VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV ELEKTROENERGETIKY

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Změna napětí na nn svorkách distribučního transformátoru vn/nn při změně jeho zatížení

BRNO 2008 **FRANTIŠEK BERNÁTH**

LICENČNÍ SMLOUVA

POSKYTOVANÁ K VÝKONU PRÁVA UŽÍT ŠKOLNÍ DÍLO

uzavřená mezi smluvními stranami:

1. Pan

Jméno a příjmení: František Bernáth

Bytem: Petőfiho 65, 94131 Dvory nad Žitavou, Slovenská republika

Narozen (datum a místo): 30.07.1986 v Nových Zámkoch

(dále jen „autor“)

a

2. Vysoké učení technické v Brně

Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií,

se sídlem Údolní 244/53, 602 00 Brno,

jejímž jménem jedná na základě písemného pověření děkanem fakulty:

Prof. Ing. Radimír Vrba, CSc.

(dále jen „nabyvatel“)

Čl. 1

Specifikace školního díla

1. Předmětem této smlouvy je vysokoškolská kvalifikační práce (VŠKP):
   □ bakalářská práce

   (dále jen VŠKP nebo dílo)

Název VŠKP:	Změna napětí na nn svorkách distribučního transformátoru vn/nn při změně jeho zatížení
Vedoucí/ školitel VŠKP:	doc. Ing. Vladimír Blažek, CSc.
Ústav:	Ústav elektroenergetiky
Datum obhajoby VŠKP:	16.06.2008

VŠKP odevzdal autor nabyvateli v*:

□ tištěné formě – počet exemplářů 2

□ elektronické formě – počet exemplářů 2

2. Autor prohlašuje, že vytvořil samostatnou vlastní tvůrčí činností dílo shora popsané a specifikované. Autor dále prohlašuje, že při zpracovávání díla se sám nedostal do rozporu s autorským zákonem a předpisy souvisejícími a že je dílo dílem původním.
3. Dílo je chráněno jako dílo dle autorského zákona v platném znění.
4. Autor potvrzuje, že listinná a elektronická verze díla je identická.

Článek 2

Udělení licenčního oprávnění

1. Autor touto smlouvou poskytuje nabyvateli oprávnění (licenci) k výkonu práva uvedené dílo nevýdělečně užít, archivovat a zpřístupnit ke studijním, výukovým a výzkumným účelům včetně pořizovaní výpisů, opisů a rozmnoženin.
2. Licence je poskytována celosvětově, pro celou dobu trvání autorských a majetkových práv k dílu.
3. Autor souhlasí se zveřejněním díla v databázi přístupné v mezinárodní síti
   □ ihned po uzavření této smlouvy

   (z důvodu utajení v něm obsažených informací)

4. Nevýdělečné zveřejňování díla nabyvatelem v souladu s ustanovením § 47b zákona č. 111/ 1998 Sb., v platném znění, nevyžaduje licenci a nabyvatel je k němu povinen a oprávněn ze zákona.

Článek 3

Závěrečná ustanovení

1. Smlouva je sepsána ve třech vyhotoveních s platností originálu, přičemž po jednom vyhotovení obdrží autor a nabyvatel, další vyhotovení je vloženo do VŠKP.
2. Vztahy mezi smluvními stranami vzniklé a neupravené touto smlouvou se řídí autorským zákonem, občanským zákoníkem, vysokoškolským zákonem, zákonem o archivnictví, v platném znění a popř. dalšími právními předpisy.
3. Licenční smlouva byla uzavřena na základě svobodné a pravé vůle smluvních stran, s plným porozuměním jejímu textu i důsledkům, nikoliv v tísni a za nápadně nevýhodných podmínek.
4. Licenční smlouva nabývá platnosti a účinnosti dnem jejího podpisu oběma smluvními stranami.

V Brně dne: …….

……. …….

Nabyvatel Autor

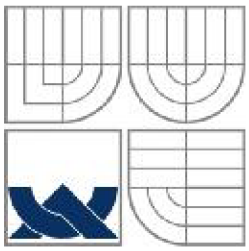
Bibliografická citace práce:

BERNÁTH, F. Změna napětí na nn svorkách distribučního transformátoru vn/nn při změně jeho zatížení. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2008. 51 s. Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Vladimír Blažek, CSc.

Prehlasujem, že som svoju bakalársku prácu vypracoval samostatne a použil som len podklady uvedené v priloženom zozname.

Zároveň by som chcel poďakovať vedúcemu bakalárskej práce p. doc. Ing. Vladimírovi Blažkovi, CSc. za cenné rady a pripomienky k mojej práci, poskytnutú literatúru. Vďaka taktiež patrí svojím blízkym za podporu počas môjho štúdia.

……



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií

Ústav elektroenergetiky

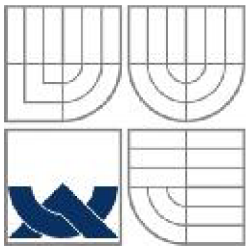
BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Změna napětí na nn svorkách distribučního transformátoru vn/nn při změně jeho zatížení

František Bernáth

vedoucí: doc. Ing. Vladimír Blažek, CSc.

Ústav elektroenergetiky, FEKT VUT v Brně, 2008



BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

Faculty of Electrical Engineering and Communication

Department of Electrical Power Engineering

Bachelor's Thesis

Change of voltage at LV terminals of a MV/LV power distribution transformer caused by changes in its load

by

František Bernáth

Supervisor: doc. Ing. Vladimír Blažek, CSc.

Brno University of Technology, 2007

ABSTRAKT

Práca sa zaoberá problematikou distribučných transformátorov. Čitateľovi sú predložené teoretické informácie v prvej časti. Táto úvodná vedomosť umožňuje bližšie sa oboznámiť s príkladom, ktorého riešenie je cieľom práce. Príklad zahŕňa modelovú situáciu v elektrizačnej sústave, kedy je priemyselný závod napájaný cez vedenie VN a tri paralelne pracujúce transformátory VN/NN. Ich napätie na nízkonapäťových svorkách sa bude meniť v závislosti na zaťažení. Príklad bude zahŕňať riešenie Blondelových konštánt pre zvolenú náhradnú schému.

KĽÚČOVÉ SLOVÁ: Distribučný transformátor; Náhradné schémy; Blondelove konštanty; Elektrický výkon,

ABSTRACT

This thesis is devoted to topic of distribution transformers. In the first part of text there are mentioned theoretical knowledge which prepare basement for solving model situation in electric network. The industrial park is plugged by three transformers and we are interested in change of voltage at LV terminals of transformers according its load. Solving of example will include counting Blondel's constancies of chosen substitute circuit.

KEY WORDS: Distribution transformer; Substitute circuit; Blondel's constancies; Electric power

OBSAH

ZOZNAM OBRÁZKOV 10

ZOZNAM TABULIEK 11

1 ÚVOD 12

2 CHARAKTERISTIKA SÚČASNÉHO STAVU RIEŠENEJ PROBLEMATIKY 13

3 CIELE PRÁCE 14

4 METÓDY A POSTUPY RIEŠENIA 15

5 TEÓRIA TRANSFORMÁTOROV 16

5.1 PRINCÍP ČINNOSTI TRANSFORMÁTOROV 16

5.2 TROJFÁZOVÝ TRANSFORMÁTOR 18

5.2.1 ZAPOJENIE VINUTÍ. HODINOVÝ UHOL. 18

5.2.2 PARALELNÁ SPOLUPRÁCA. PODMIENKY PARALELNEJ SPOLUPRÁCE. 20

5.3 NÁHRADNÁ SCHÉMA TRANSFORMÁTORA A PREPOČET 21

5.3.1 PREPOČÍTANIE PARAMETROV TRANSFORMÁTORA 22

5.4 SPRÁVANIE TRANSFORMÁTORA PRI ROZLIČNOM ZAŤAŽENÍ, FÁZOROVÉ DIAGRAMY 23

5.4.1 TRANSFORMÁTOR PRI PREVÁDZKOVOM ZAŤAŽENÍ 23

5.4.2 TRANSFORMÁTOR NAPRÁZDNO 25

5.4.3 TRANSFORMÁTOR NAKRÁTKO 26

5.5 UKÁŽKOVÝ VÝPOČET PARAMETROV NÁHRADNEJ SCHÉMY 3F TRANSFORMÁTORA 28

ZADANIE 28

NÁHRADNÁ SCHÉMA 28

VÝPOČET PARAMETROV PRIEČNEJ VETVY 29

VÝPOČET PARAMETROV POZDĹŽNEJ VETVY 29

5.6 NÁHRADA DVOJBRANOM Γ 31

5.7 STRATY A ÚČINNOSŤ 32

5.8 KONŠTRUKČNÉ VYHOTOVENIE 35

6 VÝPOČET ZMENY NAPÄTIA NA NN SVORKÁCH DISTRIBUČNÉHO TRANSFORMÁTORA VN/NN PRI ZMENE JEHO ZAŤAŽENIA 36

6.1 ZADANIE 36

6.2 SCHÉMA ZODPOVEDAJÚCA ZADANIU, POSTUP RIEŠENIA ÚLOHY 37

6.3 RIEŠENIE 37

6.4 ZHRNUTIE VÝSLEDKOV 48

7 ZÁVER 49

POUŽITÁ LITERATURA 50

PRÍLOHA A : PARAMETRE VYBRANÝCH TYPOV TRANSFORMÁTOROV 51

ZOZNAM OBRÁZKOV

Obr. 1-1 Prevedenie trafostanice 12

Obr. 5-1 Model ideálneho transformátora 16

Obr. 5-2 Trojfázový jadrový transformátor 18

Obr. 5-3 Zapojenie vinutia Yd1 transformátora a fázorový diagram napätí. 19

Obr. 5-4 Náhradná schéma transformátora. 21

Obr. 5-5 Fázorový diagram transformátora zaťaženého kapacitnou záťažou cos φ= 0,30. 24

