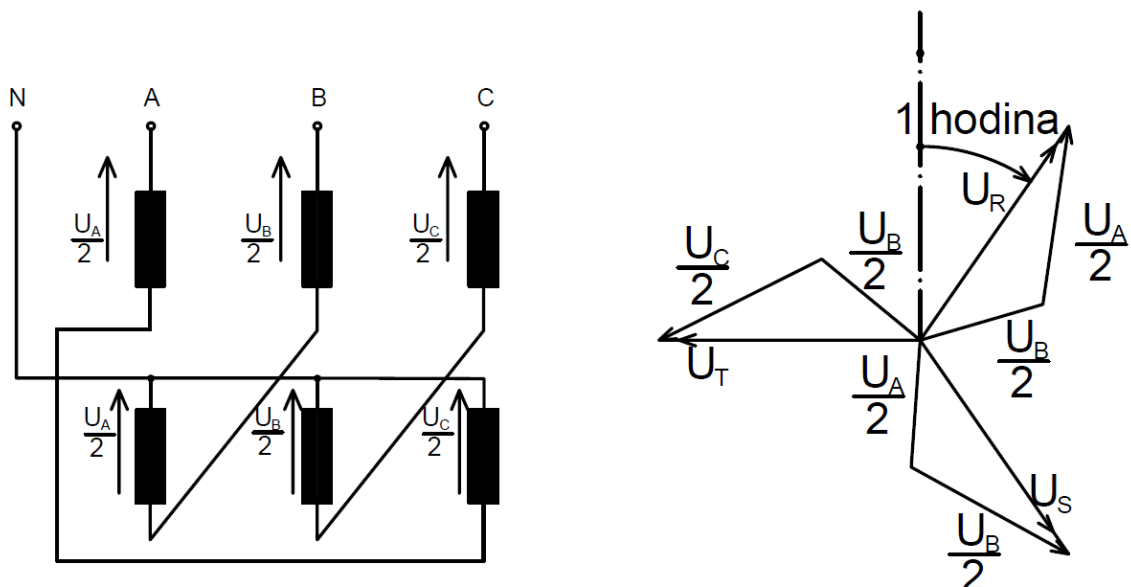
1.2.3 Zapojení do lomené hvězdy

Z vektorového diagramu na Obr. č. 7 a na Obr. č. 8 je víc než patrné, proč se tomuto zapojení říká do lomené hvězdy. U lomené hvězdy je rozdělené vinutí na poloviny, po zapojení dochází k tomu, že se propojí každá „půl fáze“ s „půl fází“ předchozí ($\frac{U_A}{2}$ a $\frac{U_B}{2}$). Pro určení hodinového čísla postupujeme stejnou metodou jako u předchozích případů. Proto není složité určit, že na Obr. č. 7 je hodinové číslo 11 hodin a značí se Z11.



Obr. č. 7: Schéma zapojení a vektorový diagram Z11

Na Obr. č. 8 je opačný případ tohoto zapojení a tudíž mu odpovídá hodinové číslo 1 hodina, tomuto zapojení odpovídá Z1. [1]

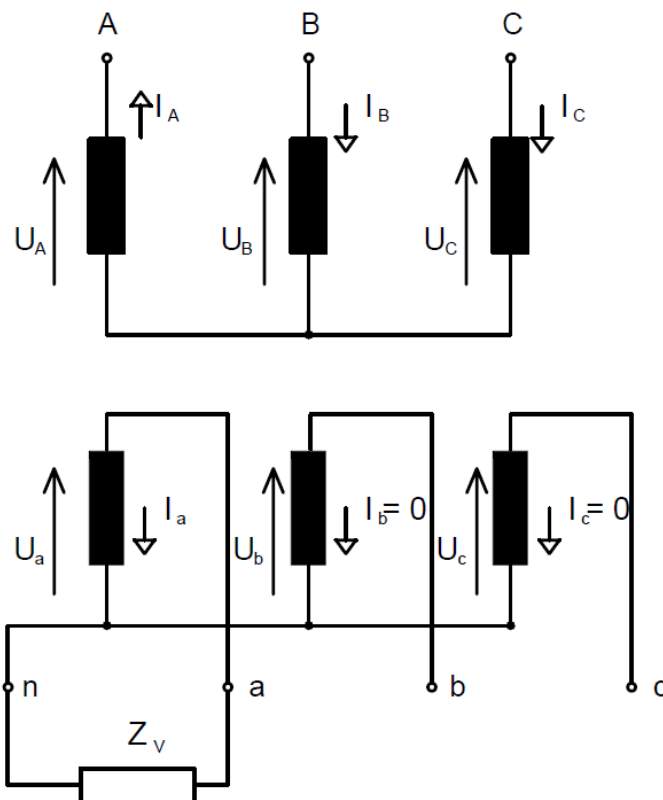


Obr. č. 8: Schéma zapojení a vektorový diagram Z1

1.3 Nesymetrické zatížení transformátoru

Transformátory, které pracují v energetické soustavě jsou napájeny téměř souměrným napětím, dle normy nesmí překročit vektor zpětné a netočivé složky 2%. Proto nás bude zajímat způsob zatížení transformátoru, v některých případech není možné zatížit transformátor symetrickou zátěží. S tímto problémem se nejčastěji setkáváme u elektrické trakce a u elektrických indukčních pecí. V těchto případech se jedná zejména o velkou jednofázovou zátěž, tato jednofázová zátěž vyvolá velkou proudovou nesymetrii. Jak již bylo dříve vysvětleno v kapitole 1.1, tato nesymetrie se bude řešit rozkladem na symetrické složky.

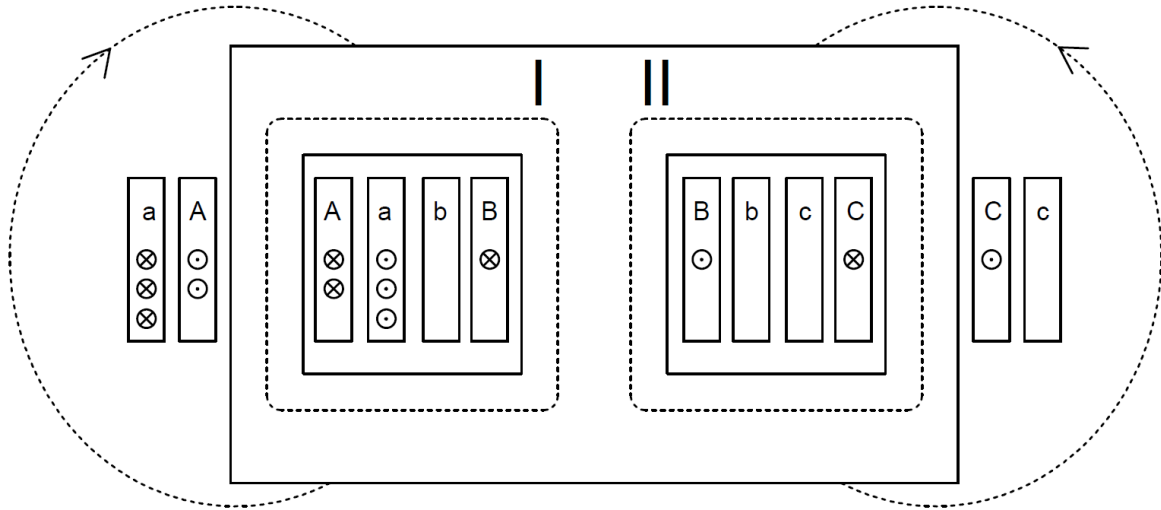
Pro pochopení nesymetrického zatížení použijeme transformátor s jednopólovým zatížením ve spojení do $Yy0$, toto zapojení je na Obr. č. 9. U tohoto zapojení budeme pro názornost postupovat bez rozkladu na symetrické složky, při takovém to postupu nelze zapojení podrobně analyzovat. Nelze zjistit velikost napětí jednotlivých fází. Tuto variantu jsem zvolil pro její názornost a početní jednoduchost. Pro zjednodušení budeme počítat s poměrnými hodnotami, abychom nemuseli uvažovat převodový poměr. [7]



Obr. č. 9: Trojfázový transformátor zapojený $Yy0$, jednopólově zatížený

Podle schéma zapojení na Obr. č. 9 a dle řezu vinutí na Obr. č. 10 bude platit pro proudy na primární straně podle 1. Kirchhofova zákona:

$$i_A = i_B + i_C \quad (14)$$



Obr. č. 10: Jednopolově zatížený transformátor Yy0, řez vinutí

V případě, že zanedbáme magnetizační proud, tak musí být výsledné magnetické napětí na uzavřené dráze nulové (indukční čáry jsou vyznačeny na Obr. č. 10). Proto platí rovnice:

$$i_a - i_A - i_B = 0 \quad (15)$$

$$i_B - i_C = 0 \quad (16)$$

Z těchto jednoduchých rovnic ihned vidíme, že v poslední rovnici se proudy rovnají, po jednoduché úvaze vidíme, že všechny proudy můžeme vyjádřit pomocí proudu i_a , dostaneme tedy:

$$i_B = i_C = \frac{i_a}{2} = \frac{i_A}{3} \quad (17)$$

Dále nás bude zajímat velikost výsledného magnetického napětí na jednotlivých sloupcích (jádrech). To velice jednoduše vyjádříme z předchozích rovnic:

$$i_a - i_A = \frac{i_a}{3} = i_B = i_C \quad (18)$$

Z rovnice (18) vidíme, že magnetické napětí na všech sloupcích bude shodné, bude rovno jedné třetině zatěžovacího jednopólového proudu. Magnetický tok odpovídající tomuto proudu se uzavírá mimo feromagnetický obvod transformátoru. Tím vzniklý úbytek napětí deformuje hvězdu vektorů fázových napětí. Na Obr. č. 9 je vidět velikost a směr proudů, které odpovídají výše zmiňovaným rovnicím. Polarita proudu je vyznačena pro půlperiodu střídavého proudu.

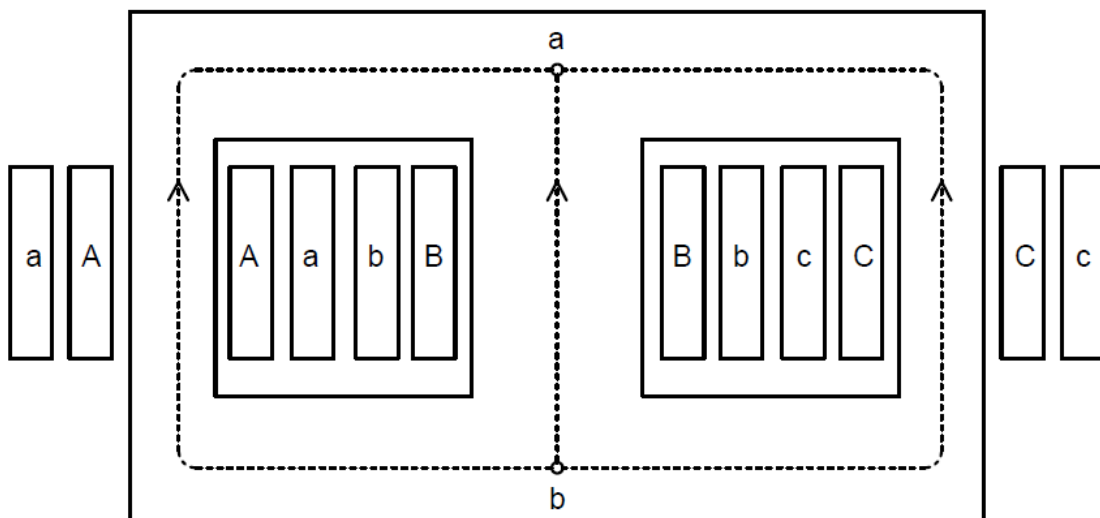
Tento postup řešení byl bez použití rozkladu na symetrické složky, samozřejmě šlo pouze o názornou ukázkou možného obecného postupu, než budu řešit nesymetrickou zátěž rozkladem na symetrické složky, tak si musíme uvědomit, že velkou roli hraje samotné zapojení transformátoru (Y, D, Z), popřípadě i jeho hodinové číslo. Výše v textu bylo zmíněno jádro transformátoru, a proto nás bude zajímat i konstrukční řešení samotného transformátoru, zejména pak jeho magnetický obvod nebo i nádoba, ve které je uložen. [3]

Pro symetrickou proudovou soustavu platí pro impedanci nakrátko:

$$z_k = r_k + jx_k \quad (19)$$

$$z_k = \sqrt{r_k^2 + x_k^2} \quad (20)$$

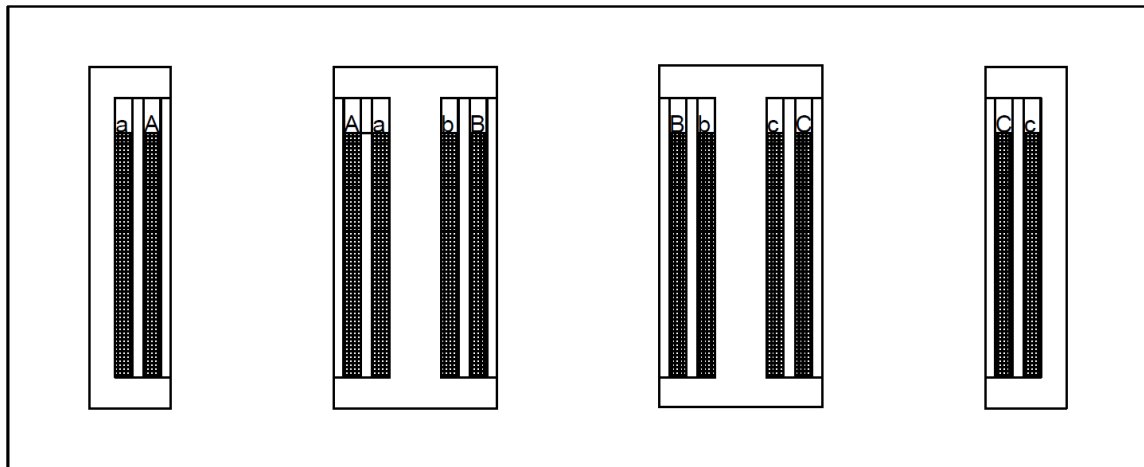
Tato impedance je dána rozptylovou reaktancí a odporem r_k . V symetrické soustavě platí, že magnetické toky, které jsou vybuzeny proudy ve všech fázích, probíhají kanály mezi oběma vinutími a magnetické toky v prostoru spojek se vzájemně kompenzují. V tomto případě poté nezávisí na způsobu zapojení. Tato samá úvaha bude platit i pro zpětnou složku, proto velikost rozptylové reaktance x_k , má stejnou velikost jako pro souslednou složku. U netočivé složky jsou vektory proudů stejně velké a stejného směru (tudíž i okamžité hodnoty se rovnají), zde si musíme uvědomit, o jakou konstrukci transformátoru jde, protože pokud proud netočivé složky prochází vinutím trojfázového transformátoru jádrového typu Obr. č. 11, pak se budou magnetovat všechna jádra transformátoru souhlasně. [2][7]



Obr. č. 11: Transformátor jádrového typu

Proto se magnetický tok bude muset uzavírat z části olejem a z části nádobou, ve které je, to je patrné z obrázku Obr. č. 13 (pochopitelně se bude jednat o transformátor ponořený do

oleje), tudíž se magnetický tok neuzavírá přes feromagnetický obvod transformátoru, proto bude netočivá reaktance $x_0 \ll x_k$. Samozřejmě jde-li o jádrový transformátor.