Obr. 5-6 Fázorový diagram transformátora zaťaženého ohmickým odporom. 25

Obr. 5-7 Fázorový diagram transformátora zaťaženého záťažou cos φ= 0,60ind. 25

Obr. 5-8 Náhradná schéma pre príklad. 28

Obr. 5-9 Náhrada dvojbranom Γ . 31

Obr. 5-10 Schéma zapojenia pre meranie stavu a)naprázdno, b) nakrátko 33

Obr. 5-11 Amorfný transformátor 35

Obr. 6-1 Schéma riešenej úlohy 37

Obr. 6-2 Náhrada dvojbranom Γ 37

Obr. 6-3 Náhrada dvojbranom jedným pozdĺžnym parametrom 38

Obr. 6-4 Náhrada schémy nesúmerným T - článkom 39

Obr. 6-5 Graf závislosti modulu sekundárneho napätia na zaťažení 46

Obr. 6-5 Graf závislosti fázy sekundárneho napätia na zaťažení 46

ZOZNAM TABULIEK

Tab. 5-1 Prepočítavacie koeficienty medzi nominálnymi a fázovými hodnotami 20

Tab. 6-1 Vývoj napätia na nn svorkách distribučného transformátora v závislosti na zaťažení (O÷100%) pri cos $\varphi_1 = 0,95$ 45

Tab. 6-2 Vývoj napätia na nn svorkách distribučného transformátora v závislosti na zaťažení (110%) pri cos $\varphi_1 = 0,95$ 46

Tab. 6-3 Vývoj napätia na nn svorkách distribučného transformátora v závislosti na zaťažení (O÷100%) pri cos $\varphi_1 = 1,00$ 47

Tab. 6-4 Vývoj napätia na nn svorkách distribučného transformátora v závislosti na zaťažení (O÷100%) pri cos $\varphi_1 = 1,00$ 47

1 ÚVOD

Pojem transformátor v sebe ukrýva obrovské množstvo informácií. Tie sú zaznamenané vo vysokom počte literárnych zdrojov. Obyčajne sa v nich pojednáva o teórii transformátorov a kvôli vysokej miere zmapovania problematiky sa autori poddávajú veľmi podrobnej analýze. Tá obyčajne úzko súvisí s medziodvetvovými interakciami (elektrotechnika – strojárstvo – chémia - ..). Takáto činnosť je právom v plnej miere podporovaná, pretože len presné a podrobné následnosti dejov: analýza – syntéza zabezpečujú očakávané zlepšenie fungovania transformátorov a tým pádom sú pre rozvodné závody predostierané hospodárnejšie stroje, s ktorými sú schopní dosahovať vyššiu efektivitu prenosu elektrickej energie.

To je výsledok, ale v pozadí je ukrytá vedecká publikačná činnosť.

Ako negatívum sa vynára, že potenciálni záujemcovia (študenti) o problematiku distribučných transformátorov majú možnosť študovať len túto rozsiahlu literatúru pojednávajúcu všeobecne o transformátoroch. A to nie je ideálne. Preto má byť tento text komplex ucelených poznatkov, ktoré sa budú orientovať na teóriu transformátorov. Rozsah a obsah tejto publikácie sa snaží byť prispôsobený pre absolventov vysokých škôl. Poskytuje im dobrý prehľad na poli všeobecnej teórie, ktorej použiteľnosť je demonštrovaná na modelovom príklade napájania priemyslového závodu. A prehľad je v súčasnosti rozhodujúci pre schopnosť uplatnenia sa na pracovnom trhu. Je to prvoradý faktor, ktorý jedincovi umožňuje špecializovať sa.

Obr. 0-1 Prevedenie trafostanice 22/0.4 ([2])

2 CHARAKTERISTIKA SÚČASNÉHO STAVU RIEŠENEJ PROBLEMATIKY

Distribučné transformátory patria medzi základné elementy elektrizačnej sústavy už od samotného vznikania prenosových sietí. 1. transformátor zhotovili v roku 1885 traja inžinieri závodov Ganz: Zipernowski, Déri, Bláthy. Z toho vyplýva, že na proces vývoja bola v porovnaní s inými, v súčasnosti rýchlo rastúcimi odvetviami, vyhradená dlhá doba. Ako je to zvyčajné pre prírodný princíp zachovania rýchlosti rozvoja, transformátory tiež v prvopočiatkoch zažili veľké zmeny najmä z hľadiska zmeny použitých izolačných hmôt, lakov, konštrukčných prvkov, spôsobu chladenia, ochrany proti vzniku nepriaznivých elektrických stavov. Tak sme sa dostali z výkonu transformátorov 7,5kVA vyrobených v roku 1886 na 1000kVA pri použití 800kV napätia. Pritom rástla efektivita procesu transformácie, klesali hodnoty stratových čísel. ([1], [6])

Momentálne je v trende zvyšovať mieru minimalizácie použitého priestoru pre distribučný transformátor. V tomto smere má však elektrotechnická inovátorská skupina pred sebou veľkú výzvu. Dôvod vysvetlím. Pri miniaturizácii na poli elektroniky sa do výroby vniesli nové spôsoby izolácie (všeobecne zabezpečovania oddelených trás vedenia el. prúdu). Na tomto poli to funguje. Je však potrebné dodať, že transformátor pracuje aj s magnetickými obvodmi. A zatiaľ nebola objavená magnetická izolačná páska. To znamená, že hospodárny chod si vyžaduje určitý objem železného jadra.

Momentálne sa pri realizácii distribučných transformačných staníc dodáva celý objekt spôsobom unblock. Stavebný objekt, ktorý v sebe skrýva distribučný transformátor, je rozmerovo nadimenzovaný práve na použitý typ transformátora. A pri takomto pohľade sa dosahuje poznateľné znižovania priestoru určeného pre transformáciu elektrickej energie. Transformátor má pomerne dobré chladenie, ktoré je podporované kvalitným odvádzaním tepla z objektu. Okrem toho je zabezpečená vysoká miera bezpečnosti, keďže stavebné práce sa prevádzajú z nehorľavého materiálu, buď zo špeciálnej umelej hmoty alebo betónu. Na tohtoročnej elektrotechnickej výstave Elosys v Trenčíne popredné firmy prezentovali transformačné stanice s výkonom 2MVA na priestore 15m^2, ktorý zahrňoval aj časť pre nn rozvody. Mohol by som tiež začať hovoriť o tom, že takýmto spôsobom estetika nášho okolia stúpa a elektrotechnický rozvoj má dopad aj na formovanie životného prostredia.

Faktom ostáva, že dnešné rozšírené použitie elektrickej energie závisí v prvom rade od transformátorov, ktoré umožnili veľkú hospodárnosť pri prenose el. energie.

3 CIELE PRÁCE

Ciele, ktoré majú byť dosiahnuté:

1. Pojednajte o distribučných transformátoroch, ich elektrických parametroch a o ich náhrade dvojbranom.

2. Priemyselný závod má tri transformátory, každý s menovitým výkonom S_n = 1,6MVA a prevodom p = 22/0,4kV. Závod je napájaný z trojfázového vedenia s menovitým napätím U_n = 22kV so zadanými parametrami z rozvodne 22kV, kde sa udržuje konštantné napätie U = 23,1kV. Určte, ako sa bude meniť napätie na svorkách nízkeho napätia transformátorov pri zmenách výkonu od chodu naprázdno do menovitého zaťaženia transformátorov. Účinník sa predpokladá konštantný a rovná sa 0,95.

4 METÓDY A POSTUPY RIEŠENIA

Vstupným momentom pre skúmanie nového je rekapitulácia poznatkov bádateľa. Opakovanie v tejto sfére bolo organizované predmetom elektrické stroje v druhom ročníku bakalárskeho štúdia na FEKT VUT v Brne. Takto nahromadený celok údajov sa zveľadil do dvoch smerov.

1. Technická literatúra prevyšujúca rámec spomínaného predmetu. Zdrojom bola knižnica Ústavu výkonovej elektroniky.

2. Konfrontácia s praxou. Konzultácia so zainteresovanými spoločnosťami na výstave ELOSYS 2007, Trenčín. Sledovanie informačných materiálov o produktoch (web, prospekty) vrátane technických a ekonomických ukazovateľov. Hľadanie SW podpory pre výpočty transformátorov.

Nasledovala striedavá činnosť štúdia a zaznamenávania.

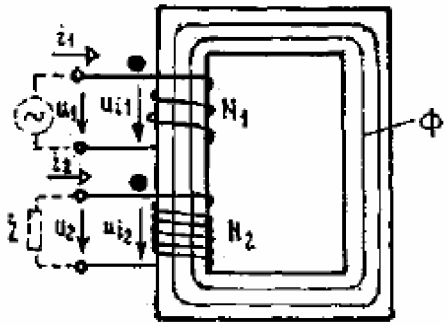
Po zhodnotení dostatku informačných zdrojov sa zahájila príprava samotnej semestrálnej práce, ktorá neskôr prekvitla do bakalárskej práce.