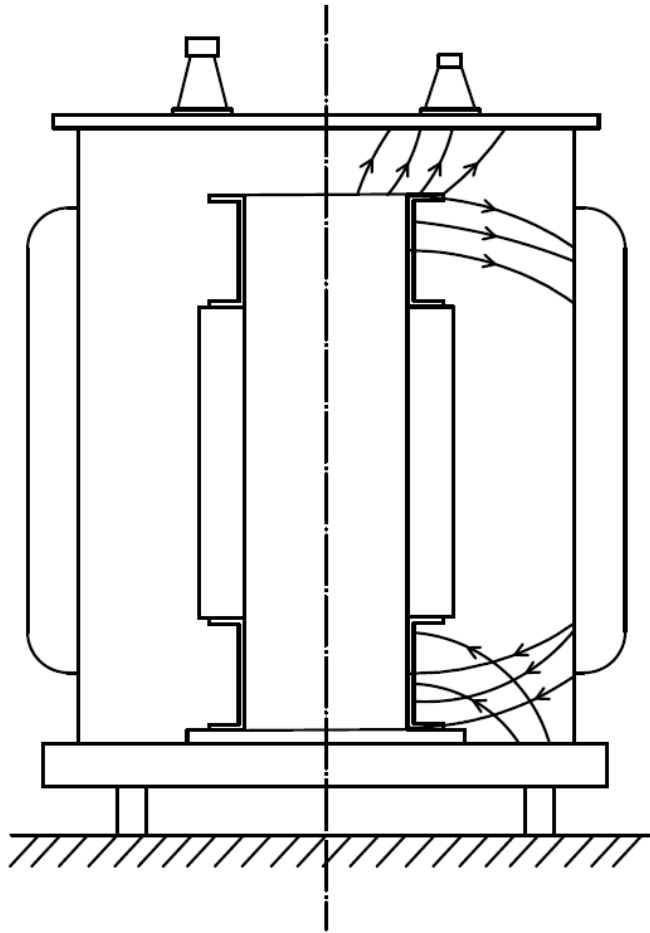


Obr. č. 12: Transformátor plášťového typu

Situace bude podstatně odlišná, když půjde o plášťový transformátor Obr. č. 12, zde se může magnetický tok netočivé složky uzavírat pláštěm magnetického obvodu, tudíž s mnohem menším magnetickým odporem, než tak bylo u jádrového transformátoru. Toto zjištění znamená, že netočivá reaktance a magnetizační reaktance budou řádově stejné. [2] [5]

Zde bylo názorně poukázáno na vliv samotného konstrukčního provedení transformátoru, nyní se budeme zabývat, jaký vliv bude mít zapojení transformátoru. Budeme-li chtít, aby transformátorem procházel proud netočivé složky, tak musíme zajistit, aby nulový bod (uzel) byl vyveden z transformátoru a musíme ho vodičově spojit se zdrojem buď nulovým vodičem, nebo zemí. Nebude-li toto dodrženo, tak nemůže téct proud netočivé složky, proto je pouze možné, aby proud netočivé složky procházel vinutími, která jsou spojena do Y nebo do Z. Do D nemůže procházet proud netočivé složky, protože nemá nulový bod. U zapojení do Y nastává tzv. jednosměrná magnetizace, která je ukázána na Obr. č. 13. Naprosto odlišná situace nastává u zapojení do Z, kde není možné, aby byla vytvořena jednosměrná magnetizace, protože vinutí na každém jádře je rozděleno na poloviny, a proto se magnetické účinky vzájemně kompenzují, viz Obr. č. 7. Netočivá reaktance vinutí u zapojení do lomené hvězdy je poměrně malá a odpovídá pouze malým lokálním magnetickým tokům mezi vinutími v každé fázi. U vinutí do trojúhelníka nevznikají proudy netočivé složky po připojení nesymetrické zátěže, ale mohou se vyskytnout díky indukční vazbě z dalšího vinutí zapojeného do Y, které je zatížené proudy netočivé složky. Spojení do D je z hlediska proudu spojení nakrátko, tudíž do něho indukované napětí je nulové (mimo malé úbytky). Z toho plyne, že musí být i nulový indukující magnetický tok. Toto je možné pouze, když jsou

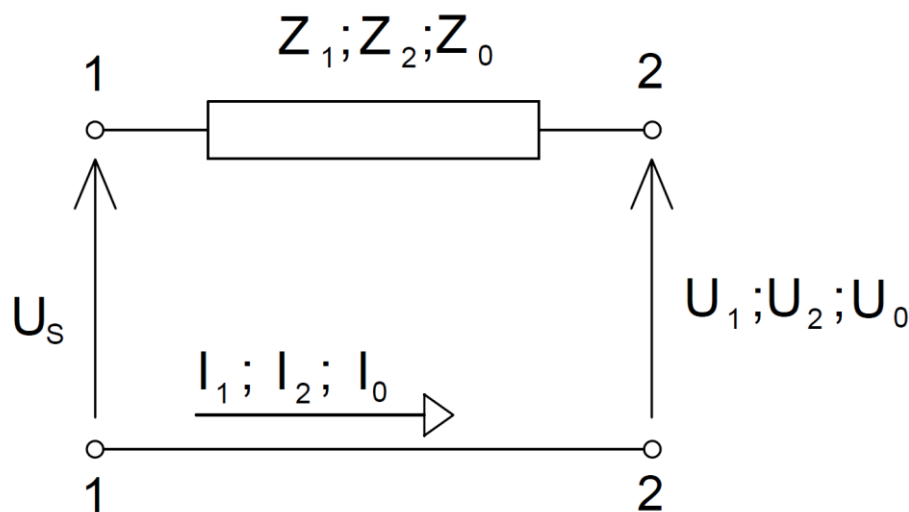
proudy netočivé složky ve vinutí do D kompenzovány budícími proudy z vinutí do Y. V tomto případě bude magnetický tok netočivé složky procházet kanály mezi vinutími, netočivá reaktance x_0 bude přibližně stejná jako x_k . Vlastnost spojení do D kompenzovat jednosměrnou magnetizaci je velmi užitečná, proto se této vlastnosti snažíme využívat. Samozřejmě není vždy možné volit jedno z vinutí v zapojení do D, proto se zejména pro transformátory velkých výkonů spojených do Yy, využívá terciálního (třetího) vinutí, toto vyrovnávací vinutí je zapojené do trojúhelníka. Toto terciální vinutí se někdy ani nevyvádí na svorky, transformátoru. [7]



Obr. č. 13: Magnetická tok uzavírající se přes nádobu transformátoru jádrového typu

Je jasné vidět, že zapojení transformátoru do D zmenšuje velkou netočivou reaktanci x_0 , čímž se kompenzuje nechtěná jednosměrná magnetizace. Podobného stavu by se dalo docílit u zapojení do Y, kde by bylo výstupní vinutí zapojené do Y a spojeno s nulovým vodičem sítě, pokud by procházely proudy netočivé složky tímto vodičem, pak by docházelo k jisté kompenzaci jednosměrné magnetizace. Takto vytvořené zapojení stejně nemá takové kompenzační účinky jako zapojení do D.

Je patrné, že na velikosti jednosměrné magnetizace má velký vliv zapojení transformátoru, velikost této magnetizace se snažíme co nejvíce snižovat, protože při velké jednosměrné magnetizaci vznikají značné ztráty výkonu což vede k nežádoucímu oteplení, s kterým se při konstrukci chlazení nepočítalo, toto samozřejmě snižuje i samotou účinnost transformátoru. Tyto ztráty vznikají při průchodu magnetických toků skrz masivní konstrukční prvky, jde o nádobu transformátoru a stahovací svorky konstrukce transformátoru. Jednosměrná magnetizace způsobuje velké úbytky napětí na velké netočivé reaktanci x_0 , tyto úbytky mění výsledný tvar vektorů fázových napětí. Nastane to, že v jedné fázi bude zvýšené napětí a v další bude snižené napětí. [7]



Obr. č. 14: Náhradní schéma transformátoru, jednopólově zatíženého

1.3.1 Trojfázový transformátor, jednopólově zatížený

Výše popsané vlastnosti budou více patrné z příkladu zapojení trojfázového jádrového transformátoru s jednopólovou zátěží, zapojeného Yy0 dle Obr. č. 9. Bude nás zajímat velikost proudu I_a a napětí na fázích U_a , U_b , U_c . Budeme uvažovat symetrické síťové napětí U_s , zapojení zjednodušíme a budeme uvažovat zapojení podle Obr. č. 14, kde budeme uvažovat impedance Z_1 , Z_2 , Z_0 , které odpovídají jednotlivým složkám. Napětí U_s je mezi 1-1 a je dáno pro souslednou složku, pro netočivou a zpětnou složku je nulové. Vztahy mezi proudy v jednotlivých fázích a proudy jednotlivých složek jsou dány rovnicemi (4 až 11). [7]

Dle schématu zjistíme, že pro proudy platí:

$$\bar{I}_b = \bar{I}_c = 0 \quad \bar{U}_a = \bar{I}_a * \bar{Z}_v \quad (21)$$

Pro symetrické složky platí:

$$\bar{I}_1 = \bar{I}_2 = \bar{I}_0 \quad \bar{U}_1 + \bar{U}_2 + \bar{U}_0 = \bar{Z}_v * (\bar{I}_1 + \bar{I}_2 + \bar{I}_0) \quad (22)$$

Těchto vztahů jsem docílil pomocí rovnic (4), (5) a (6).

Dle Kirchhoffových zákonů platí pro obvod na Obr. č. 14:

$$\bar{U}_s = \bar{Z}_1 * \bar{I}_1 + \bar{U}_1 \quad (23)$$

$$0 = \bar{Z}_2 * \bar{I}_2 + \bar{U}_2 \quad (24)$$

$$0 = \bar{Z}_0 * \bar{I}_0 + \bar{U}_0 \quad (25)$$

Z rovnic (22), (23), (24) a (25) dostáváme:

$$\bar{I}_1 = \bar{I}_2 = \bar{I}_0 = \frac{\bar{U}_s}{\bar{Z}_1 + \bar{Z}_2 + \bar{Z}_0 + 3 * \bar{Z}_v} \quad (26)$$

$$\bar{U}_1 = \bar{U}_s * \frac{\bar{Z}_2 + \bar{Z}_0 + 3 * \bar{Z}_v}{\bar{Z}_1 + \bar{Z}_2 + \bar{Z}_0 + 3 * \bar{Z}_v} \quad (27)$$

$$\bar{U}_2 = \bar{U}_s * \frac{-\bar{Z}_2}{\bar{Z}_1 + \bar{Z}_2 + \bar{Z}_0 + 3 * \bar{Z}_v} \quad (28)$$

$$\bar{U}_0 = \bar{U}_s * \frac{-\bar{Z}_0}{\bar{Z}_1 + \bar{Z}_2 + \bar{Z}_0 + 3 * \bar{Z}_v} \quad (29)$$

Dále můžeme zjistit z rovnic (4), (5) a (6) proud a napětí ve fázích:

$$\bar{I}_a = \frac{3 * \bar{U}_s}{\bar{Z}_1 + \bar{Z}_2 + \bar{Z}_0 + 3 * \bar{Z}_v} \quad (30)$$

$$\bar{U}_a = \bar{U}_s * \frac{3 * \bar{Z}_v}{\bar{Z}_1 + \bar{Z}_2 + \bar{Z}_0 + 3 * \bar{Z}_v} \quad (31)$$

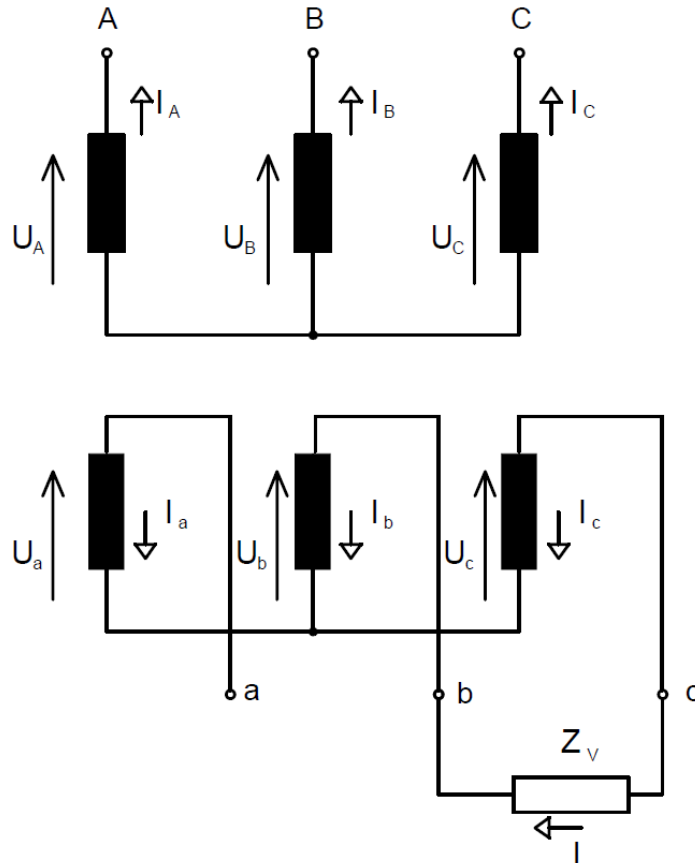
$$\bar{U}_b = \bar{U}_s * \frac{-1,732j * \bar{Z}_2 + \bar{Z}_0 * 1,732e^{-2,618j} + 3 * \bar{Z}_v * e^{\frac{4\pi}{3}j}}{\bar{Z}_1 + \bar{Z}_2 + \bar{Z}_0 + 3 * \bar{Z}_v} \quad (32)$$

$$\bar{U}_c = \bar{U}_s * \frac{1,732j * \bar{Z}_0 * 1,732e^{2,618j} + 3 * \bar{Z}_v * e^{\frac{4\pi}{3}j}}{\bar{Z}_1 + \bar{Z}_2 + \bar{Z}_0 + 3 * \bar{Z}_v} \quad (33)$$

Rovnice (32) a (33) jsou upraveny z rovnic (4), (5) a (6) za použití podmínky, že pro **a** platí rovnice (7) a (8), dále jsou tyto rovnice upraveny pomocí komplexních čísel. Pomocí těchto úprav jsem získal potřebné rovnice pro výpočet napětí ve všech fázích i pro výpočet jednopólového zatěžovacího proudu, který jsem chtěl zjistit. Při výpočtech reálných hodnot bychom zjistili, že při takovéto jednopólové zátěži nám klesne napětí ve fázi, která je zatížená a v ostatních fázích nám napětí stoupne. Tato změna fázových napětí je způsobena netočivou složkou výstupních napětí, která vznikla úbytkem na reaktanci x_0 .

Za pomoci rozkladu na symetrické složky a rovnic (4) a (26), že sousledná, zpětná a netočivá složka mohou mít maximální velikost jedné třetiny zátěžného proudu I_a . Proto se v praxi používá při kompenzování netočivé složky kompenzační (terciální) vinutí, které stačí dimenzovat na třetinový výkon transformátoru, protože není možné, aby přivedený výkon na toto vinutí, byl větší. [8] [9]

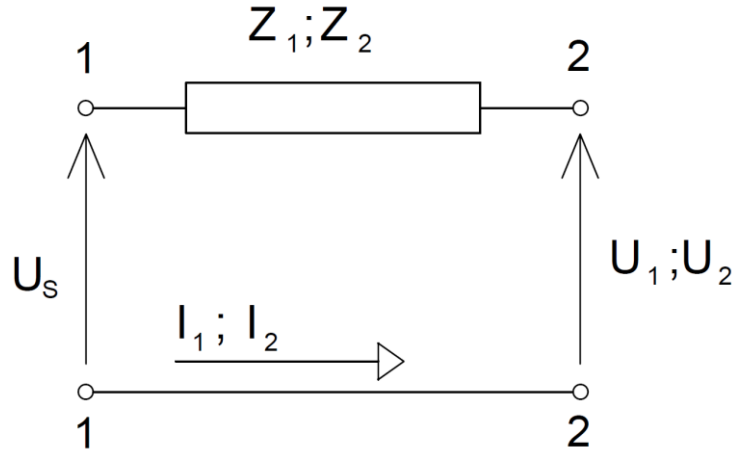
1.3.2 Trojfázový transformátor, dvoupólově zatížený



Obr. č. 15: Trojfázový transformátor zapojený Yy0, dvoupólově zatížený

Tato varianta je další možností nesymetrické zátěže, kde je jedna fáze bez zatížení, tudíž se jedná o velké nesymetrické zatížení. Transformátor takto zatížený je na Obr. č. 15, zapojení transformátoru je Yy0. U tohoto zapojení si musíme uvědomit, že velikost netočivé složky proudu bude nulová, protože uzel výstupního napětí není nikam připojen, proto platí:

$\bar{I}_0 = 0$ z čehož plyne: $\bar{U}_0 = \bar{I}_0 * \bar{Z}_0 = 0$. Tudíž s netočivou složkou nadále nebudeme počítat.



Obr. č. 16: Náhradní schéma transformátoru, jednopólově zatíženého

I zde použijeme zjednodušené náhradní schéma zapojení, které je na Obr. č. 16. Z Obr. č. 15 určíme napětí a proudy:

$$\bar{I}_a = 0 \quad (34)$$

$$\bar{I}_b = -\bar{I}_c = \bar{I} \quad (35)$$

$$\bar{U}_b - \bar{U}_c = \bar{Z}_v * \bar{I} \quad (36)$$

Nyní provedeme stejné operace, tedy převedení na souměrné složky jako v předchozí kapitole, kde jsem řešil obdobný případ, za pomoci rovnic (4 až 11).

$$\bar{I}_1 = -\bar{I}_2; \quad \bar{I}_0 = 0 \quad (37)$$

$$\bar{U}_1 - \bar{U}_2 = \bar{Z}_v * \bar{I}_1 \quad (38)$$

Pro jednotlivé souměrné složky napětí a proudů dostaneme:

$$\bar{U}_1 = \bar{U}_s * \frac{\bar{Z}_2 + 3 * \bar{Z}_v}{\bar{Z}_1 + \bar{Z}_2 + \bar{Z}_v} \quad (39)$$

$$\bar{U}_2 = \bar{U}_s * \frac{\bar{Z}_2}{\bar{Z}_1 + \bar{Z}_2 + \bar{Z}_v} \quad (40)$$

$$\bar{I}_1 = -\bar{I}_2 = \frac{\bar{U}_s}{\bar{Z}_1 + \bar{Z}_2 + \bar{Z}_v} \quad (41)$$

Nyní pomocí rovnic (4), (5) a (6) převedeme napětí a proud na jednotlivé fáze:

$$\bar{U}_a = \bar{U}_s * \frac{2 * \bar{Z}_2 + \bar{Z}_v}{\bar{Z}_1 + \bar{Z}_2 + \bar{Z}_v} \quad (42)$$

$$\bar{U}_b = \bar{U}_s * \frac{-\bar{Z}_2 + a^2 * \bar{Z}_v}{\bar{Z}_1 + \bar{Z}_2 + \bar{Z}_v} \quad (43)$$

$$\bar{U}_c = \bar{U}_s * \frac{-\bar{Z}_2 + a * \bar{Z}_v}{\bar{Z}_1 + \bar{Z}_2 + \bar{Z}_v} \quad (44)$$

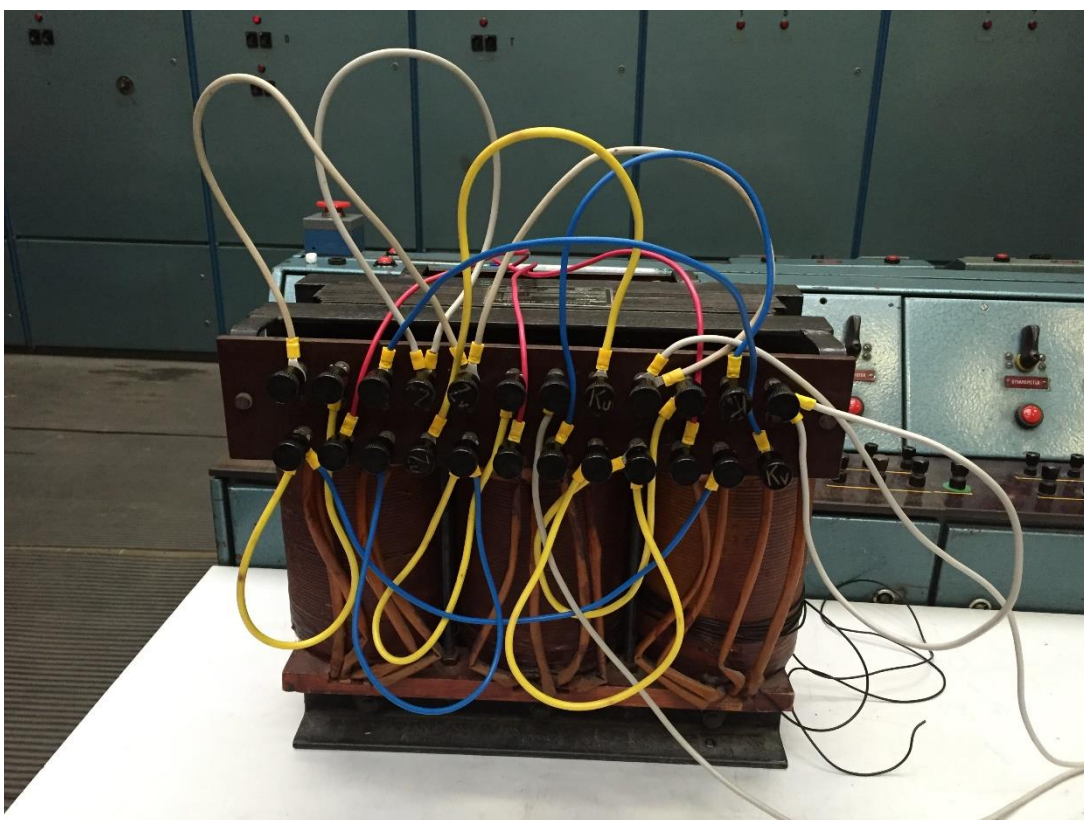
$$\bar{I}_b = -\bar{I}_c = I = \frac{-j\sqrt{3} * \bar{U}_s}{\bar{Z}_1 + \bar{Z}_2 + \bar{Z}_v} \quad (45)$$

$$\bar{I}_a = 0 \quad (46)$$

Takto je možné postupovat pro zjištění napětí a proudů v jednotlivých fázích u nesymetrické zátěže, použití rozkladu na symetrické složky je nejpraktičtější řešení. I u jiných případech nesymetrické zátěže lze postupovat podle těchto rovnic. [7] [8]

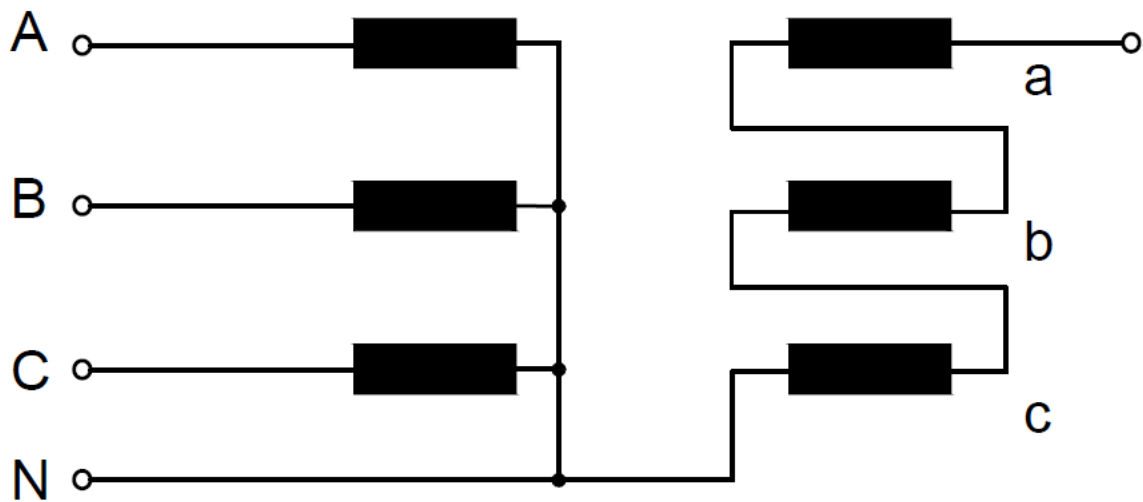
2 Měření na laboratorním transformátoru

Pro experimentální měření jsem vybral transformátor se štítkovým výkonem 3,3 kVA. Ten byl zapojen jako symetrizační autotransformátor dle Obr. č. 19. V tomto zapojení byla do fáze C hlavního transformátoru 20 kVA připojena zátěž realizovaná činným odporem $23\Omega/30A$, která vytvořila jednofázové zatížení transformátoru, Toto nesymetrické zatížení měl kompenzovat autotransformátor viz Obr. č. 19.



Obr. č. 17 symetrizační autotransformátor

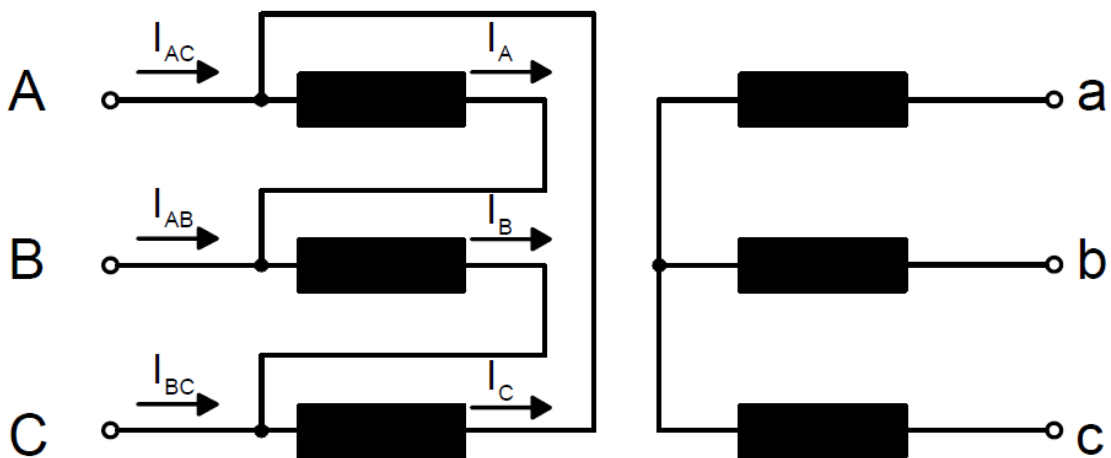
Tato sestava transformátorů byla napájena z indukčního regulátoru. Vliv jednofázové zátěže na napájecí síť, byl zkoumán bez připojeného symetrizačního autotransformátoru a následně s připojeným autotransformátorem. Transformátor se štítkovým výkonem 20 kVA, který jsem použil pro simulaci distribučního transformátoru ve spojení Dy je na stacionárním stanovišti v halové laboratoři H26 katedry.



Obr. č. 19 Zapojení symetrizačního TR.

2.2 Měření hlavního transformátoru naprázdno

Měření naprázdno bylo důležité pro ověření, zda je hlavní transformátor 20 kVA napájen ze symetrické sítě, protože toto je základní podmínka pro možné vyhodnocování výsledků. Protože byl transformátor napájen z indukčního regulátoru a ne z napájecí trojfázové sítě, kde je normami stanovena velikost možné nesymetrie v jednotlivých fázích, proto bylo nutné toto měření pro ověření symetrického napájení. Toto měření bylo důležité pro samotné ověření funkčnosti transformátoru, protože se transformátor pravidelně nepoužívá, tak nebylo jisté, jestli nemá poškozenou izolaci nebo vinutí. Dále se jednalo o úplně první měření s tímto transformátorem, a tudíž šlo i o seznámení se s pracovištěm. Zapojení je na Obr. č. 20.

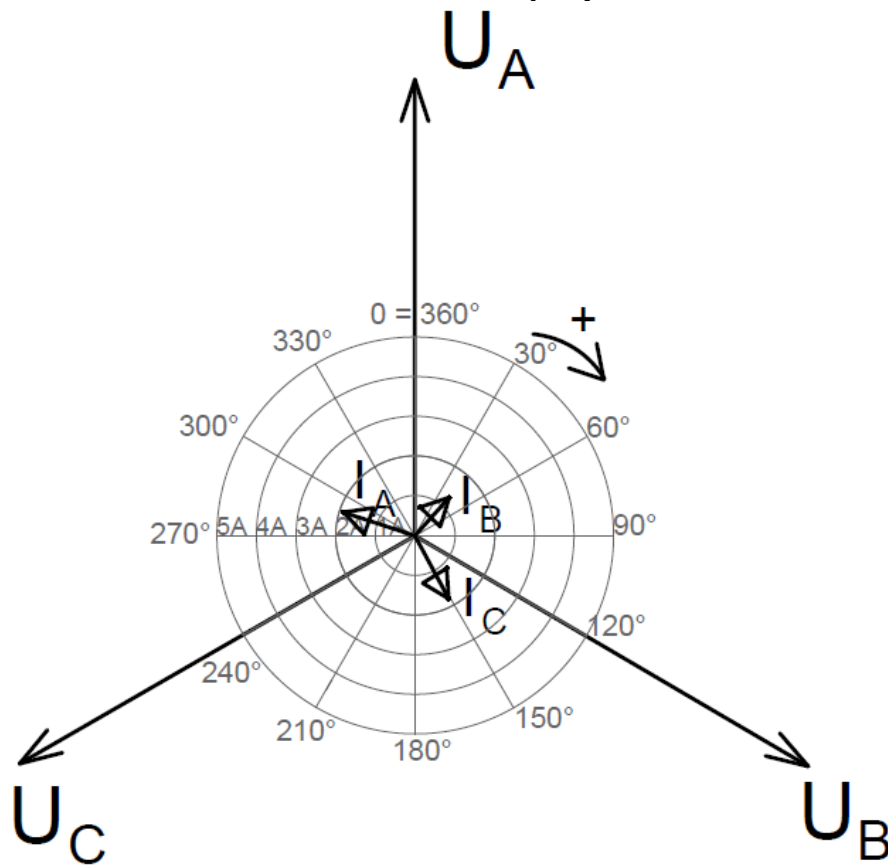


Obr. č. 20 Hlavní transformátor naprázdno

Naměřené hodnoty jsou uvedeny v Tab. č. 3:

| | A | B | C |
|--------------------|-------|-----|------|
| U_f [V] | 229 | 229 | 229 |
| I [A] | 1,9 | 1,3 | 1,8 |
| P [W] | 130 | 50 | 0 |
| Q [VAr] | 440 | 310 | 420 |
| S [VA] | 450 | 310 | 420 |
| α [°] | 288 | 282 | 272 |
| $\cos \varphi$ [-] | 0,307 | 0,2 | 0,03 |

Tab. č. 3 Naměřené hodnoty naprázdno



Obr. č. 21 Fázorový diagram pro TR naprázdno

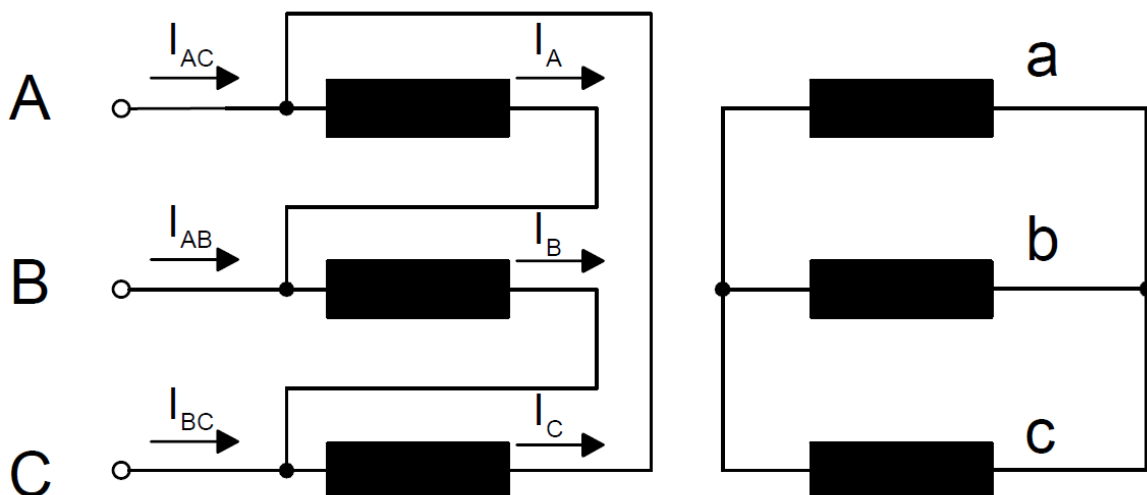
Z teorie transformátorů je známo, že při zapojení naprázdno tečou transformátorem magnetizační proudy, tento proud by u daného transformátoru měl mít velikost okolo 4-5% jmenovité hodnoty proudu při napájení jmenovitým napětím. Tento předpoklad jsem ověřil při měření a u tohoto laboratorního transformátoru vychází magnetizační proud okolo 5,5% což odpovídá předpokladu. [5]

Jak je patrné z naměřených hodnot, tak se nejedná o úplně symetrické napájení, tento rozdíl proudů může být způsoben několika faktory, jednak možnou ne zcela symetrickou napájecí soustavou, ale hlavně proto že magnetický obvod transformátoru je rovinné konstrukce a

není tudíž symetrický, ale myslím si, že největší roli v tomto měření má použitý měřicí přístroj, protože je dimenzován na vyšší napětí a proudy než jsem měřil u tohoto měření, k nižším hodnotám je necitlivý a měří je s velkou chybou, toto se potvrdilo u následujícího měření nakrátko. Použitý klešťový multimetr má automaticky přepínatelný proudový rozsah od 40 A do 1000 A, u rozsahu do 40 A pracuje s přesností +/-2%.