5 TEÓRIA TRANSFORMÁTOROV

Transformátor je netočivý stroj premieňajúci privedené striedavé napätie a prúd na iné zvolené hodnoty. Pri transformácii ostáva výkon nezmenený, ak neprihliadneme k istej, celkom malej spotrebe činného a jalového výkonu v samotnom transformátore. Transformátor je možné použiť k transformácii striedavého elektrického výkonu jednofázového i viacfázového. ([1], [5], [6], [7])

5.1 Princíp činnosti transformátorov

Transformátor je v porovnaní s ostatnými el. strojmi konštrukčne pomerne jednoducho vybavený. Základ je tvorený železným jadrom (vyhotovením sa budem podrobnejšie zaoberať v stati 5.5), ktoré je navinuté primárnym a sekundárnym vinutím tak, ako je naznačené na obr.5-1



Obr. 5-1 Model ideálneho transformátora (Zdroj: LITERATÚRA[7])

Obrázok poslúži k vysvetleniu základného princípu činnosti. Na svorky primárneho vinutia sa pripojí striedavého napätia. To spôsobí pretekanie prúdu primárnym vinutím s N_1 závitmi, kde sa podľa vzťahu

$$U_{i1} = L_1 . \frac{di_1}{dt} \ (\text{V};\text{-},\text{Vs},\text{s}) \tag{5.1}$$

indukuje napätie U_{i1}. Iné vyjadrenie pre U_{i1} je nasledovné:

$$U_{i1} = N_1 . \frac{d\Phi}{dt} \ (\text{V};\text{-},\text{Vs},\text{s}) \tag{5.2}$$

Pravá strana tohto vzťahu je dôsledkom, to znamená, že musí dôjsť k zmene magnetického toku. Cez železné jadro preženie magnetický tok Φ, ktorý je premenlivý. Na zmenu Φ reaguje sekundárna cievka, v ktorej sa indukuje napätie podľa

$$U_{i2} = N_2 . \frac{d\Phi}{dt} \text{ (V;-,Vs,s)} \tag{5.3}$$

a následne preteká cez sekundárne vinutie a impedanciu prúd I_2. Smer prúdu má taký smer, aby svojim účinkom pôsobil proti zmene, ktorá ho vyvolala. Posledná veta je vyjadrením Lencovho zákona. Ak je zmena, ktorá vyvolala indukciu prúdu zmenšovanie magnetického toku v železnom jadre, dôsledkom bude prúd pretekajúci v takom smere, v akom bude podporovať zväčšenie Φ.

V prípade harmonických priebehov napätí transformátorov môžeme napísať pre efektívne hodnoty indukovaných napätí:

$$U_{i1} = 4{,}44 . \Phi_m . f_1 . N_1 \text{ (V;Vs,Hz,-)} \tag{5.4}$$

$$U_{i2} = 4{,}44 . \Phi_m . f_2 . N_2 \text{ (V; Vs,Hz,-)} \tag{5.5}$$

Rovnice (5.4)a(5.5) sú dôležité z hľadiska dimenzovania.

Podelením vzťahov (5.4)a(5.5) dostávame výsledok

$$\frac{U_{i1}}{U_{i2}} = \frac{N_1}{N_2} = k \text{ (V,V;-,-;-)} \tag{5.6}$$

kde k značí prevod transformátora. Tento vzťah slovne značí, že veľkosť indukovaného napätia na danej strane je lineárne závislá na počte závitov tej strany.

Pomer prúdov sa rovná prevrátenej hodnote prevodu.

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{U_2}{U_1} = \frac{N_2}{N_1} = \frac{1}{k} \tag{5.7}$$

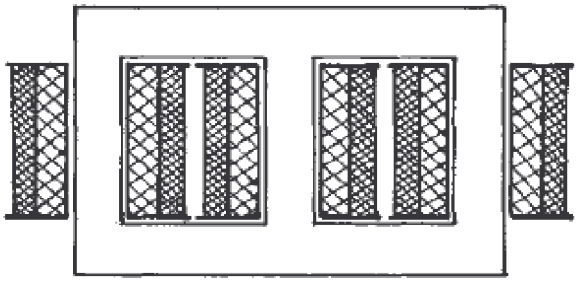
Z pomeru vyplýva, že:

$$I_1 . N_1 = I_2 . N_2 \tag{5.8}$$

čo znamená, že na oboch stranách sú rovnaké prietoky, ako aj to, že pri rovnakom zaťažení dostaneme pre obidve strany rovnaké váhy vodičov. O koľko menej je závitov na strane nižšieho napätie, presne o to väčší prierez je potrebný. ([7])

5.2 Trojfázový transformátor

Distribučné transformátory sa vyrábajú v trojfázovom vyhotovení, keďže distribučná sieť je trojfázová. Trojfázové transformátory sa dajú predstaviť ako tri jednofázové transformátory. Najčastejšie sa vyrábajú jadrové transformátory, ktorého stĺpy sú v 1 rovine, ako to naznačuje obr.5-2.



Obr. 5-2 Trojfázový jadrový transformátor (Zdroj: LITERATÚRA[7])

Z takéhoto umiestnenia vyplýva nerovnaká dĺžka stredných indukčných čiar pre stredný stĺp a pre krajné stĺpy, čoho dôsledkom sú rozličné magnetizačné prúdy(magnetizačný prúd predstavuje prúd potrebný na vytvorenie magnetického toku). Nesymetria sa dá odstrániť použitím stredného stĺpu s menším prierezom.

Ako je z obrázku zrejmé, na jednom stĺpe sa nachádza primárne a sekundárne vinutie jednej fázy. Nesmú byť umiestnené na rôznych stĺpoch, pretože by sa anulovali magnetické toky. Nebola by splnená podmienka funkčnosti.

Pre správanie sa takéhoto transformátora v elektrizačnej sústave je nevyhnutné dbať na spôsob zapojenia vinutí. To je problematika nasledujúceho pododdielu.

5.2.1 Zapojenie vinutí. Hodinový uhol.

Vinutia trojfázových transformátorov môžu byť zapojené tromi rôznymi spôsobmi:

- zapojenie do hviezdy, značenie: λ, Y ,
- zapojenie do trojuholníka , značenie Δ , D ,
- zapojenie do lomenej hviezdy, značenie Z.

V prípade, že vstupné a výstupné vinutia trojfázového transformátora sú spojené rovnakým spôsobom (λ , λ ;Δ, Δ) , sú linkové napätia na oboch stranách vo fáze. Ak sú zapojenia rozdielne, medzi linkovými napätiami vstupného a výstupného vinutia je fázový posuv 30°. Ďalej je dôležité prihliadať na to, či sú na svorkovnicu transformátora pripojené začiatky alebo konce vinutia výstupného napätia. Fázový posuv medzi rovnako označenými svorkami vstupného a výstupného vinutia sa udáva tzv. hodinovým uhlom. Platí pre hodinový uhol, že hodina = 30°.

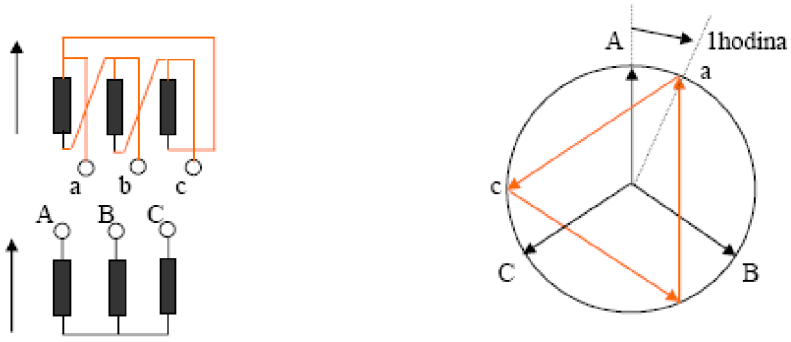
Zapojenie vinutí a hodinový uhol je určujúcou vlastnosťou paralelne pracujúcich transformátorov.

Táto vlastnosť sa vyjadruje symbolom trojznakovým symbolom:

- spojenie vinutia vyššieho napätia – veľké písmená Y,D,Z,
- spojenie vinutia nižšieho napätia – malé písmená y,d,z,

- hodinový uhol v hodinách 0, 1, 2, 4, 5, 6 ,7, 8, 10,11,

Napríklad Yd1 značí, že vinutie vyššieho napätia je spojené do hviezdy, vinutie nižšieho napätia je spojené do trojuholníka a fázový rozdiel meraný od fázy vyššieho napätia k rovnakej fáze nižšieho napätia je 1 x 30° = 30°. Toto zapojenie demonštruje nasledujúci obrázok. Poznamenávam, že šípky smerujú od začiatkov ku koncom vinutí.



Obr. 5-3 Zapojenie vinutia Yd1 transformátora a fázorový diagram napätí. (Zdroj: LITERATÚRA[7])

Hodinový uhol dostanem, ak fázu A cievky vyššieho napätia posuniem do polohy 12 na hodinkách a zodpovedajúci vektor fázy nn ukazuje číslo, ktoré je totožné s hodinovým uhlom. Hodinový uhol sa najlepšie určí z vektorového diagramu vzťahovaného na danú schému zapojenia, v ktorej si označíme zmysly indukovaných napätí, príp. zmysli vinutia cievok. Ak je zmysel rovnaký, aj smery šípok sú rovnaké. V opačnom prípade sú protibežné, posunuté o 6 hodín. Uhol medzi vektormi tej istej fázy na vn a nn strane udáva hodinový uhol.

Ak by som chcel kráčať opačným smerom, t.j. zo zadaného symbolu definujúceho vinutie (vn, nn a hodinový uhol) zvoliť príslušné zapojenie, postupoval by som takto:

> platí predstava, že okraj kruhu, ktorý obkolesuje vektorový diagram, prislúcha svorkovnici. To znamená, že je postačujúce sledovať smer šípky daného vektora napätia.
>
> Tá časť vektora, kde sa končí šípka, sa uvažuje za koniec vinutia, naopak, za začiatok vinutia sa zohľadňuje začiatok šípky.