2.3 Měření hlavního transformátoru nakrátko

Jak již bylo uvedeno v předchozí kapitole výše i zde se jednalo o ověření funkce transformátoru a ověření zda je měřicí přístroj méně citlivý k nižším proudům. Jednalo se o zapojení nakrátko, tudíž sekundární svorky transformátoru byly zkratovány. Při tomto měření bylo samozřejmě důležité, aby nebyly dlouhodobě překročeny jmenovité proudy, které mohou protékat vinutím, aby nedošlo ke zničení transformátoru, proto jsem musel napájecí napětí regulovat velice opatrně. Zapojení je na obr. Obr. č. 22

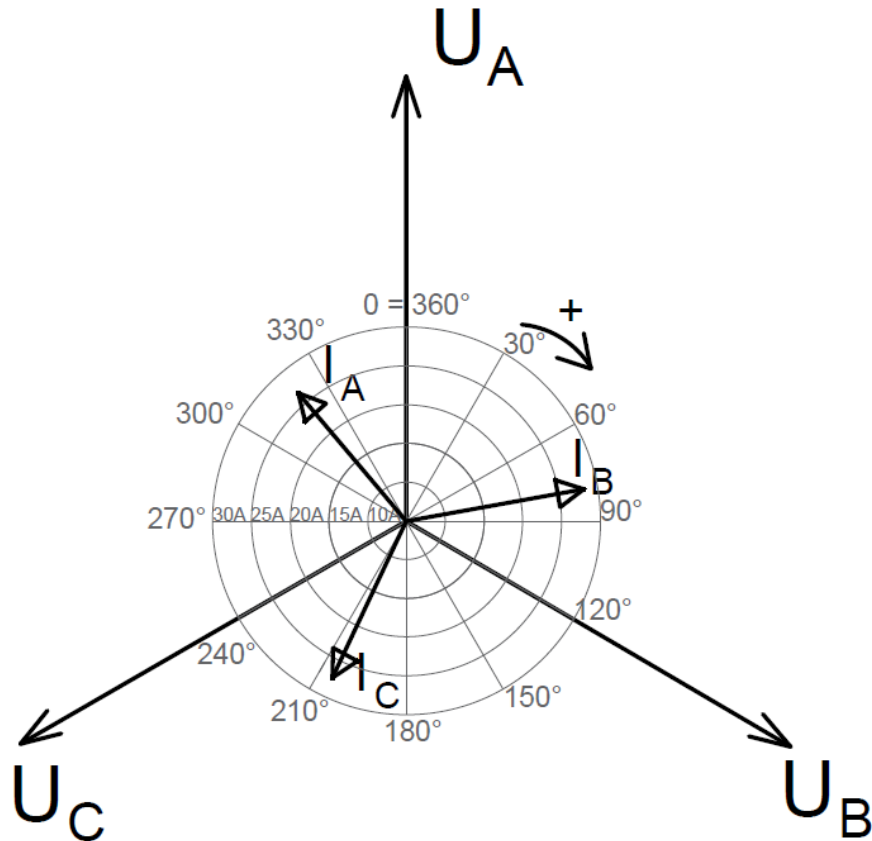


Obr. č. 22 Hlavní transformátor nakrátko

Naměřené hodnoty jsou v Tab. č. 4:

| | A | B | C |
|--------------------|-------|-------|-------|
| U_f [V] | 13,1 | 12,9 | 12,4 |
| I [A] | 26,5 | 28 | 26,8 |
| P [W] | 290 | 290 | 280 |
| Q [VAr] | 220 | 240 | 200 |
| S [VA] | 370 | 380 | 350 |
| α [°] | 323 | 320 | 325 |
| $\cos \varphi$ [-] | 0,793 | 0,762 | 0,816 |

Tab. č. 4 Naměřené hodnoty nakrátko



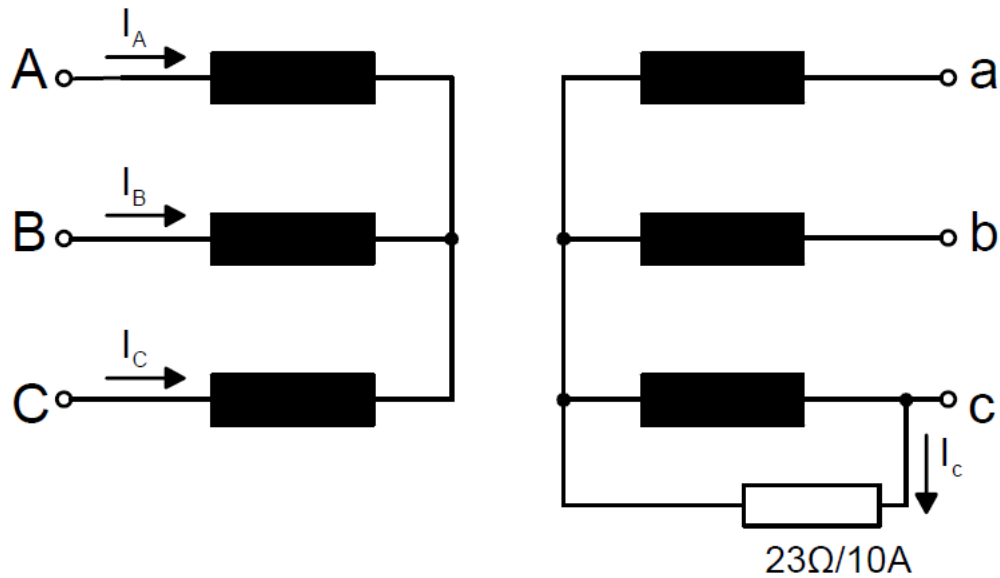
Obr. č. 23 Fázorový diagram pro TR nakrátko

Z těchto naměřených hodnot je vidět, že přístroj je vhodnější pro měření vyšších proudů, z diagramu je patrné, že transformátor je napájen ze symetrické soustavy. Proudů v jednotlivých fázích jsou rozděleny symetricky s maximální nesymetrií do 3% u všech fází, což bylo nezbytné pro další měření. Proud na primární straně jsem nastavoval do 30A což odpovídalo štítkové hodnotě proudu transformátoru.

2.4 Měření jednofázové zátěže bez symetrizačního transformátoru, zapojení Y/y

Toto měření probíhalo bez připojeného symetrizačního transformátoru, proto abych zjistil, jak se bude chovat napájecí síť při jednofázové zátěži. Tyto hodnoty jsou nezbytné pro vyhodnocení funkčnosti zapojení.

Hlavní transformátor byl zapojen do hvězdy a byl napájen plným napětím 400V. Jako jednofázovou zátěž jsem použil rezistor o velikosti 23Ω a maximálním možným proudem 10A. tento rezistor byl zapojen na sekundární straně ve fázi c. Toto zapojení je znázorněné na Obr. č. 24



Obr. č. 24 Hlavní transformátor Y/y s 1f zátěží

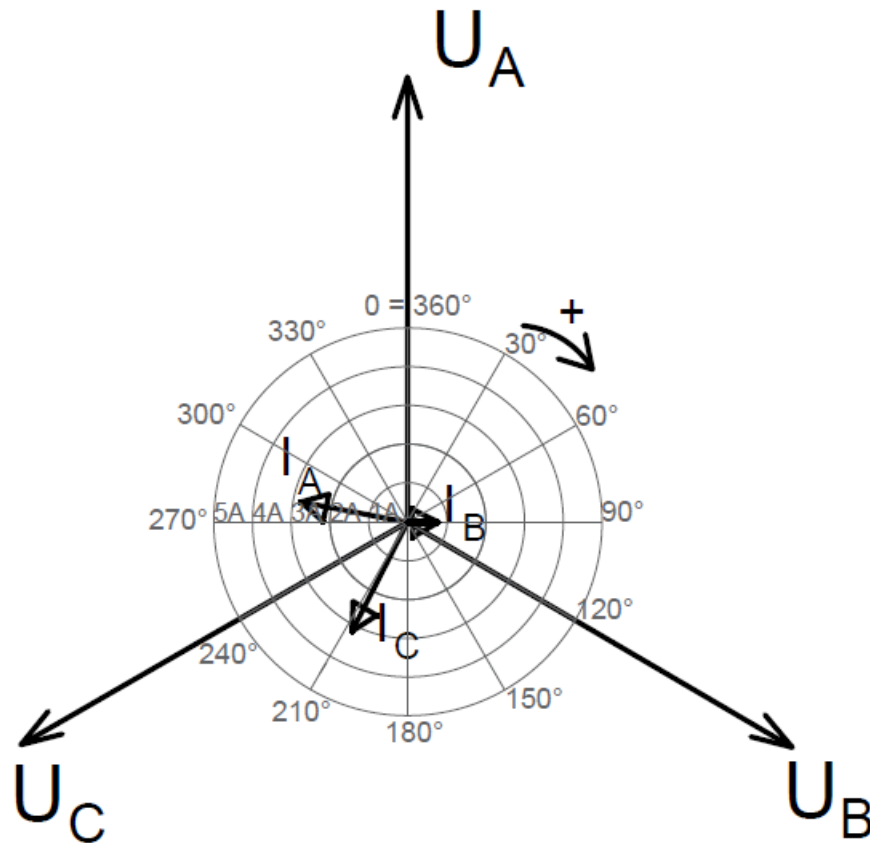
Naměřené hodnoty jsem zanesl do Tab. č. 5 a Tab. č. 6:

| | A | B | C |
|--------------------|-------|------|-------|
| U_f [V] | 240 | 234 | 235,3 |
| I [A] | 2,8 | 0,8 | 3,2 |
| P [W] | 120 | 160 | 640 |
| Q [VAr] | 650 | 95 | 430 |
| S [VA] | 670 | 190 | 780 |
| α [°] | 281 | 330 | 327 |
| $\cos \varphi$ [-] | 0,192 | 0,87 | 0,831 |

Tab. č. 5 Naměřené hodnoty hlavní TR-Y/y-prim.

| | c |
|--------------------|------|
| U_f [V] | 129 |
| I [A] | 5,6 |
| P [W] | 720 |
| Q [VAr] | 30 |
| S [VA] | 710 |
| α [°] | 360 |
| $\cos \varphi$ [-] | 0,99 |

Tab. č. 6 Naměřené hodnoty hlavní TR-Y/y-sek.



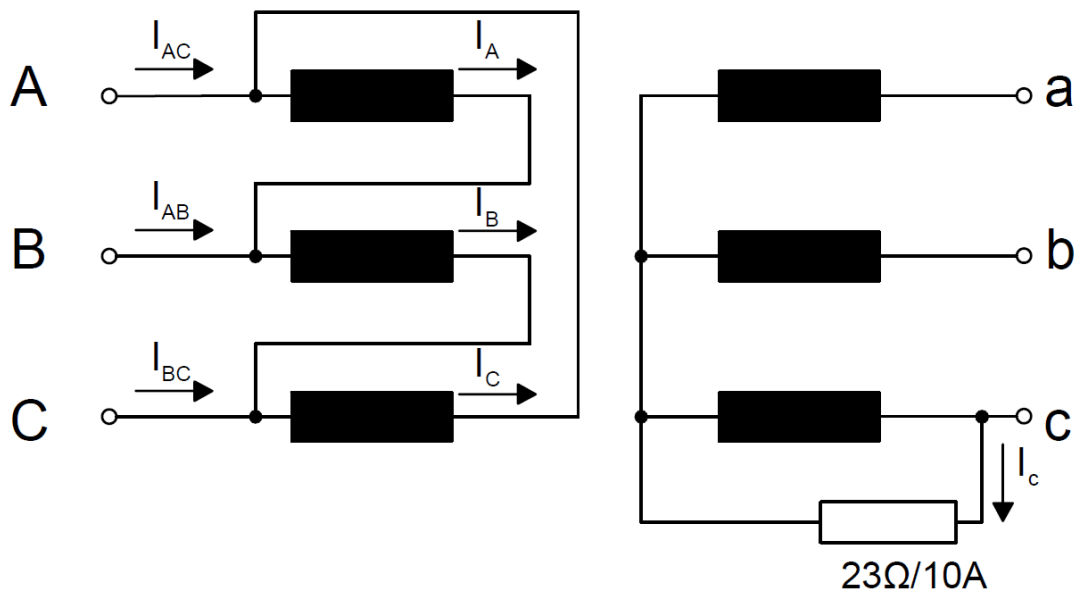
Obr. č. 25 Fázorový diagram pro TR Y/y

Z tohoto zapojení je jasné že jednofázová zátěž musí vyvolat nesymetrické rozložení proudů, což se potvrdilo, jak je patrné z Obr. č. 25. transformátor byl zapojen na primární straně do Y, všechny ostatní měření probíhali při zapojení do D, proto lze porovnat i vliv zapojení primární strany vinutí na výslednou nesymetrii.

2.5 Měření jednofázové zátěže bez symetrizačního transformátoru, zapojení D/y

Toto zapojení jsem realizoval z důvodu, že se v praxi u distribučních transformátorů častěji vyskytuje zapojení do trojúhelníka na primární straně. Při realizaci tohoto zapojení jsem musel akceptovat fakt, že transformátor byl navržen tak, aby byl zapojen na primární straně do hvězdy. Proto bylo nezbytné, abych transformátor napájel sníženým napětím. Tato podmínka vyplývá z principu zapojení. Při zapojení do hvězdy je přivedeno na primární stranu 400V, toto napětí ale není na jednotlivých fázích, na jednotlivé fáze je přivedeno napětí okolo 230V (viz. Tab. č. 5). Při zapojení do trojúhelníka je na primární stranu

přivedeno napětí 400V a toto napětí je přivedeno i na jednotlivé fáze, které nejsou konstruovány na takovéto hladiny napětí, proto je nezbytné zvolit velikost napětí takové, aby odpovídalo zapojení do hvězdy. Proto jsem zvolil snížené napětí 230V. Tuto teoretickou myšlenku jsem ověřil i v praxi, zkusil jsem přivést 400V na primární svorky transformátoru při zapojení do trojúhelníka, již při 300V tekly obvodem proudy s hodnotou okolo 30A, nárůst proudu byl příliš velký, proto jsem od tohoto měření odstoupil a použil jsem snížené napětí. Schéma tohoto měření je na Obr. č. 26.




Obr. č. 26 Hlavní transformátor D/y s 1f zátěží

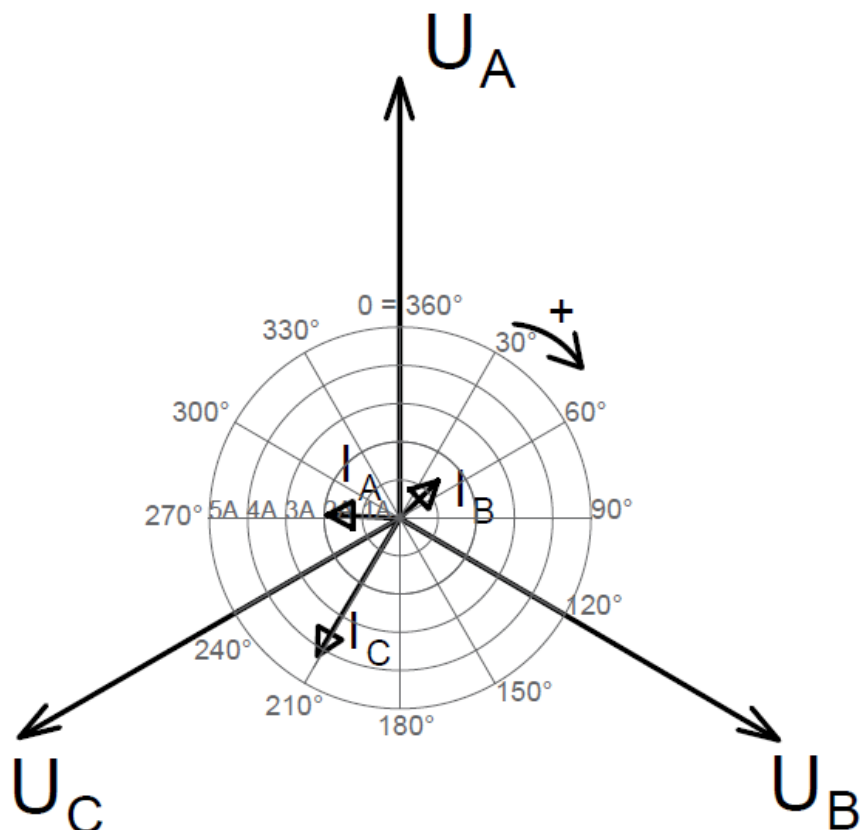
Naměřené hodnoty jsou uvedené v Tab. č. 7 a Tab. č. 8:

| | A | B | C |
|--------------------|------|-------|-------|
| U_f [V] | 231 | 231 | 231 |
| I [A] | 1,9 | 1,4 | 4,2 |
| P [W] | 0 | 75 | 851 |
| Q [VAr] | 450 | 330 | 470 |
| S [VA] | 450 | 330 | 960 |
| α [°] | 273 | 286 | 331 |
| $\cos \varphi$ [-] | 0,04 | 0,259 | 0,873 |

Tab. č. 7 Naměřené hodnoty hlavního TR-D-prim.

| | |
|---|-------|
|  | c |
| U_f [V] | 125 |
| I [A] | 5,5 |
| P [W] | 680 |
| Q [VAr] | 30 |
| S [VA] | 680 |
| α [°] | 360 |
| $\cos \varphi$ [-] | 0,999 |

Tab. č. 8 Naměřené hodnoty hlavního TR-D-sek.



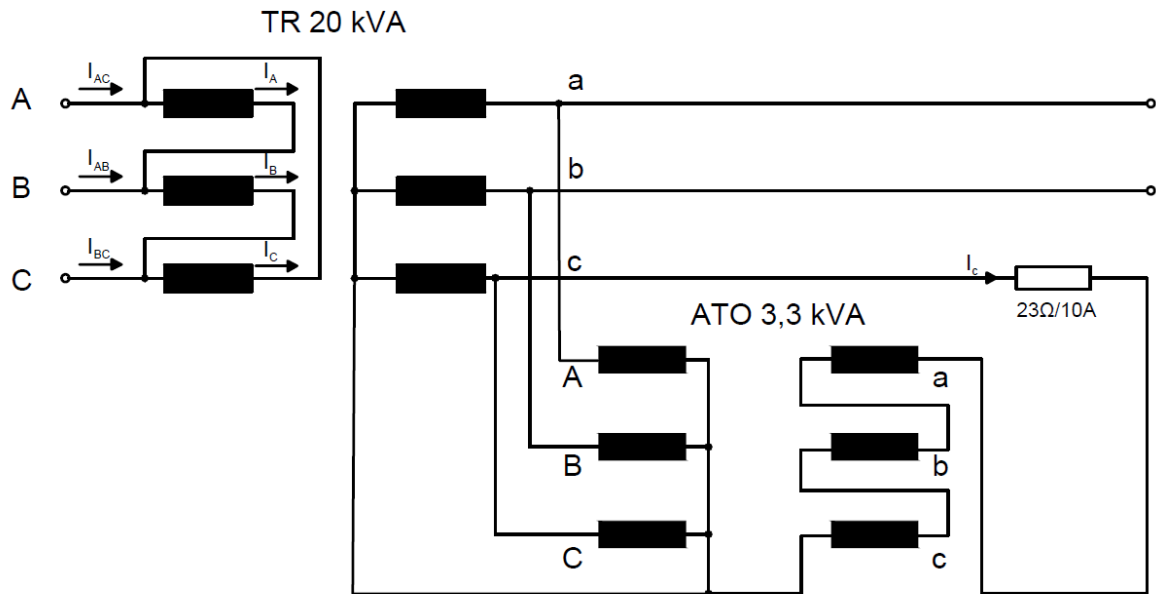
Obr. č. 27 Fázorový diagram pro TR D/y

I zde je patrně vidět z fázorového diagramu jak velkou nesymetrii způsobí jednofázová zátěž zapojená ve fázi c. Je vidět, že ve fázi C na primární straně teče největší proud 4,2A na rozdíl od ostatních kde je proud okolo 1,5 A. realizace tohoto měření dále poslouží k porovnání vlivu zapojení symetrizačního autotransformátoru. Hodnoty v Tab. č. 8 jsou hodnoty ze sekundární strany vinutí transformátoru z těchto hodnot je patrné, že se jedná o činnou zátěž, protože fázory napětí i proudu jsou ve fázi.

2.6 Měření jednofázové zátěže se symetrizačním transformátorem, zapojení D/y

Toto zapojení se odlišuje od předchozích, protože jsem k hlavnímu transformátoru připojil i symetrizační transformátor, kde jsem chtěl ověřit symetrizační účinek, tudíž aby velikost proudů byla pokud možno stejná, a aby fázory proudů byly symetricky rozloženy. Je jasné, že takového účinku nelze dosáhnout na těchto transformátorech, jde spíše o to, aby byl vidět kladný účinek při zapojení symetrizačního autotransfornátoru.

Způsob zapojení je na Obr. č. 28




Obr. č. 28 Hlavní transformátor se symetrizačním autotransfornátorem

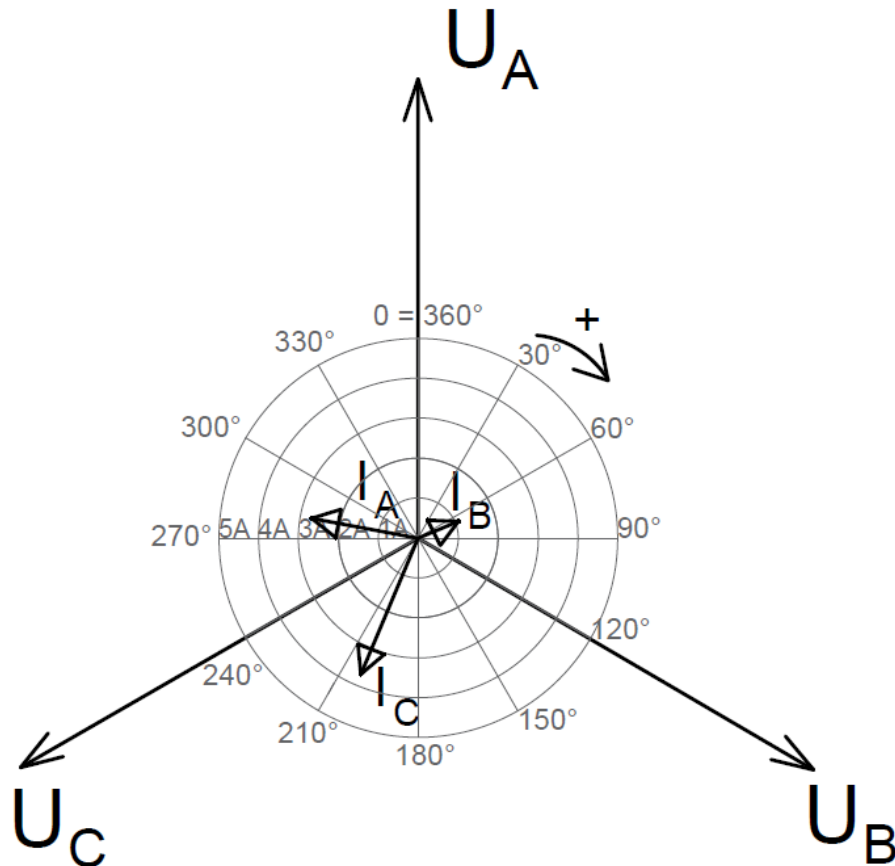
Naměřené hodnoty z tohoto měření jsou uvedeny v Tab. č. 9 a Tab. č. 10

| | A | B | C |
|--------------------|------|-------|------|
| U_f [V] | 231 | 231 | 231 |
| I [A] | 2,7 | 1,1 | 3,7 |
| P [W] | 90 | 140 | 680 |
| Q [VAr] | 630 | 220 | 520 |
| S [VA] | 640 | 260 | 860 |
| α [°] | 280 | 307 | 323 |
| $\cos \varphi$ [-] | 0,16 | 0,588 | 0,79 |

Tab. č. 9 Naměřené hodnoty hlavního TR se symetrizačního TR-prim

| | |
|---|-------|
|  | c |
| U_f [V] | 120 |
| I [A] | 5,4 |
| P [W] | 650 |
| Q [VAr] | 0 |
| S [VA] | 650 |
| α [°] | 360 |
| $\cos \varphi$ [-] | 0,999 |

Tab. č. 10 Naměřené hodnoty hlavního TR se symetrizačním TR-sek.



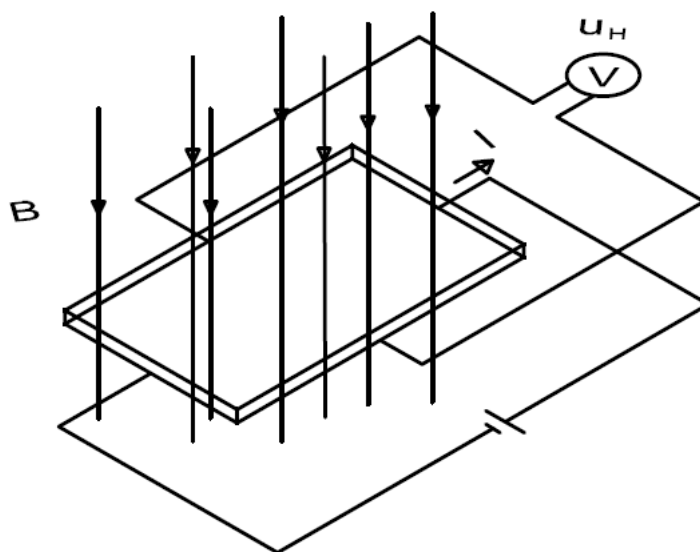
Obr. č. 29 Fázorový diagram pro TR D/y se symetrizačním TR

Z fázorového diagramu je vidět, že k úplné symetrizaci nedošlo, ale po připojení symetrizačního autotransformátoru došlo ke zlepšení rozložení proudů, což byl cíl tohoto zapojení.

2.7 Použitý přístroj UNI-T UT231

Při vybírání měřicího přístroje pro mou bakalářskou práci nastal jistý problém a to ten, že nejvhodnější přístroj pro realizaci měření by byl spektrální analyzátor, který by měl 12 kanálových vstupů, bohužel, takový přístroj nebyl k dispozici na katedře pohonů a osobně pochybuji, že by mi byl tento přístroj svěřen, protože tento druh přístroje je velice dráha

záležitost, cena takovéhoho přístroje se pohybuje v řádu statisíců. Proto bylo zapotřebí vybrat mařící přístroj, který by zvládl toto měření. Jako nejvhodnější cenově dostupný měřicí přístroj jsme zvolili klešťový multimetr, který dokáže změřit napětí, proud a výkon v jednotlivých fázích a jeho cena není tak závratná, pohybuje se do deseti tisíc korun. Největší výhodou klešťového multimetru byla ta, že se takový přístroj nacházel u nás na katedře, díky panu Ing. Pavlu Mňukovi, CSc. mi byl zapůjčen měřicí přístroj UNI-T UT231, další výhodou je, že je možné připojit přístroj k PC přes USB a následně ukládat měření rovnou do PC, kde se dají dále uložit do Excelu s příponou .xls. Tento přístroj díky své jednoduché konstrukci byl vhodný pro mé měření, nebyl problém přepínat klešťový měřák na jednotlivé fáze. Takto řešené měření jsem zvolil jakožto nejvhodnější měření účinku symetrizačního autotransformátoru. Je jasné, že při použití výše zmiňovaného spektrálního analyzátoru, by bylo měření přesnější a pohodlnější, ale myslím si, že tato varianta za použití klešťového měřicího přístroje je více než dostatečná, protože se mým cílem je ověřit funkci symetrizačního transformátoru, jakožto jeho účinku na napájecí síť a toto lze realizovat i za použití tohoto přístroje. Parametry přístroje UNI-T UT231 jsou uvedeny v Příloha č. 8. Tento přístroj využívá pro měření proudů Hallova jevu, díky kterému je možné přístrojem měřit nejen střídavé proudy, ale i stejnosměrné proudy, na rozdíl od klešťových přístrojů bez Hallovy sondy. Princip Hallova jevu je na Obr. č. 30. Destička polovodiče, která je položena do magnetického pole a protéká jí stejnosměrný proud v příčném směru, poté se na opačných stranách destičky objeví tzv. Hallovo napětí. [6]



Obr. č. 30 Princip Hallova jevu

Velikost Hallova napětí je dána:

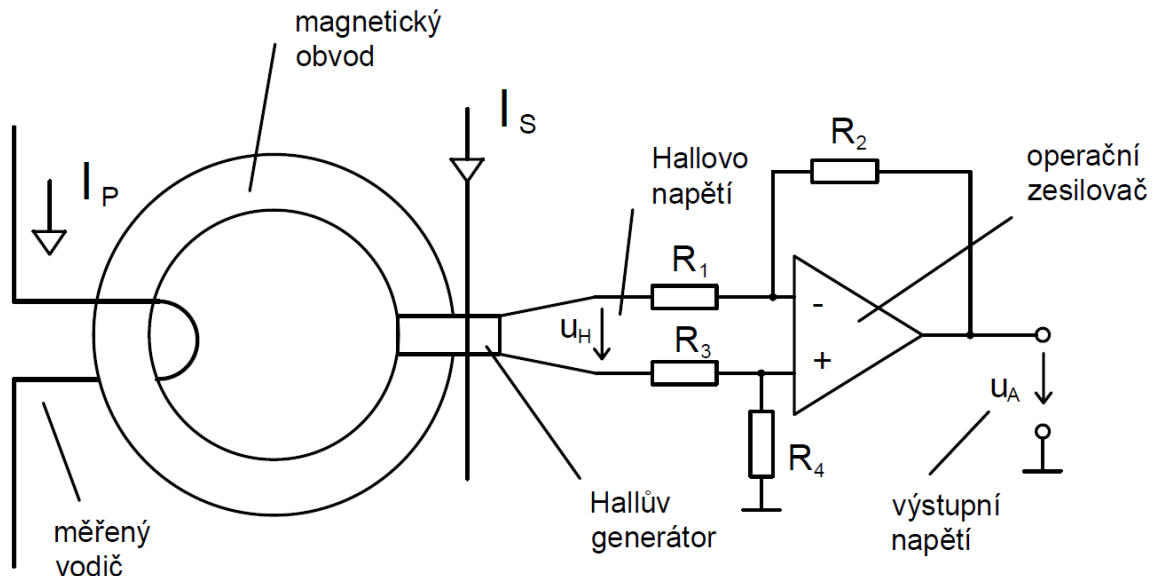
$$U_H = k * I * B \quad (47)$$

Kde: **k** je konstanta, která odpovídá vlastnostem materiálu polovodičové destičky,

I je stejnosměrný proud, který protéká skrz polovodičovou destičku,

B je indukce magnetického pole, kde se polovodičová destička nachází.