Pri riešení trojfázových transformátorov budem počítať s jednofázovým modelom. Pri výpočtoch použijem fázové hodnoty napätia a prúdu. Musím však hľadieť na to, že všeobecne je transformátor zadávaný nominálnymi hodnotami. A nominálne hodnoty sú združené hodnoty. Tak napríklad pri zapojení niektorej strany transformátora do trojuholníka počítame so zadanými hodnotami, pretože pri tomto zapojení sú združené hodnoty súčasne aj fázovými hodnotami. Pre zapojenie do hviezdy musím zadané napätie vydeliť hodnotou √3, aby som pracoval s fázovou hodnotou. ([7])

Nasledovná tabuľka zahŕňa prepočtové koeficienty pre všetky varianty zapojenia.

Tab. 5-1 Prepočtové koeficienty medzi nominálnymi a fázovými hodnotami (Zdroj: LITERATÚRA[7]

Spojení vinutí		Napětí			proudy		
Vstupní v.	Výstupní v.	U_1	U_2	U_1/U_2	I_1	I_2	I_1/I_2
Y	y	$\sqrt{3}U_{1f}$	$\sqrt{3}U_{2f}$	N_1/N_2	I_{1f}	I_{2f}	N_2/N_1
D	D	U_{1f}	U_{2f}	N_1/N_2	$\sqrt{3}I_{1f}$	$\sqrt{3}I_{2f}$	N_2/N_1
Y	D	$\sqrt{3}U_{1f}$	U_{2f}	$\sqrt{3}N_1/N_2$	I_{1f}	$\sqrt{3}I_{2f}$	$N_2/(\sqrt{3}N_1)$
D	Y	U_{1f}	$\sqrt{3}U_{2f}$	$N_1/(\sqrt{3}N_2)$	$\sqrt{3}I_{1f}$	I_{2f}	$\sqrt{3}N_2/N_1$
D	Z	U_{1f}	$3U_{2f}/2$	$2N_1/(3N_2)$	$\sqrt{3}I_{1f}$	I_{2f}	$3N_2/(2N_1)$
Y	z	$\sqrt{3}U_{1f}$	$3U_{2f}/2$	$2N_1/(3N_2)$	I_{1f}	I_{2f}	$\sqrt{3}N_2/(2N_1)$

5.2.2 Paralelná spolupráca. Podmienky paralelnej spolupráce.

Pri potrebe zabezpečenia dodávky elektrickej energie z viacerých zdrojov sa realizuje riešenie pomocou viacerých transformátorov napájajúcich jedno odberné miesto. Stupeň dodávky elektrickej energie je jedným z možných dôvodov potreby paralelnej spolupráce. Existuje však mnoho iných prípadov, keď je potrebné pripojiť k jestvujúcemu transformátoru ďalší s vyhovujúcimi parametrami, aby sa uspokojili výkonové požiadavky po rozšírení výroby priemyselného závodu.

Ako som už naznačil v predchádzajúcej stati, existujú podmienky pre možnosť paralelnej spolupráce transformátorov. Tie sú nasledovné:

- rovnaký hodinový uhol,
- rovnaké menovité hodnoty vstupného a výstupného napätia,
- rovnaké napätie nakrátko, aby sa zaťaženie transformátorov rozdelilo úmerne ich menovitým výkonom,
- musia byť spojené zodpovedajúcimi fázami.

V prípade nedodržania týchto podmienok dochádza k rozdielu potenciálov medzi vinutiami transformátorov, keďže priebehy napätí sa neprekrývajú. Vznikajú vyrovnávacie prúdy. O ich závažnosti asi netreba polemizovať, ak uvediem, že rozdiel okamžitých hodnôt napätia je hnacou silou a odpor vinutia je brzdou. Takýmto prípadom sa musí predchádzať dôkladným výberom transformátorov.

5.3 Náhradná schéma transformátora a prepočet

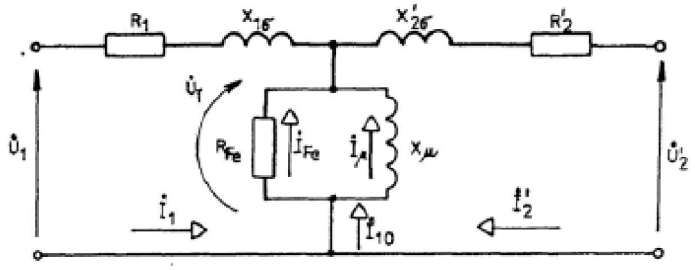
Transformátor sa z elektrického hľadiska skladá z dvoch častí, a to z primárnej a sekundárnej. Logika diktuje, že sa nedá nakresliť náhradná schéma ako jeden celok. Existuje však výnimka. A tou je rovnaké napätie na svorkách primárneho a sekundárneho vinutia. Aj keď distribučné transformátory nemajú túto vlastnosť (negovala by sa ich hlavná funkcia), dá sa to početne zariadiť. Proces sa volá prepočítanie transformátora. Napätie na strane, ktorú prepočítavam, sa zmení lineárne s hodnotou prevodu k, hodnoty prvkov náhradnej schémy sa zmenia kvadraticky s veľkosťou k. Tento aparát bude neskôr hlbšie popísaný. Pre transformátor sa aplikujú dve náhradné schémy.

Jedná sa o:

- Gamma (Γ),
- π.

V tejto práci bude najprv rozanalyzované správanie transformátora pri uvážení náhrady dvojbranom π. V stati 5.6 sa potom zhrnú vzťahy pre článok Γ.

Náhradná schéma π prepočítaného transformátora na primárnu stranu je nasledovná:



Obr. 5-4 Náhradná schéma transformátora. (Zdroj: LITERATÚRA[7])

Uvedené veličiny značia:

R_1 – ohmický odpor vstupného vinutia,

$X_{1\sigma}$ – rozptylová reaktancia vstupného vinutia, zahŕňa tú skutočnosť, že celý magnetický tok sa neuzatvorí cez železné jadro, v prípade veľkého nasýtenia sa časť uzatvorí vzduchom, a teda rastie magnetický odpor,

X_μ – magnetizačná reaktancia,

$X'_{2\sigma}$ – prepočítaná rozptylová reaktancia výstupného vinutia,

R'_2 – prepočítaný ohmický odpor výstupného vinutia,

R_{FE} – odpor nahradzujúci straty v železe.

5.3.1 Prepočítanie parametrov transformátora

Výber strany, na ktorú sa bude prepočítavať, je voľný. Musia sa však brať do úvahy niektoré skutočnosti. A to:

« v prvom rade sa zvolí napätie, ku ktorému sa prispôsobí druhé napätie. Uváži sa, že strana nn je konštantná, tak sa napätie strany vn podelí hodnotou prevodu a dostaneme sa na úroveň napätia strany nn.

Otázkou zostáva, ktoré prvky náhradnej schémy sa budú prepočítavať, keď sa snažím o prepočet na stranu nn. Odpoveď je nasledovná:

« parametre, ktoré sa zistili pri napätí nn sú skutočné a nepodliehajú prepočtu. Napríklad priečna vetva náhradnej schémy sa vypočítava z údajov, ktoré boli nadobudnuté pri meraní naprázdno. Meranie naprázdno sa obyčajne realizuje na strane nn.

« Parametre, ktoré sa zistili pri napätí vn sa musia prepočítať. Na základe merania nakrátko, ktoré sa obvykle realizuje na strane vn, zisťujem eparametre pozdĺžnej vetvy náhradnej schémy. Z toho vyplývajúc parametre pozdĺžnej vetvy na strane vn sú skutočné, na strane nn neskutočné. Preto sa musí aplikovať prepočet na stranu nn. Vhodne sa použije kvadrát prevodu, aby sme sa dopracovali k žiadanému cieľu.

Opísaný postup bude v neskoršej fáze predvedený na príklade.

Ako už bolo spomenuté, pre napätie platí

$$U_2' = U_1 = k.U_2 \tag{5.9}$$

$$U_1' = U_2 = \frac{U_1}{k} \tag{5.10}$$

Pre prepočítavania ohmických odporov a reaktancií je situácia iná. Vychádza sa z toho, že straty pri prepočítanom a skutočnom odpore musia byť také isté, aké boli pri skutočnom odpore a prúde.

$$I_2'^2.R_2' = I_2^2.R_2 \tag{5.11}$$

Úpravou vzťahu 5.11 dostávame:

$$R_2' = R_2.\frac{I_2^2}{I_2'^2} = R_2.\left(\frac{N_1}{N_2}\right)^2 = R_2.k^2 \tag{5.12}$$

$$R_1' = \frac{R_1}{k^2} \tag{5.13}$$

Podobne pre prepočet induktívnych odporov bude platiť vzťah:

$$X_{\sigma 2}' = X_{\sigma 2}.k^2 \tag{5.14}$$

$$X'_{\sigma 1} = \frac{X_{\sigma 1}}{k^2} \tag{5.15}$$

5.4 Správanie transformátora pri rozličnom zaťažení, fázorové diagramy

Práve sledovanie zmeny elektrických stavov pri rozličnej záťaži je hlavným predmetom skúmania tejto semestrálnej práce. Okrem klasického prípadu zaťaženia sa načrtnú aj stavy nakrátko a naprázdno. Meranie týchto stavov nám umožňuje počítať parametre náhradnej schémy.