Zapojení Hallova generátoru, který teoreticky odpovídá samotnému zapojení v klešťovém přístroji je na Obr. č. 31.

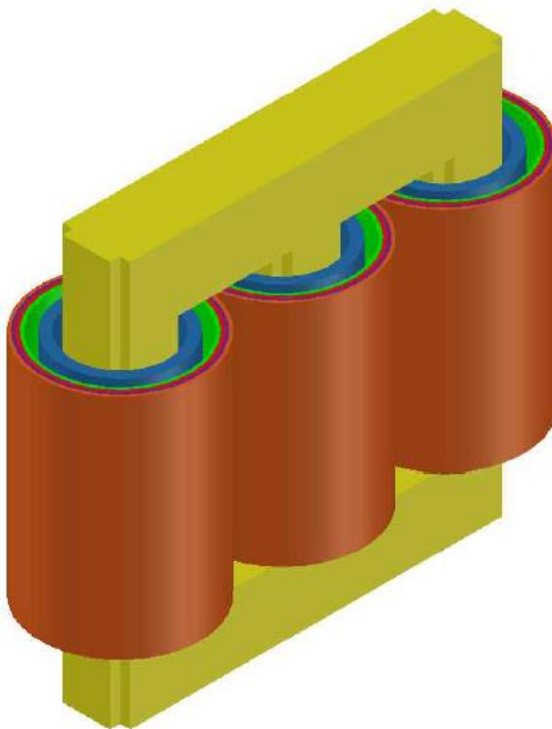


Obr. č. 31 vnitřní zapojení klešťového přístroje

Vodičem může protékat jak střídavý tak stejnosměrný proud I_P , který chceme změřit. Tento vodič je vložen mezi čelisti klešťového transformátoru, kde se nachází magnetický obvod přístroje. Ve vzduchové mezeře je vložen Hallův generátor, kterým protéká proud I_S , který je proudem řídicím. Čím větší bude velikost měřeného proudu I_P tím bude větší i magnetická indukce mezi čelistmi přístroje. Velikosti magnetické indukce bude odpovídat i velikost Hallova napětí. Velikost tohoto Hallova napětí je příliš malé, a proto toto napětí je zesilováno operačním zesilovačem na výsledné napětí U_A . Velikost tohoto napětí je úměrná velikosti měřeného proudu I_P . Díky tomuto principu můžeme relativně snadno měřit periodické i neperiodické střídavé proudy i stejnosměrné proudy. Přístroje, které využívají Hallova jevu, dosahují přesnosti přibližně 1% a používají se do frekvence až 25kHz. Rozsahy pro měření proudů Hallova sondou jsou od 1mA až do 1MA.

3 3D model transformátoru

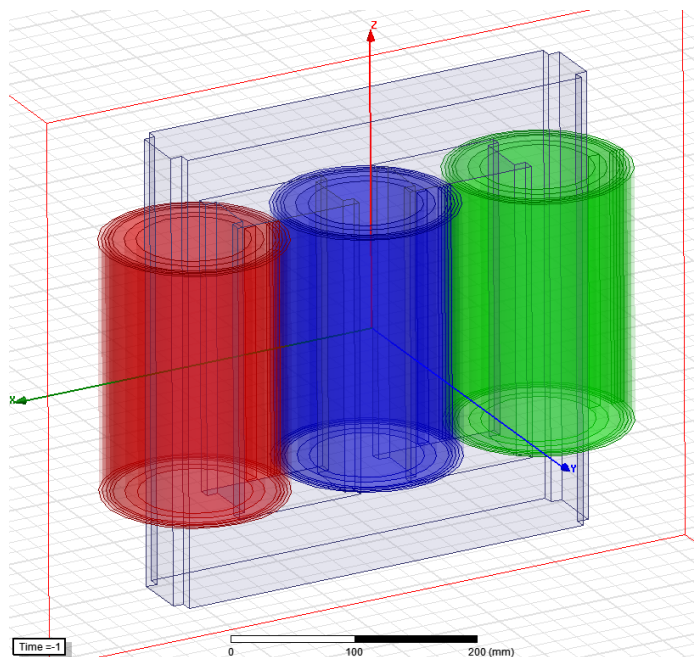
V zadání této práce bylo vytvořit model tohoto transformátoru pro možné simulace ve výpočetním programu Maxwell 3D, proto bylo velice nutné naměřit tento transformátor, aby 3D model odpovídal pokud možno co nejvíce realitě. Z naměřených hodnot jsem vytvořil 3D model transformátoru v programu AutoCAD [11]



Obr. č. 32 Transformátor 3,3kVA

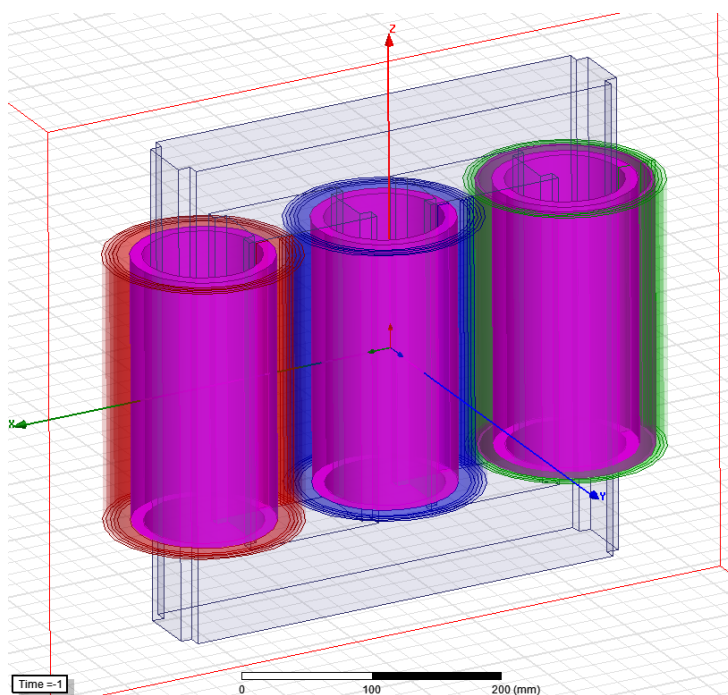
Z tohoto 3D modelu v AutoCADu vznikly podklady pro vytvoření funkčního modelu pro simulace ve výpočetním programu Maxwell 3D. [4]

Přenesený 3D model do Maxwellu 3D je na obr. 35



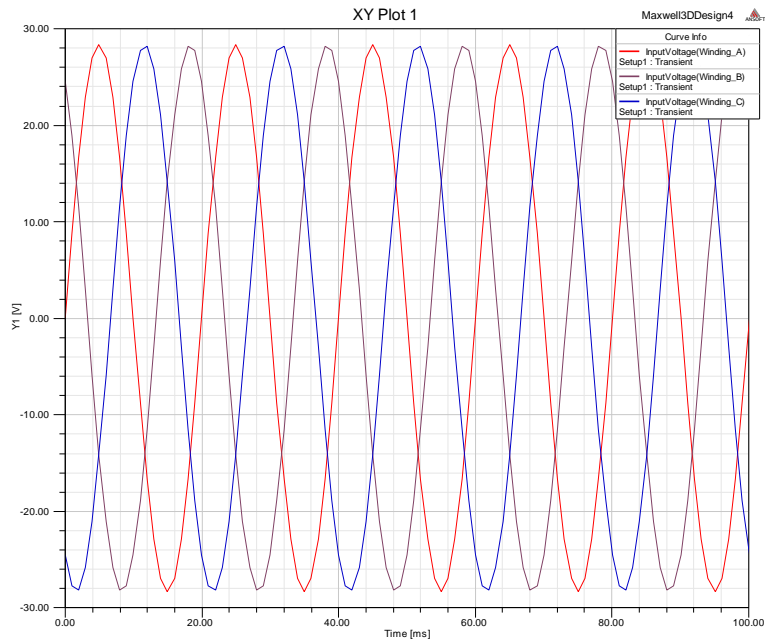
Obr. č. 33 3D model v prostředí Maxwell 3D

Velice důležitou částí tohoto 3D modelu je primární a sekundární vinutí, do vinutí je možné v Maxwellu vkládat vlastnosti jednotlivých vinutí, lze nastavit materiál a průřez vodiče. Jednotlivé sekce vinutí jsou vidět na Obr. č. 34. Pro realizaci nesymetrického zatížení transformátoru jsem využil primární vinutí všech fází a jedno ze sekundárních vinutí na fázi c, toto sekundární vinutí jsem zapojil nakrátko. Ostatním sekcím jsem nastavil vlastnosti vakua.



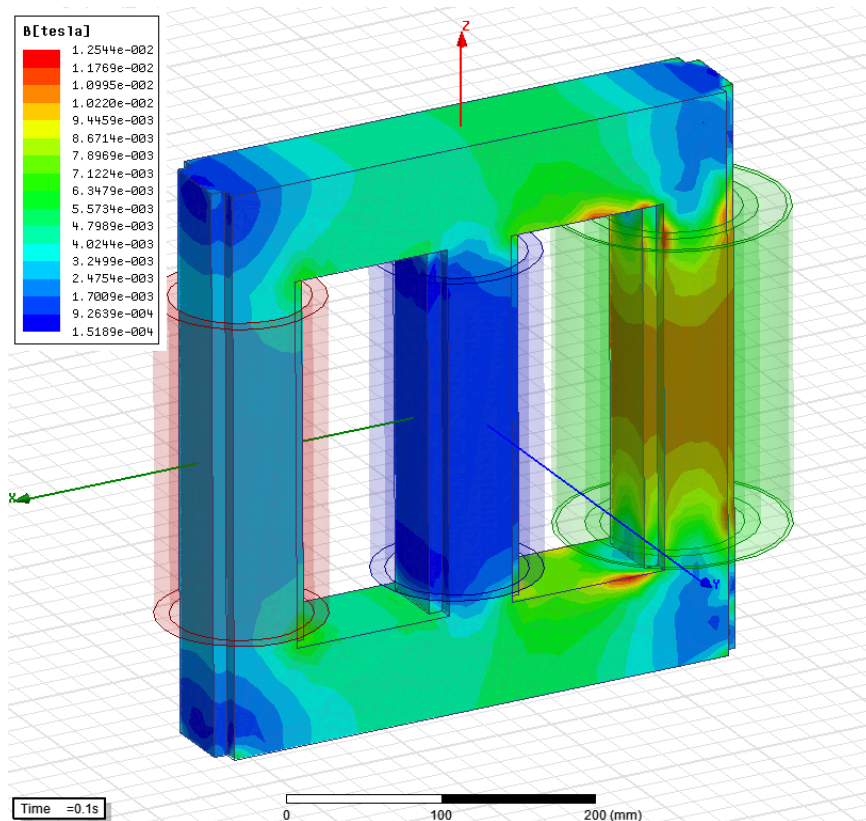
Obr. č. 34 Sekce vinutí 3D modelu

Do jednotlivých primárních vinutí bylo potřebné vytvořit budící napětí, které je znázorněné na Obr. č. 35. Vstupní napětí je střídavé s frekvencí 50 Hz a maximální amplitudou 28 V.



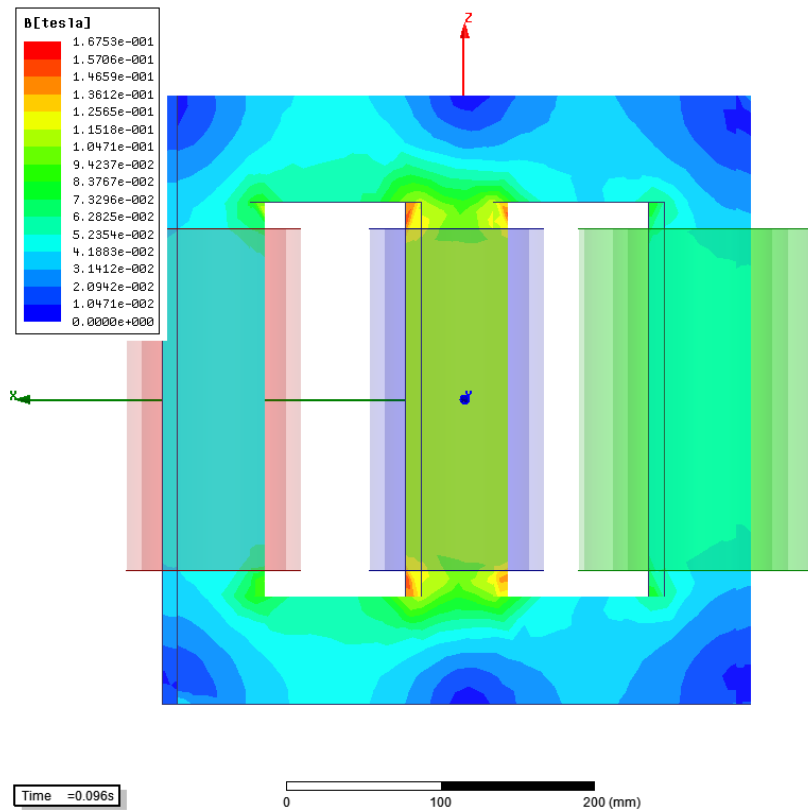
Obr. č. 35 Vstupní napětí do primárního vinutí

Maxwell 3D umožňuje sledovat rozložení magnetické indukce na povrchu jádra transformátoru. To je znázorněno na Obr. č. 36.



Obr. č. 36 Rozložení magnetické indukce v jádře TR

Na tomto obrázku je znázorněné rozložení magnetické indukce v určitý čas, rozložení magnetické indukce se samozřejmě bude měnit v čase, to je patrné z Obr. č. 37.



Obr. č. 37 Rozložení magnetické indukce v jádře TR

4 Analýza shromážděných dat

Pro správné vyhodnocení mého měření je podstatné, pečlivě analyzovat data z druhé kapitoly, kde jsou všechna data tabulárně zapsána. Aby bylo možné vyhodnocovat vliv připojeného symetrizačního autotransfornátoru, musíme si nejprve uvědomit jestli, byl hlavní transformátor napájen ze symetrické soustavy. Tato základní podmínka byla při měření splněna, což vyplývá z kapitoly 2.

4.1 Měření nakrátko

Výsledky tohoto měření jsou uvedeny v kapitole 0 k těmto naměřeným hodnotám jsem dopočítal střední hodnoty, tyto hodnoty jsou uvedeny v Tab. č. 11

| | A | B | C | stř. hodnota |
|--------------------|--------------|--------------|---------------|---------------|
| U_f [V] | 13,1 | 12,9 | 12,4 | 12,80 |
| I [A] | 26,5 | 28 | 26,8 | 27,10 |
| P [W] | 290 | 290 | 280 | 286,67 |
| Q [VAr] | 220 | 240 | 200 | 220,00 |
| S [VA] | 370 | 380 | 350 | 366,67 |
| α [°] | 323 | 320 | 325 | 322,67 |
| $\cos \varphi$ [-] | 0,793 | 0,762 | 0,816 | 0,79 |
| I/I_{str} [-] | 0,98 | 1,03 | 0,99 | |
| $I-I_{str}$ [A] | -0,60 | 0,90 | -0,30 | |
| P/P_{str} [-] | 1,01 | 1,01 | 0,98 | |
| $P-P_{str}$ [W] | 3,33 | 3,33 | -6,67 | |
| Q/Q_{str} [-] | 1,00 | 1,09 | 0,91 | |
| $Q-Q_{str}$ [VAr] | 0,00 | 20,00 | -20,00 | |
| S/S_{str} [-] | 1,01 | 1,04 | 0,95 | |
| $S-S_{str}$ [VA] | 3,33 | 13,33 | -16,67 | |

Tab. č. 11 Naměřené a dopočtené hodnoty, nakrátko

Jak je vidět z naměřených a dopočtených hodnot výkonů jedná se o symetrickou napájecí síť. Rozdíly v jednotlivých fázích se pohybují v jednotkách procent, proto je podmínka symetrického napájení splněna. U tohoto měření je patrné, že přístroj měřil podstatně přesněji než u měření menších proudů na, které není citlivý.