5.4.1 Transformátor pri prevádzkovom zaťažení

Predpokladáme, že je transformátor zaťažený, t.j. na svorky výstupného vinutia je pripojený určitý odpor. Týmto vinutím potečie prúd. Napätie vstupnej strany má konštantnú hodnotu, rovnú súčtu elektromotorickej sily a úbytku napätia na odpore primárneho vinutia. V činnosti naprázdno je magnetický tok Φ vyvolaný magnetomotorickou silou(ampérzávitmi) $I_\mu.N_1$. Pri zaťažení vznikne v transformátore dodatočná magnetomotorická sil rovná $I_2.N_2$ pôsobiaca proti pôvodnému magnetickému toku. Pretože magnetický tok má konštantnú veľkosť, musí sa v magnetomotorickej sile vstupného vinutia objaviť zložka rovná $I_2.N_2$,kompenzujúca v každom okamihu vplyv ampérzávitov sekundárnej strany $I_2.N_2$. Z toho vyplýva, každému vzrastu výstupného prúdu musí zodpovedať vzrast primárneho prúdu tak, aby ostala zložka na vytvorenie magnetického toku. ([5])

Z predchádzajúcich úvah vyplynulo, že k vytvoreniu magnetického toku Φ je potrebný magnetizačný prúd I_μ. Má charakter jalového prúdu, pretože je vo fázi s magnetizačným tokom Φ, ktorý je oneskorený oproti napätiu U_1 o uhol $\pi/2$. So vznikom striedavého magnetického toku vo feromagnetickom obvode sú spojené straty v železe, ktorého krytie musí transformátor zabezpečiť prúdom I_{FE}, ktorý je vo fáze s U_1.

Výsledok oboch prúdov je súčet fázorov:

$$\overline{I_0} = \overline{I_\mu} + \overline{I_{FE}} \tag{5.16}$$

V tomto vzťahu je hodnota I_{FE} zanedbateľná, práve preto sa niekedy uvažuje o rovnosti ostatných 2 členov. Taktiež je zrejmé z predchádzajúcich úvah:

$$\overline{I_\mu} = \overline{I_1} + \overline{I'_2} \tag{5.17}$$

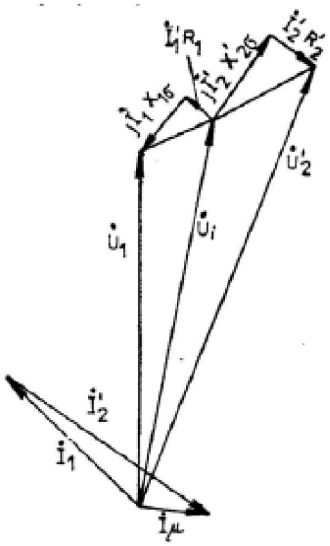
Po tomto poznatku sa môžem venovať konštrukcii fázorových diagramov pre rôzne zaťaženia, ktoré odhalia, akým spôsobom sa bude vyvíjať napätie na sekundárnej strane.

Pri zhotovovaní fázorového diagramu sa vychádza z fázora napätia $\overline{U'_2}$. K nemu sa zostrojí prúd určitej veľkosti, fázovo posunutý. Ak sa pričítajú k napätiu $\overline{U'_2}$ úbytky napätí: činné a jalové (sú vo fáze, resp. kolmé na $\overline{I'_2}$), dostaneme fázor indukovaného

napätia. $\overline{U_i}$ je indukované hlavným tokom Φ, ktorý ju (a teda aj $\overline{I_0}$) predbieha o uhol π/2. $\overline{I_0}$ alebo po zanedbaní $\overline{I_{FE}}$, platí pre $\overline{I_\mu}$ vzťah (5.17). Teraz sa pričítajú k indukovanému napätiu úbytky napätí na primárnej strane a dostanem napätie $\overline{U_1}$.

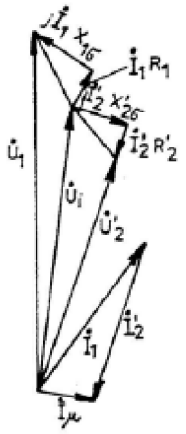
Je potrebné poznamenať, že prúdy sú nakreslené v spotrebiteľskom systéme. To znamená, že prúd tečie z miesta plusového symbolu do mínusu. Preto napríklad fázový posun pri zaťažení čistým ohmickým odporom medzi napätím a prúdom na sekundárnej strane je 180°. Ak by sa bral do úvahy generátorický režim, fázový posun by činil 0°.

Fázorové diagramy niektorých typov zaťažení:



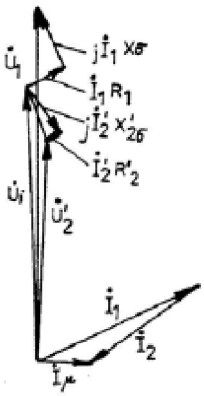
Obr. 5-5 Fázorový diagram transformátora zaťaženého kapacitnou záťažou cos φ= 0,30 (Zdroj: LITERATÚRA [7])

Transformátor napájajúci záťaž kapacitného charakteru sa správa obdobne ako to ukazuje fázorový diagram na obr. 5-5. Prúd predbieha napätie na primárnej aj sekundárnej strane. Tento stav spôsobuje, že úbytky napätí na prvkoch náhradnej schémy budú záporné. To znamená, že kapacitné zaťaženie spôsobuje napäťové zisky. Reálny napäťový pomer nekorešponduje s týmto fázorovým diagramom, keďže úbytky napätí sú v nepomere s reálnymi. Účelom je však v tejto fáze názornosť.



Obr. 5-6 Fázorový diagram transformátora zaťaženého ohmickým odporom. (Zdroj: LITERATÚRA[7])

Pre zaťaženie ohmickým odporom je príznačný nulový (resp. 180°) fázový posun medzi napätím a prúdom na svorkách sekundárneho vinutia. Badateľným vstupom do transformátora je určitá miera jalovej energie, ktorá sa spotrebuje na vytvorenie magnetického poľa a pokrytie strát rozptylovou reaktanciou. A tá badateľnosť spočíva v $\cos\varphi_1$ induktívneho charakteru. Samozrejme je prítomný aj jav poklesu sekundárneho napätia oproti primárnemu. Ten pokles je spôsobený stratami v pozdĺžnej vetve náhradnej schémy transformátora.



Obr. 5-7 Fázorový diagram transformátora zaťaženého záťažou cos φ= 0,60ind. (Zdroj: LITERATÚRA[7])

Indukčný charakter záťaže je charakteristický úbytkom napätia, ktorého dôvod je rovnaký ako v predchádzajúcom prípade(straty v pozdĺžnej vetve). A obdobne platí: $\varphi_1 > \varphi 2$. Rozdiel je ekvivalentný s jalovými stratami.

5.4.2 Transformátor naprázdno

Ak má transformátor rozpojené sekundárne vinutie, neodovzdáva žiadnu energiu, potom sa hovorí o stave naprázdno. Jej správanie je v takom prípade rovnaké ako pre klasickú tlmivku so železným jadrom. Ak sa zoberieme do úvahy ideálny prípad transformátora, ktorý nemá nijaké straty, dostávame jednoduchý obraz o napäťových

a magnetických pomeroch. Transformátor berie zo siete len magnetizačný prúd, ktorý je potrebný na vyvolanie magnetického toku. Tento prúd je fázovo zaostávajúci o 90° oproti napätiu.

Ak sa však uváži reálny stav, transformátor naprázdno bude odoberať aj činnú elektrickú energiu na pokrytie činných strát (straty vo vinutí transformátora a straty v železe – vírivé prúdy, hysterézne straty). V skutočnosti teda $\varphi < 90°$.

Po zhrnutí, transformátor naprázdno je spotrebiteľom jalovej energie a nepatrnej činnej energie. Takýto chod nemá svoje opodstatnenie, pretože na kompenzačné účely sa aplikuje tlmivka. Existuje však jedna nezanedbateľná skutočnosť, kvôli ktorej sa popisuje tento stav.

Výsledky z merania naprázdno sú vstupnými údajmi pri výpočtoch parametrov náhradnej schémy, konkrétne priečnej vetvy T- článku.

Meranie sa prevádza obyčajne zo strany nn. Merajú sa klasickým zapojením tri veličiny, a to: P_{10}, I_{10}, U_{10}.

Pri výpočte sa zanedbávajú prvky pozdĺžnej vetvy. Postupuje sa nasledovne:

$$\cos\varphi_{10} = \frac{P_{10}}{U_{10}.I_{10}} \tag{5.18}$$

$$I_{FE} = I_{10}.\cos\varphi \tag{5.19}$$

$$R_{FE} = \frac{U_{10}}{I_{FE}} \tag{5.20}$$

$$I_{\mu} = I_{10}.\sin\varphi \tag{5.21}$$

$$X_{\mu} = \frac{U_{10}}{I_{\mu}} \tag{5.22}$$

Ostáva poznamenať, že všetky hodnoty sa vzťahujú na jednu fázu. Pri trojfázových transformátoroch, ktoré majú meranú stranu zapojenú do hviezdy, namerané údaje budú združené a súčasne nefázové. Tento fakt treba ošetriť vhodným ponásobením konštantami. Algoritmus sa predvedie na modelovom príklade pre trojfázový transformátor v neskoršej stati.

5.4.3 Transformátor nakrátko

Stav nakrátko sa dosiahne, ak sa skratujú svorky jedného vinutia transformátora vodičom dostatočného prierezu. Takýto stav sa bežne využíva pri zváracích transformátoroch, ale v oblasti distribúcie elektrickej energie je pre nás meranie stavu

nakrátko druhým pilierom pre výpočet parametrov náhradnej schémy transformátora. Určujeme pomocou nej prvky pozdĺžnej vetvy.

Meranie nakrátko sa obyčajne prevádza zo strany vn. Zisťujú sa nasledovné tri veličiny: P_{1K}, I_{1K}, U_{1K}. Vďaka elektrickým stavom, ku ktorým dochádza pri stave nakrátko náhradná schéma môže bez spôsobenia relevantnej chyby podľahnúť zjednodušeniu. To pozostáva z vynechania priečnej vetvy. Prvky pozdĺžnej vetvy sa nahradia jedným spoločným prvkom a tým je impedancia Z_K. Ak by sa začala rozbaľovať, dostali by sme X_K a R_K, t.j. celkovú hodnotu reaktancie a činného odporu na pozdĺžnej vetve.

Pri určovaní sa postupuje nasledovne:

$$\cos\varphi_{1K} = \frac{P_{1K}}{U_{1K}.I_{1K}} \tag{5.23}$$

$$Z_K = \frac{U_{1K}}{I_{1K}} \tag{5.24}$$

$$R_K = \frac{P_{1K}}{I_{1K}^2} \tag{5.25}$$

$$X_K = \sqrt{Z_K^2 - R_K^2} \tag{5.26}$$

Keďže prvky považujeme za symetrické, bude platiť:

$$R_1 = R_2' = \frac{R_K}{2} \tag{5.27}$$

obdobne pre prvky reprezentujúce vplyv rozptylových reaktancií:

$$X_{1\sigma} = X_{2\sigma}' = \frac{X_K}{2} \tag{5.28}$$

Platí to isté ako pri počítaní z merania naprázdno. Všetky hodnoty sa vzťahujú na jednu fázu. Pri trojfázových transformátoroch, ktoré majú meranú stranu zapojenú do hviezdy, namerané údaje budú združené a súčasne nefázové. Tento fakt treba ošetriť vhodným ponásobením konštantami. Algoritmus sa predvedie na modelovom príklade pre trojfázový transformátor v nasledujúcej kapitole.

5.5 Ukážkový výpočet parametrov náhradnej schémy 3f transformátora

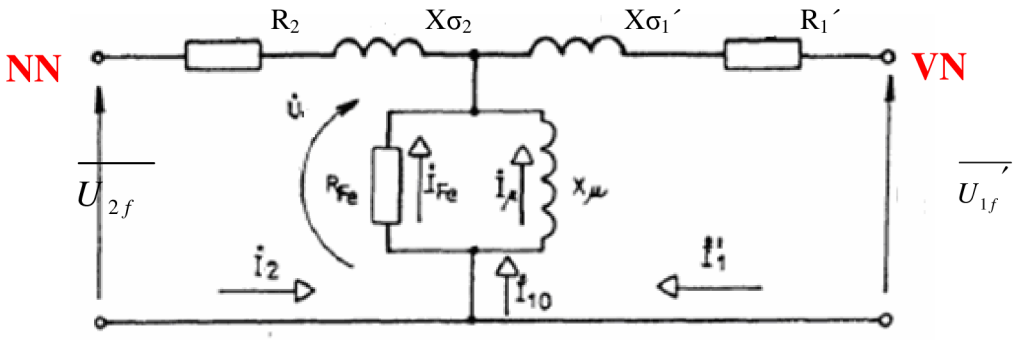
Zadanie

Trojfázový transformátor s výkonom 130kVA s menovitými hodnotami napätí 6000V/400V v zapojení Dy má tieto hodnoty z merania nakrátko a naprázdno:

- Meranie naprázdno realizované zo strany nn: P_{10} = 1800W, I_{10} = 15A, U_{10} = 400V.
- Meranie nakrátko realizované zo strany vn: P_{1K} = 2550W, I_{1K} = 12,5A, U_{1K} = 310V.

Vypočítajte parametre náhradnej schémy prepočítané na stranu nn.

Náhradná schéma



Obr. 5-8 Náhradná schéma pre príklad (Zdroj: LITERATÚRA[7])

Náhradná schéma sa nakreslila takým spôsobom, že do ľavej časti je situovaná časť obvodu, na ktorú sa prepočítava (nízkonapäťová časť).

Poznámka k zapojeniu vinutí transformátora a k výpočtovým dôsledkom:

- Pre výpočet parametrov trojfázového transformátora platí, že sa počíta obdobne ako pre jednofázový transformátor, ale výsledok sa násobí konštantou 3.
- Pre výpočet výsledkov sa používajú fázové hodnoty napätia a prúdu.
- NN strana je zapojená do hviezdy. Zadaná menovitá hodnota napätia je združená, a nie fázová hodnota. Preto sa musí deliť menovitá hodnota konštantou $\sqrt{3}$. Menovitá hodnota prúdu je fázová hodnota.

« VN strana je zapojená do trojuholníka. Platí, že menovitá hodnota napätia je fázová hodnota. Fázová hodnota prúdu sa rovná podielu menovitej hodnoty prúdu a konštanty $\sqrt{3}$.

Výpočet parametrov priečnej vetvy

Parametre sa počítajú z výsledkov merania naprázdno. Výpočet je nasledovný:

$$P_{20} = 3.\frac{U_{2f}^2}{R_{FE}} = 3.\frac{\frac{U_2^2}{(\sqrt{3})^2}}{R_{FE}} \tag{5.29}$$

$$R_{FE} = \frac{U_2^2}{P_{20}} = \frac{400^2}{1800} = 88{,}88\Omega \tag{5.30}$$

$$I_{FE} = \frac{U_{2f}}{R_{FE}} = \frac{\frac{400}{\sqrt{3}}}{88{,}88} = 2{,}59A \tag{5.31}$$

$$I_{\mu} = \sqrt{I_0^2 - I_{FE}^2} = \sqrt{15^2 - 2{,}59^2} = 14{,}77A \tag{5.32}$$

$$X_{\mu} = \frac{U_2}{I_{\mu}} = \frac{\frac{400}{\sqrt{3}}}{14{,}77} = 15{,}63\Omega \tag{5.33}$$

Poznámka: Aplikovateľný by bol aj model výpočtu ukázaný v kapitole 5.4.2

Výpočet parametrov pozdĺžnej vetvy

Rátam sa s tým, že uvedená hodnota prúdu pri meraní nakrátko je menovitá hodnota. Ale môžeme sa o tom presvedčiť:

$$S = 3.U_{1f}.I_{1f} \tag{5.34}$$

$$I_{1f} = \frac{S}{3.U_{1f}} = \frac{130000}{3.6000} = 7{,}2A \tag{5.35}$$

Výsledok poukázal na pravdivosť predchádzajúceho výroku, keďže fázová hodnota prúdu je 7,2A, ale po prenásobení konštantou $\sqrt{3}$ dostávame menovitú hodnotu, čo je 12,5A.

$$P_{1K} = 3.R_{1K}.I_{1f}^2 \tag{5.36}$$

$$R_{1K} = \frac{P_{1K}}{I_{1f}^2} = \frac{2550}{7,2^2} = 16,32\Omega \tag{5.37}$$

$$Z_{1K} = \frac{U_{1K}}{I_{1f}} = \frac{310}{7,2} = 42,95\Omega \tag{5.37}$$

$$X_{1K} = \sqrt{Z_{1K}^2 - R_{1K}^2} = \sqrt{42,95^2 - 16,32^2} = 39,73\Omega \tag{5.38}$$

Teraz je nutný prepočet, pretože sme počítali z údajov získaných pri meraní nakrátko zo strany VN.

$$R_{2K} = \frac{R_{1K}}{k^2} = \frac{16,32}{\left(\frac{\frac{6000}{400}}{\sqrt{3}}\right)^2} = 0,024\Omega \tag{5.39}$$

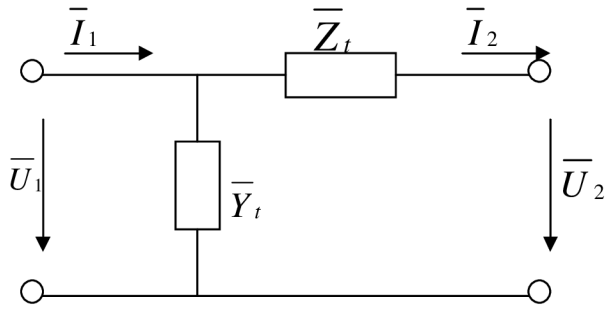
$$R_2 = R_1' = \frac{R_{2K}}{2} = \frac{0,024}{2} = 0,012\Omega \tag{5.40}$$

$$X_{2K} = \frac{X_{1K}}{k^2} = \frac{39,73}{\left(\frac{\frac{6000}{400}}{\sqrt{3}}\right)^2} = 0,059\Omega \tag{5.41}$$

$$X_{\sigma 2} = X_{\sigma 1}' = \frac{X_{2K}}{2} = \frac{0,059}{2} = 0,0295\Omega \tag{5.42}$$

5.6 Náhrada dvojbranom Γ

Literatúra [4] uvádza nasledovné. Náhradná schéma je nasledovná:



Obr. 5-9 Náhrada dvojbranom Γ.

Článok má v pozdĺžnom smere impedanciu Zt, ktorá reprezentuje rozptylové toky vinutí a rezistancie. V priečnom smere sa berie do úvahy admitancia Yt, ktorá modeluje magnetizačný prúd.

S ohľadom na to, že impedancie v priečnom a pozdĺžnom smere sú značne rozdielne (Zt >> 1/Yt), je impedancia Zt približne rovnaká ako impedancia pri chode nakrátko pri menovitom prúde. 1/Yt sa približne rovná impedancii naprázdno pri menovitom napätí.