4.2 Měření naprázdno

Realizací tohoto měření se ověřila samotná funkčnost transformátoru a spolu ověřila, zda je napájen transformátor ze symetrické soustavy. Dopočtené hodnoty pro měření naprázdno jsou uvedeny v

| | A | B | C | stř. hodnota |
|--------------------|--------------|---------------|---------------|---------------|
| U_f [V] | 229 | 229 | 229 | 229,00 |
| I [A] | 1,90 | 1,3 | 1,8 | 1,67 |
| P [W] | 130 | 50 | 0 | 60,00 |
| Q [VAr] | 440 | 310 | 420 | 390,00 |
| S [VA] | 450 | 310 | 420 | 393,33 |
| α [°] | 288 | 282 | 272 | 280,67 |
| $\cos \varphi$ [-] | 0,307 | 0,2 | 0,03 | 0,18 |
| I/I_{str} [-] | 1,14 | 0,78 | 1,08 | |
| $I-I_{str}$ [A] | 0,23 | -0,37 | 0,13 | |
| P/P_{str} [-] | 2,17 | 0,83 | 0,00 | |
| $P-P_{str}$ [W] | 70,00 | -10,00 | -60,00 | |
| Q/Q_{str} [-] | 1,13 | 0,79 | 1,08 | |
| $Q-Q_{str}$ [VAr] | 50,00 | -80,00 | 30,00 | |
| S/S_{str} [-] | 1,14 | 0,79 | 1,07 | |
| $S-S_{str}$ [VA] | 56,67 | -83,33 | 26,67 | |

Tab. č. 12

| | A | B | C | stř. hodnota |
|--------------------|--------------|---------------|---------------|---------------|
| U_f [V] | 229 | 229 | 229 | 229,00 |
| I [A] | 1,90 | 1,3 | 1,8 | 1,67 |
| P [W] | 130 | 50 | 0 | 60,00 |
| Q [VAr] | 440 | 310 | 420 | 390,00 |
| S [VA] | 450 | 310 | 420 | 393,33 |
| α [°] | 288 | 282 | 272 | 280,67 |
| $\cos \varphi$ [-] | 0,307 | 0,2 | 0,03 | 0,18 |
| I/I_{str} [-] | 1,14 | 0,78 | 1,08 | |
| $I-I_{str}$ [A] | 0,23 | -0,37 | 0,13 | |
| P/P_{str} [-] | 2,17 | 0,83 | 0,00 | |
| $P-P_{str}$ [W] | 70,00 | -10,00 | -60,00 | |
| Q/Q_{str} [-] | 1,13 | 0,79 | 1,08 | |
| $Q-Q_{str}$ [VAr] | 50,00 | -80,00 | 30,00 | |
| S/S_{str} [-] | 1,14 | 0,79 | 1,07 | |
| $S-S_{str}$ [VA] | 56,67 | -83,33 | 26,67 | |

Tab. č. 12 Naměřené a dopočtené hodnoty, naprázdno

U tohoto měření jsem očekával, že budou daleko více symetrické, při porovnání proudů v jednotlivých fázích se dá říct, že jsou poměrně symetrické i úhly natočení fázorů proudů jsou přípustné, jak již bylo zmíněno, použitý přístroj nebyl zcela citlivý na malé proudy, to může způsobovat jisté nepřesnosti v měření. Z naměřených hodnot je ale patrné nerovnoměrné rozložení jalového a zejména činného výkonu. Toto je pravděpodobně způsobeno vlastnostmi hlavního transformátoru, například nerovnoměrně vytvořené jádro nebo vinutí. I přesto lze tvrdit, že transformátor byl napájen ze symetrické sítě. Protože proudy byly rozloženy přibližně symetricky.

4.3 Analýza symetrizace

Díky analýze měření nakrátko a naprázdno lze tvrdit, že je hlavní transformátor napájen ze symetrické sítě. Nyní lze porovnat hodnoty z měření na hlavním transformátoru s jednofázovou zátěží připojenou na sekundární straně do fáze c, a hlavní transformátor s připojeným autotransformátorem a s jednofázovou zátěží připojenou do fáze c. Naměřené hodnoty z obou měření jsou v Tab. č. 13 a Tab. č. 14

| | A | B | C | stř. hodnota |
|--------------------|----------------|----------------|---------------|-----------------|
| U_f [V] | 231 | 231 | 231 | 231,00 |
| I [A] | 1,9 | 1,4 | 4,2 | 2,50 |
| P [W] | 0 | 75 | 851 | 308,67 |
| Q [VAr] | 450 | 330 | 470 | 416,67 |
| S [VA] | 450 | 330 | 960 | 580,00 |
| α [°] | 273 | 286 | 331 | 296,67 |
| $\cos \varphi$ [-] | 0,04 | 0,259 | 0,873 | 0,39 |
| I/I_{str} [-] | 0,76 | 0,56 | 1,68 | |
| $I-I_{str}$ [A] | -0,60 | -1,10 | 1,70 | |
| P/P_{str} [-] | 0,00 | 0,24 | 2,76 | |
| $P-P_{str}$ [W] | -308,67 | -233,67 | 542,33 | |
| Q/Q_{str} [-] | 1,08 | 0,79 | 1,13 | |
| $Q-Q_{str}$ [VAr] | 33,33 | -86,67 | 53,33 | |
| S/S_{str} [-] | 0,78 | 0,57 | 1,66 | |
| $S-S_{str}$ [VA] | -130,00 | -250,00 | 380,00 | |

Tab. č. 13 Naměřené a dopočtené hodnoty, bez symetrizace

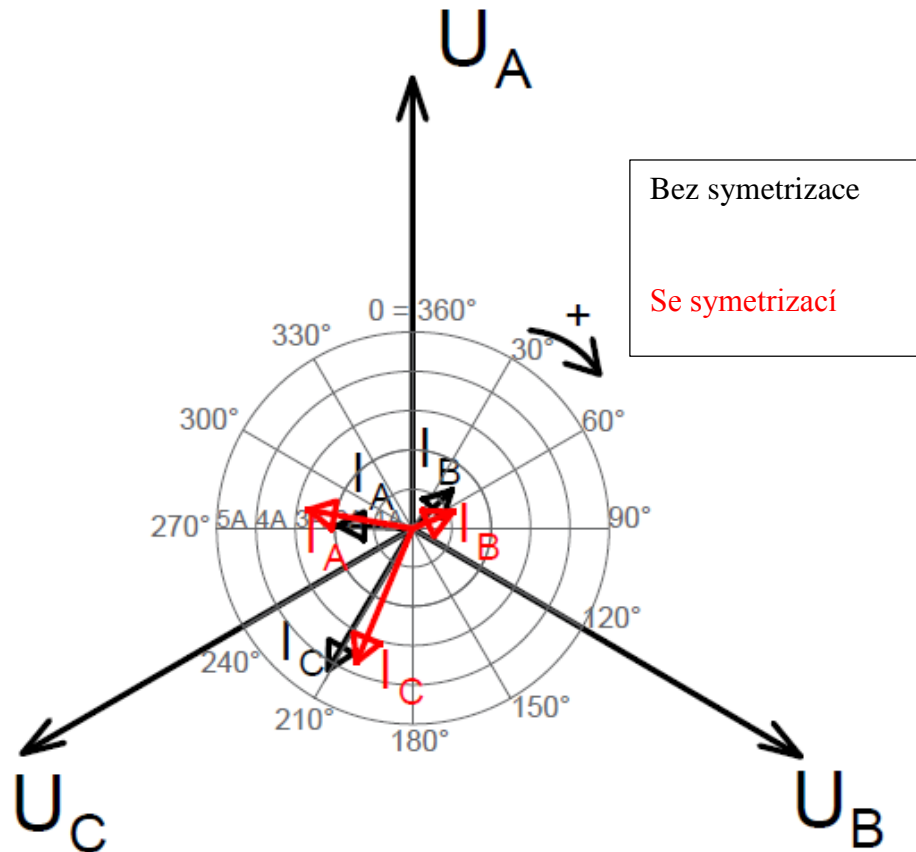
| | A | B | C | stř. hodnota |
|-----------|-----|-----|-----|-----------------|
| U_f [V] | 231 | 231 | 231 | 231,00 |
| I [A] | 2,7 | 1,1 | 3,7 | 2,50 |
| P [W] | 90 | 140 | 680 | 303,33 |

| | | | | |
|-------------------|----------------|----------------|---------------|---------------|
| Q [VAr] | 630 | 220 | 520 | 456,67 |
| S [VA] | 640 | 260 | 860 | 586,67 |
| α [°] | 280 | 307 | 323 | 303,33 |
| cos φ [-] | 0,16 | 0,588 | 0,79 | 0,51 |
| I/Istr [-] | 1,08 | 0,44 | 1,48 | |
| I-Istr [A] | 0,2 | -1,4 | 1,2 | |
| P/Pstr [-] | 0,30 | 0,46 | 2,24 | |
| P-Pstr [W] | -213,33 | -163,33 | 376,67 | |
| Q/Qstr [-] | 1,38 | 0,48 | 1,14 | |
| Q-Qstr [VAr] | 173,33 | -236,67 | 63,33 | |
| S/Sstr [-] | 1,09 | 0,44 | 1,47 | |
| S-Sstr [VA] | 53,33 | -326,67 | 273,33 | |

Tab. č. 14 Naměřené a dopočtené hodnoty, se symetrizací

Z těchto naměřených a dopočtených hodnot je v oblasti proudu malé zlepšení po připojení symetrizačního autotransformátoru, protože klesá špička proudu fáze C z hodnoty 4,2A na hodnotu 3,7A, dále se zvýšil proud ve fázi A z hodnoty 1,9A na hodnotu 2,7A, tudíž se velice přiblížil střední hodnotě proudu. Jen ve fázi B zůstal proud téměř nezměněn, to mohlo být způsobeno nedostatečnou citlivostí měřicího přístroje na malé proudy.

Důležitý faktor je i úhel natočení fázorů těchto proudů, na Obr. č. 38 je vidět jisté zlepšení v natočení jednotlivých fázorů po připojení symetrizačního autotransformátoru.



Obr. č. 38 Porovnání fázorových diagramů

Z tohoto fázorového diagramu je vidět, že červené fázory jsou více symetrizované než ty černé, které jsou z měření bez symetrizačního autotransfómátoru.

Další analýza spočívá v nerovnoměrnosti rozdělení výkonů mezi jednotlivé fáze. Z Tab. č. 13 a

| | A | B | C | stř. hodnota |
|--------------------|----------------|----------------|---------------|-----------------|
| U_f [V] | 231 | 231 | 231 | 231,00 |
| I [A] | 2,7 | 1,1 | 3,7 | 2,50 |
| P [W] | 90 | 140 | 680 | 303,33 |
| Q [VAr] | 630 | 220 | 520 | 456,67 |
| S [VA] | 640 | 260 | 860 | 586,67 |
| α [°] | 280 | 307 | 323 | 303,33 |
| $\cos \varphi$ [-] | 0,16 | 0,588 | 0,79 | 0,51 |
| I/I_{str} [-] | 1,08 | 0,44 | 1,48 | |
| $I-I_{str}$ [A] | 0,2 | -1,4 | 1,2 | |
| P/P_{str} [-] | 0,30 | 0,46 | 2,24 | |
| $P-P_{str}$ [W] | -213,33 | -163,33 | 376,67 | |
| Q/Q_{str} [-] | 1,38 | 0,48 | 1,14 | |
| $Q-Q_{str}$ [VAr] | 173,33 | -236,67 | 63,33 | |
| S/S_{str} [-] | 1,09 | 0,44 | 1,47 | |

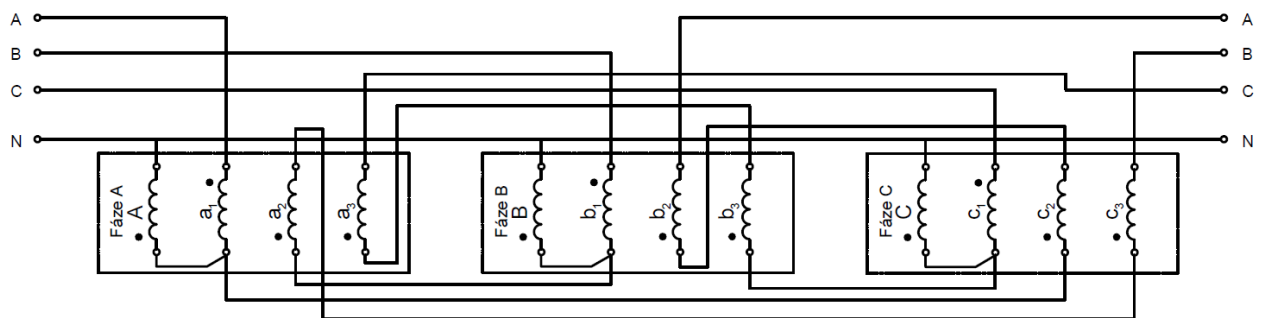
| | | | |
|-------------|-------|---------|--------|
| S-Sstr [VA] | 53,33 | -326,67 | 273,33 |
|-------------|-------|---------|--------|

Tab. č. 14 je již z naměřených hodnot u činného výkonu vidět, že je výkon více rozložený u zapojení se symetrizačním autotransformátorem, sice jsou rozdíly mezi fázemi A a C vysoké, ale u zapojení bez symetrizace jsou ještě vyšší, proto se dá říct, že u činného výkonu došlo také k symetrizaci.

Poměry zdánlivého výkonu jsem v tabulkách neuváděl, protože jsou rovny proudovým poměrům, které v tabulkách uvedeny jsou. Proto stejně jako u proudu tak i u zdánlivých výkonů došlo k symetrizačním účinkům.

U jalového výkonu je trochu odlišná situace, protože došlo k jeho nárůstu po připojení symetrizačního autotransformátoru v průměru o 40Var. Z tabulky vyplývá, že jsou hodnoty více symetrické pro zapojení bez symetrizace.

Při realizaci měření byl symetrizační autotransformátor zapojen podle Obr. č. 19, toto zapojení jsem zvolil, protože časově nebylo možné realizovat další a složitější zapojení, protože jsem měření prováděl v halových laboratořích, kde jsem musel mít neustálý dozor z řad odborných pracovníků. Nejlepší zapojení symetrizačního autotransformátoru je na Obr. č. 39



Obr. č. 39 zapojení symetrizačního TR 2

Už ze samotného zapojení je vidět, že jednotlivé vinutí symetrizačního autotransformátoru se rozdělí do jednotlivých vinutí. Toto zapojení je podstatně složitější než zapojení, které jsem realizoval. Při takovémto zapojení je třeba ověřit, zda všechna vinutí jsou nepoškozená, aby bylo zapojení funkční. Toto zapojení hodlám realizovat v dalším projektu, který mě čeká v průběhu studia. Dle mého názoru bude toto zapojení podstatně lépe symetrizovat nesymetrické zatížení, protože se nesymetrické zatížení rozloží souměrně do všech fází pomocí tohoto zapojení. Jednotlivé proudy budou procházet vinutím transformátoru, tak, že budou muset projít přes sekce všech fází (proud fáze A bude procházet do sekundární sekce vinutí transformátoru a1 dále do c2 a b2 odtud nakonec bude moc být připojena zátěž. Zároveň

bude z té samé fáze přiveden vodič na primární vinutí a odtud povede vodič na nulový vodič). Tímto bude zaručena větší symetrizace nesymetrické zátěže.

5 Závěr

Tato bakalářská práce pojednává o problematice symetrizace odběru elektrické energie v distribuční soustavě. V úvodní kapitole je uvedeno jaké nepříznivé vlivy má nesymetrie na přístroje připojené v této soustavě, zejména jaký má vliv na transformátory a na točivé stroje. U transformátoru při nesymetrickém napájení bude docházet k transformaci zpětné složky, která nám bude negativně ovlivňovat přenášený výkon, při dimenzování ochrany transformátorů budeme muset počítat s celkovým proudem, který je složen ze sousledné, zpětné a netočivé složky, proto se ochrany nastavují na vyšší proudy u nesymetrických soustav. U točivých strojů se mění vlivem nesymetrie kruhové magnetické pole na eliptické. Dále se snižuje točivý moment, vlivem zpětné složky, která vytváří brzdící moment. Nesymetrické napájení má velký vliv na točivé stroje, protože při nesymetrii několika procent může docházet ke snížení životnosti stroje až na polovinu.