Tieto hodnoty sa dajú určiť zo štítkových údajov (ide o obdobu predvedeného pre článok π):

1. S_n › menovitý výkon
2. e_k › pomerná hodnota napätia nakrátko vzťažená k menovitému napätiu
3. ΔP_{Fe} › straty výkonu v železe (výkon naprázdno)
4. ΔP_{Cu} › straty výkonu vo vinutí (výkon nakrátko)
5. i_0 › pomerná hodnota prúdu naprázdno vzťažená k menovitému prúdu
6. U_{n1}, U_{n2} › menovité hodnoty primárneho a sekundárneho napätia

Reálna zložka pozdĺžnej impedancie predstavuje rezistanciu oboch vinutí R_t :

$$\Delta P_{Cu} = 3.R_t.I_n^2 = 3.R_t.\left(\frac{S_n}{\sqrt{3}.U_n}\right)^2 \tag{5.43}$$

$$R_t = \frac{\Delta P_{Cu}.U_n^2}{S_n^2} \tag{5.44}$$

Imaginárna zložka pozdĺžnej impedancie predstavuje rozptylovú reaktanciu oboch vinutí.

Platí pre ňu vzťah:

$$X_t = \frac{U_n^2}{S_n} \cdot \sqrt{e_k^2 - \left(\frac{\Delta P_{Cu}}{S_n} \right)^2} \tag{5.45}$$

Reálna zložka priečnej admitancie G_t zahŕňa straty v magnetickom obvode vírivými prúdmi a magnetickou hysteréziou pri menovitom napätí a frekvencii 50 Hz.

$$\Delta P_{Fe} = 3.G_t.U_n^2 \tag{5.46}$$

$$G_t = \frac{\Delta P_{Fe}}{U_n^2} \tag{5.47}$$

Imaginárna zložka priečnej admitancie B_t zahŕňa jalový výkon potrebný k magnetizácii pri menovitom napätí:

$$B_t = \frac{1}{U_n^2} \cdot \sqrt{(S_n.i_0)^2 - \Delta P_{Fe}^2} \tag{5.48}$$

Za napätie U_n dosadzujeme primárne alebo sekundárnu menovitú hodnotu podľa toho, na ktorú z týchto napäťových úrovní hodlám prepočítavať.

5.7 Straty a účinnosť

V súčasnosti je otázka udržiavania stavu životného prostredia viac než aktuálnou otázkou. Spomínané je najmä globálne otepľovanie. Skleníkový efekt je spôsobovaný enormným zvyšovaním obsahu oxidu uhličitého v atmosfére. K značnej produkcii CO_2 dochádza aj pri výrobe elektrickej energie. Z toho vyplývajúc úspora elektrickej energie znamená aj zníženie produkcie CO_2. Veľké straty vznikajú aj pri procese distribúcie elektrickej energie a k týmto stratám prispievajú aj transformátory. Len v Európe sa odhadujú straty elektrickej energie transformátorov na 50TWh za rok. Pre názornosť tohto čísla, ročná spotreba elektrickej energie sa na Slovensku pohybuje okolo hodnoty 25TWh.

Preto je dôležité definovať transformátor z hľadiska stratovosti a podporovať zlepšovanie.

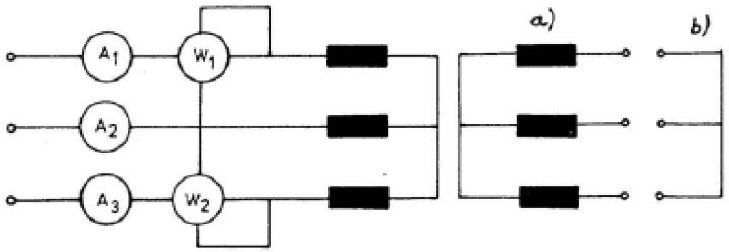
Straty transformátora sa rozdeľujú na [1]:

- Straty naprázdno vznikajúce v materiáli magnetického jadra. Do tejto skupiny patria hysterézne straty (úmerné frekvencii) a straty vírivými prúdmi (úmerné kvadrátu frekvencie). Tvoria hlavný podiel na stratách transformátora, preto technológia výrobného procesu rešpektuje materiály a ich uloženie prispievajúce k znižovaniu strát naprázdno. Tieto straty sú činného charakteru, preto sa v náhradnej schéme nahradzujú prvkom R_{FE}.
- Straty nakrátko alebo Joulove straty pri prechode prúdu vinutiami. Taktiež znamenajú straty činného výkonu.

« Dodatočné straty sú hlavne straty vírivými prúdmi vo vinutí a v konštrukčných častiach blízko vinutia So stúpajúcou teplotou klesajú.. Sú to straty spôsobené rozptylovými tokmi a majú jalový charakter. Účinok dodatočných strát je o to väčší, čím sú železné časti bližšie k jadru a vinutiu transformátora. Závisia od výkonu transformátora. Tieto straty tvoria asi 2% zo strát nakrátko, pri menších transformátoroch sa tento parameter môže vyšplhať na hodnotu 10 – 30% zo strát nakrátko. Na presné určovanie tejto hodnoty sa používajú tabuľky.

« Straty v dielektriku. Dielektrickými stratami nazývame tú časť energie, ktorá sa rozptýli v dielektriku pri pôsobení elektrického poľa a zapríčiňuje jej zohriatie. Do úvahy prichádzajú najmä pri vysokonapäťových transformátoroch, kde sú elektrické polia s vysokým gradientom. Tieto straty sú v porovnaní s ostatnými nepatrné a zanedbávame ich.

Meranie celkových strát prebieha nasledovným spôsobom [7]. Použije sa meracie zapojenie naznačené v ďalšom obrázku.



Obr. 5-10 Schéma zapojenia pre meranie stavu a)naprázdno, b) nakrátko. (Zdroj: LITERATÚRA[7])

Celkové straty určíme z merania naprázdno a nakrátko. Celkové straty sú zložené z týchto dielčch :

$$\Delta P = \Delta P_0 + \Delta P_K + \Delta P_d \tag{5.43}$$

kde
$_{\Delta}P_0$ – straty naprázdno pri menovitom napätí,
$_{\Delta}P_K$ – straty nakrátko pri menovitom prúde,
$_{\Delta}P_0$ – dodatočné straty.

Postup pri meraní je taký, že si v prvej fáze sa merajú odpory vinutí R_1, R_2. Z merania naprázdno sa vyvodzuje hodnota strát v železe podľa vzťahu:

$$\Delta P_{FE} = P_{10} - \Delta P_{10} \tag{5.44}$$

kde
P_{10} – príkon transformátora naprázdno ,
$_{\Delta}P_{10}$ – Joulove straty pri stave naprázdno, rovnajú sa

$$\Delta P_{10} = 3.R_{10}.I_{10}^2 \tag{5.45}$$

Z merania stavu nakrátko sa odvodzujú straty vo vinutí a dodatočné straty. Straty nakrátko $_{\Delta}P_{1K}$ – straty sa rovnajú súčtu Joulových strát $_{\Delta}P_{JK}$ a dodatočných strát $_{\Delta}P_{d}$. Joulove straty majú nasledovný vzťah pre výpočet:

$$\Delta P_{JK} = 3.R_1.I_1^2 + 3.R_2.I_2^2 = 3.(R_1 + R_2').I_1^2 + 3.(R_1' + R_2).I_2^2 \tag{5.46}$$

Straty s teplotou stúpajú, preto ak chceme odmerať reálny prevádzkový stav, musím použiť prepočítanie pomocou konštanty. Matematická operácia pre prepočet strát, ktoré prislúchajú teplote napr. 70°C, je nasledovná:

$$\Delta P_{J70} = \Delta P_{Jt1}.\frac{235+70}{235+t_1} \tag{5.47}$$

kde
$_{\Delta}P_{J70}$ – Joulove straty pre 70°C ,
$_{\Delta}P_{Jt1}$ – Joulove straty pre teplotu okolia ,
t_1 – teplota okolia.

Dodatočné straty sú

$$\Delta P_d = P_{1K} - \Delta P_{JK} \tag{5.48}$$

Skutočnosť, že so stúpajúcou teplotou dodatočné straty klesajú, je ošetrená nasledovným vzťahom:

$$\Delta P_{d70} = \Delta P_{Jt1}.\frac{235+t_1}{235+70} \tag{5.49}$$

Poznamenávam, že teplota 70°C slúži iba pre názornosť, reprezentuje teplotu t_2.

Celkové straty transformátora:

$$\Delta P = \Delta P_{FE} + \Delta P_{Jt2} + \Delta P_{dt2} \tag{5.50}$$

Pre dosahovanie porovnateľnosti iných druhov transformátorov sa zavádza pojem účinnosť. Účinnosť transformátorov je najväčšia spomedzi všetkých elektrických strojov.

Účinnosť je definovaná ako pomer výkonu, ktorý je daný vzťahom $mU_2I_2cos\varphi_2$ k príkonu $mU_1I_1cos\varphi_1$ (súčet výkonu a strát), kde m je počet fáz a hodnoty prúdu a napätia sú fázové veličiny.

Účinnosť pre menovitý prúd I_{2n} je vyjadrená vzťahom:

$$\eta_{t2}(\%) = \frac{m.U_2.I_{2n}.\cos\varphi_2.100}{m.U_2.I_{2n}.\cos\varphi_2 + \Delta P_{FE} + \Delta P_{Jt2} + \Delta P_{dt2}} \tag{5.51}$$

Účinnosť transformátorov v súčasnosti konverguje k hodnote 98%. Uvedené meracie postupy a vzťahy sa čerpajú z literatúry [7].

5.8 Konštrukčné vyhotovenie

Transformátory sa vyrábajú v niekoľkých vyhotoveniach. Významné z historického hľadiska sú najmä olejové transformátory, nedávno prišli na trh suché transformátora, ktoré sú zaliate v epoxide. Novinkou sú amorfné transformátory, ktoré reflektujú požiadavku znižovania strát.