V první kapitole je dále uvedeno, jak se postupuje při matematickém řešení nesymetrických soustav, je zde uveden postup rozkladu na symetrické složky proudu. V této kapitole je uvedeno možné spojení transformátorů, které jsem využil při realizaci měření na laboratorním transformátoru.

Druhá kapitola se zabývala realizací měření v halových laboratořích na laboratorním autotransformátoru, pro vyhodnocování tohoto měření bylo nezbytné využít další transformátor, který byl zapojen v obvodu jako hlavní, na tomto transformátoru jsem provedl sérii měření, abych zjistil, zda je napájen ze symetrické soustavy. Měření na hlavním transformátoru bylo důležité pro vyhodnocení účinku symetrizace. Posouzení vlivu nesymetrie zatížení bylo realizováno měřením s jednofázovou zátěží a připojeným symetrizačním autotransformátorem v zapojení dle Obr. č. 28

Dále bylo v zadání vytvořit 3D model pro možné simulace ve výpočetním programu Maxwell 3D. Proto jsem nejprve musel důkladně změřit geometrické rozměry celého transformátoru, aby bylo možné vytvořit model v programu AutoCAD, z tohoto programu lze přenést 3D model s příponou .sat do výpočetního programu Maxwell 3D. Tento model jsem vytvořil za účelem seznámení se s výpočetním programem Maxwell 3D a ověřil, zda je možné na takto vytvořeném modelu provádět simulace. S touto úlohou a tímto modelem hodlám pokračovat v dalším navazujícím předmětu v magisterském studiu.

Poslední kapitola patřila analýze shromážděných dat, zejména získaných na základě měření. Z naměřených výsledků vyplývá, že hlavní transformátor je napájen symetrickou sítí viz Tab. č. 11 a že použití symetrizačního autotransformátoru mělo účinek viz. Obr. č. 38.

Použitá literatura

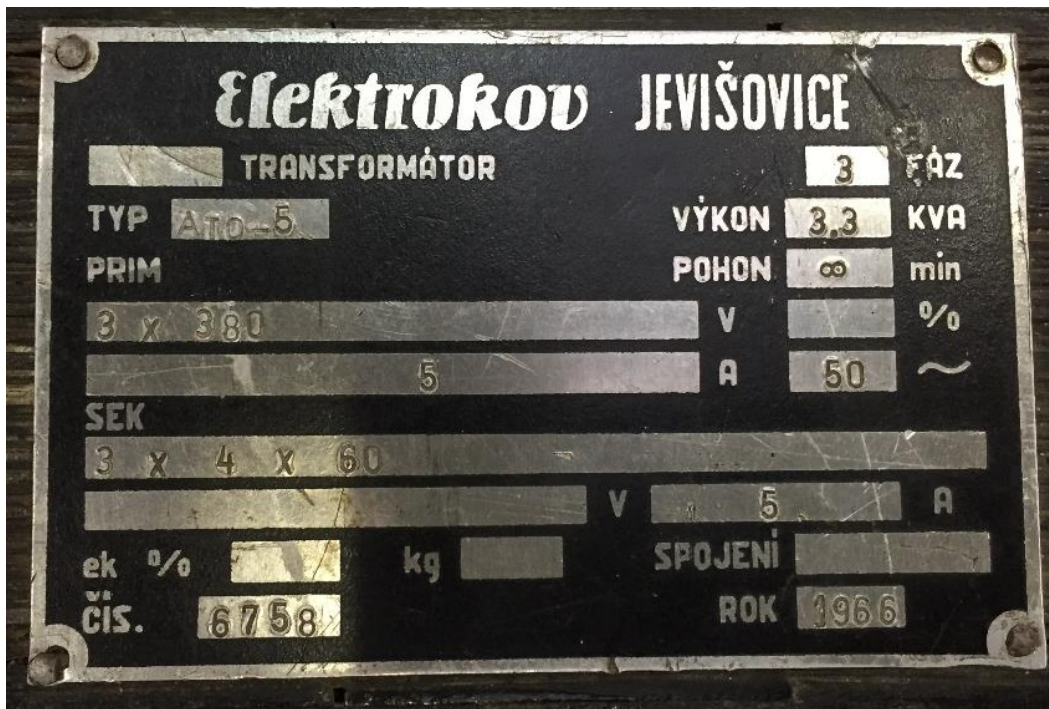
- [1] prof. Ing. Zdeněk Zoubek, CSc., doc. Ing. Jiří Měřička, CSc. *Elektrické stroje* [kniha]. Praha: vydavatelství ČVUT, Praha 1, Husova 5. 1980.
- [2] NOSEK K., Hapl J., *Stavba transformátorů* [kniha]. Praha: vydavatelství ČVUT, Praha 1, Husova 5. 1971.
- [3] Bašta, Kulda, Zoubek, Kopeček, *Měření na elektrických strojích 2* [kniha] Praha: nakladatelství SNTL, Praha. 1959
- [4] Manuály ANSYS Academic Research EM, Maxwell 3D
- [5] Doc. Ing. Petr Voženilek, CSc., Doc. Ing. Vladimír Novotný, CSc., Doc. Ing. Pavel Mindl, CSc., *ELEKTROMECHANICKÉ MĚNIČE* [kniha]. České vysoké učení technické v Praze. 2011
- [6] *ELEKTROTECHNICKÁ MĚŘENÍ* [kniha]. Praha: nakladatelství BEN-technická literatura, Věšínova 5, Praha 10. 2002
- [7] J. BAŠTA, J. CHLÁDEK, I. MAYER, *Teorie elektrických strojů* [kniha]. Praha: nakladatelství SNTL/ALFA, Praha/Bratislava. 1968
- [8] Dr. Ing. Jan Kyncl, *Optimalizace vybraných konstrukčních prvků indukčních kanálových pecí* [Habilitační práce]. České vysoké učení technické v Praze. Katedra energetiky. Praha 2002
- [9] Jiří Trachta. *Optimalizace provozu indukční pece ve slévárně Vsetín*. [Diplomová práce]. VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ. Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Ústav elektroenergetiky. 2011
- [10] Pavla Zahálková. *Nesymetrie v sítích vn, vliv uspořádání vodičů a kabelových vedení*. [Diplomová práce]. ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI. Fakulta elektrotechnická. Katedra technologií a měření. 2013
- [11] Jana Baarová, Petr Slavata, *AutoCAD verze 2000i česká tvorba 2D technické dokumentace*. [kniha]. České Budějovice: nakladatelství Kopp. 2001
- [12] ČSN EN 50 160- *Charakteristiky napětí elektrické energie dodávané z veřejných distribučních sítí*. Český normalizační institut Praha.
- [13] ČSN EN 61000-4-27 *elektromagnetická kompatibilita (EMC), část 4-27: Zkušební a měřicí technika – nesymetrie – zkouška odolnosti*. Český normalizační institut Praha.

- [14] IEC 61000-3-3 *Electromagnetic compatibility (EMC)*. International Electrotechnical Commission.
- [15] PNE 33 3430-3 *Parametry kvality elektrické energie – část 3: Nesymetrie a změny kmitočtu napětí*. Podniková norma ČEZ, EO.N CZ, PRE, ČEPS, ZSE.[online]. Dostupné z:
<http://www.csres.cz/Upload/PNE%2033%203430-3%203.v%20tisk.pdf>
- [16] SPECIFIKACE přístroje UNI-T UT231 [online]. Dostupné z:
<http://www.uni-t.cz/p/multimetr-uni-t-ut231-klestovy-wattmetr>

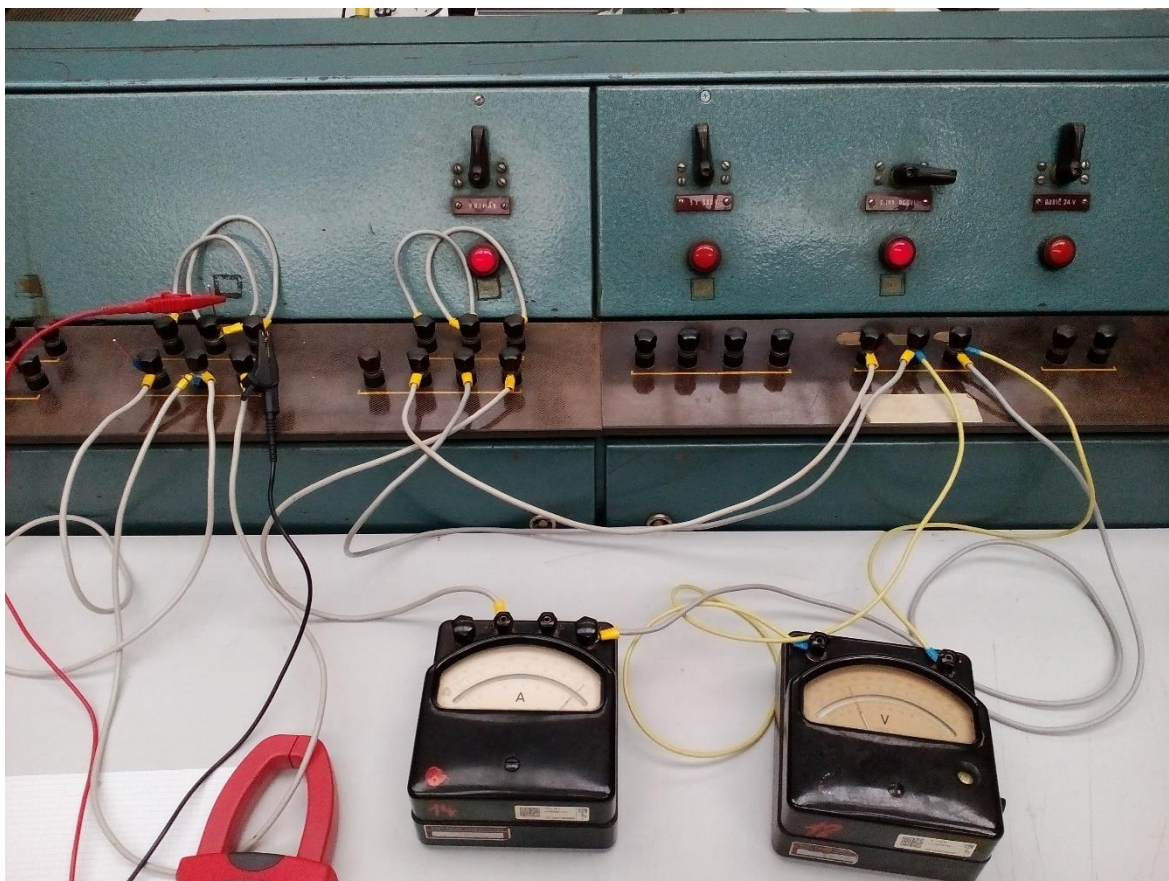
Přílohy



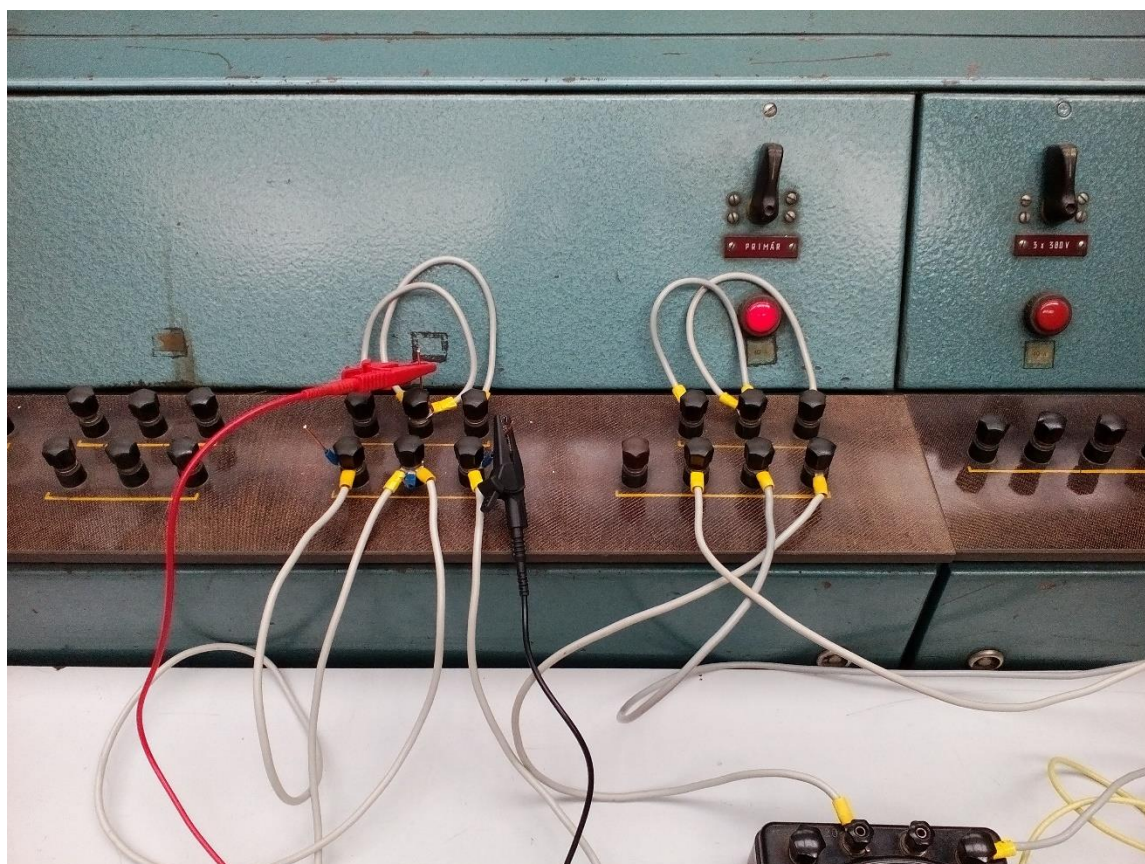
Příloha č. 1 štítek transformátoru 20 kVA



Příloha č. 2 štítek transformátoru 3,3 kVA



Příloha č. 3 Pracoviště v halových laboratořích



Příloha č. 4 Detail zapojení a měření na svorkách TR



Příloha č. 5 Měření se symetrizačním autotransfornátorem



Příloha č. 6 Měření 1f zátěže



Příloha č. 7 Měřicí přístroj UNI-T UT231 [16]

| | | |
|-----------------------------|--|------------------------------|
| Parametry přístroje: | UNI-T UT231 | přesnost |
| AC napětí: | 20V / 100V / 300V / 600V | +/- (1.2%+5) |
| AC proud: | 40A / 100A / 400A / 1000A | +/- (2%+5) |
| Činný výkon: | 0.01kW ~ 600kW | +/- (3%+5) |
| Zdánlivý výkon: | 0.01kVA ~ 600kVA | +/- (3%+5) |
| Jalový výkon: | 0.01kVAr ~ 600kVAr | +/- (4%+5) |
| Výkonový faktor: | 0.3 ~ 1 | +/- (0.02%+2l) |
| Fázový úhel: | 0° ~ 360° | +/- 1° |
| Aktivní energie: | 1 ~ 9999kWh | +/- (3%+2) |
| Teplota: | -50°C až +1300°C, -58°F až +2372°F | +/- 1%+3 (°C), +/- 1%+5 (°F) |
| Kmitočet: | 20Hz - 500Hz | |
| Speciální funkce: | Auto rozsah | |
| | MAX/MIN hodnota | |
| | Data hold | |
| | Icon display | |
| | True RMS (AC napětí nebo proud) | |
| | Kalibrační faktor | |
| | Vstupní impedance pro AC napětí: 10 MΩ | |
| | Max. displej 9999 (46 x 42mm) | |
| | USB | |
| | Data Logging | |

Příloha č. 8 Parametry přístroje UNI-T UT231 [16]