« Olejové transformátory

sú vyrábané hermeticky uzavreté – distribučné transformátory vo vlnových nádobách a výkonové transformátory v radiátorových nádobách. Chladiacim médiom je minerálny olej, silikónový olej alebo ekologické dielektrikum na báze esterov- MIDEL 7131. Magnetické obvody sú vyrábané z orientovaného plechu, skladané spôsobom step-lap.

« Suché transformátory

Klasické suché transformátory a suché transformátory s liatou izoláciou, ktoré spoločnosť vyrába už od roku 1969, sú ekologicky akceptovateľné - neohrozujú životné prostredie, majú bezpečnú prevádzku , minimálnu údržbu a prakticky neobmedzené možnosti inštalácie na mieste spotreby elektrickej energie.

Suché transformátory sú určené iba do vnútorného prostredia, suché transformátory s liatou izoláciu sa vyrábajú aj vo vyhotovení pre montáž do vonkajšieho prostredia.

« Amorfné transformátory

Amorfné transformátory majú magnetický obvod z amorfného kovu. Voči štandardným transformátorom. majú radikálne znížené straty naprázdno o 75% až 80 %.

Obr. 5-11 Amorfný transformátor (Zdroj: LITERATÚRA[2])

6 VÝPOČET ZMENY NAPÄTIA NA NN SVORKÁCH DISTRIBUČNÉHO TRANSFORMÁTORA VN/NN PRI ZMENE JEHO ZAŤAŽENIA

6.1 Zadanie

Priemyselný závod má tri transformátory, každý s menovitým výkonom S_n = 1,6MVA a prevodom p = 22/0,4kV. Závod je napájaný z trojfázového vedenia s menovitým napätím U_n = 22kV so zadanými parametrami z rozvodne 22kV, kde sa udržuje konštantné napätie U = 23,1kV. Určte, ako sa bude meniť napätie na svorkách nízkeho napätia transformátorov pri zmenách výkonu od chodu naprázdno do menovitého zaťaženia transformátorov. Účinník sa predpokladá konštantný a rovná sa 0,95.

Parametre transformátoru:

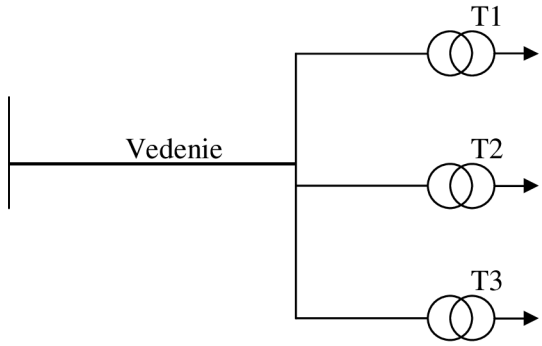
- S_n = 1600 kVA,
- U_{1n} = 22000V,
- U_{2n} = 400V,
- D/yn1,
- $u_{k\%}$ = 6,
- $i_{0\%}$ = 0,7,
- $_{\Delta}P_{Fe}$ = 2410W,
- $_{\Delta}P_{cu}$ = 16000W.

Odbočky transformátorov sa môžu nastaviť na hodnoty U_n x (0,95 – 1,00 – 1,05). To znamená: (20,9kV – 22kV – 23,1kV).

Parametre vedenia:

- R_k = 0,319 Ω/km,
- X_k = 0,36 Ω/km,
- l = 18 km,
- U_n = 22000V.

6.2 Schéma zodpovedajúca zadaniu, postup riešenia úlohy

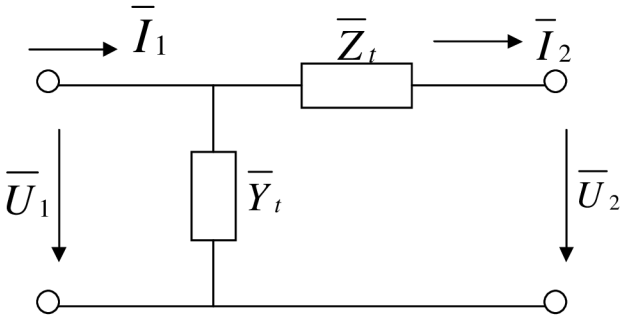


Obr. 6-1 Schéma riešenej úlohy

6.3 Riešenie

Náhrada transformátora:

Náhradná schéma je nasledovná:



Obr. 6-2 Náhrada dvojbranom Γ.

1 kus transformátoru má nasledovné parametre:

Reálna zložka pozdĺžnej impedancie predstavuje rezistanciu oboch vinutí R_t :

$$R_t = \frac{\Delta P_{Cu}.U_n^2}{S_n^2} = \frac{16000.22000^2}{1600000^2} = 3{,}025\Omega \qquad (6.1)$$

Imaginárna zložka pozdĺžnej impedancie predstavuje rozptylovú reaktanciu oboch vinutí.

Platí pre ňu vzťah:

$$X_t = \frac{U_n^2}{S_n}.\sqrt{e_k^2 - \left(\frac{\Delta P_{Cu}}{S_n}\right)^2} = \frac{22000^2}{1600000}.\sqrt{0{,}06^2 - \left(\frac{16000}{1600000}\right)^2} = 17{,}89\Omega \qquad (6.2)$$

Reálna zložka priečnej admitancie G_t zahŕňa straty v magnetickom obvode vírivými prúdmi a magnetickou hysteréziou pri menovitom napätí a frekvencii 50 Hz.

$$G_t = \frac{\Delta P_{Fe}}{U_n^2} = \frac{2410}{22000^2} = 4{,}98.10^{-6}\,S \tag{6.3}$$

Imaginárna zložka priečnej admitancie B_t zahŕňa jalový výkon potrebný k magnetizácii pri menovitom napätí:

$$B_t = \frac{1}{U_n^2}.\sqrt{(S_n.i_0)^2 - {}_\Delta P_{Fe}^2} = \frac{1}{22000^2}.\sqrt{(1600000.0{,}007)^2 - 2410^2} = 2{,}26.10^{-5}\,S \tag{6.4}$$

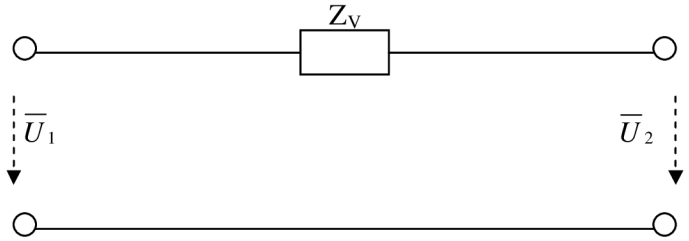
Tri transformátory majú nasledovné parametre prvkov náhradného článku Γ:

$$\overline{Z_t} = \frac{1}{3}.\overline{Z_{1t}} = \frac{1}{3}.(3{,}025 + j17{,}89) = (1{,}0083 + j5{,}9633)\Omega \tag{6.5}$$

$$\overline{Y_t} = 3.\overline{Y_{1t}} = 3.(4{,}97 - j22{,}6).10^{-6} = (1{,}491 - j6{,}78).10^{-5}\,\Omega \tag{6.6}$$

Náhrada vedenia:

Náhradná schéma je nasledovná:

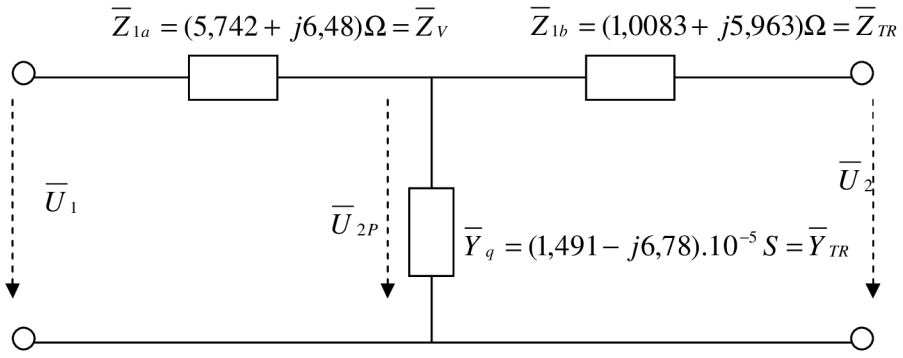


Obr. 6-3 Náhrada dvojbranom jedným pozdĺžnym parametrom.

Vedenie má nasledovnú pozdĺžnu impedanciu:

$$\overline{Z_V} = l.(R_k + jX_k) = 18.(0{,}319 + j0{,}36) = (5{,}742 + j6{,}48)\Omega \tag{6.7}$$

Nesúmerný T článok, ktorý modeluje celú situáciu (spojenie vedenia a transformátorov) má nasledovnú podobu:



Obr. 6-4 Náhrada schémy nesúmerným T-článkom

Z tohto T – článku vypočítam Blondelove konštanty:

$$\overline{A} = 1 + \overline{Z}_{1a}.\overline{Y}_q =$$

$$1 + (5{,}742 + j6{,}48).(1{,}491 - j6{,}78).10^{-5} = \quad (6.8)$$
$$(1{,}0005249 - j0{,}0002927) = 1{,}000525\angle -0{,}0167^{o}$$

$$\overline{B} = \overline{Z}_{1a} + \overline{Z}_{1b} + \overline{Z}_{1a}.\overline{Z}_{1b}.\overline{Y}_q =$$

$$(5{,}742 + j6{,}48) + (1{,}0083 + j5{,}963) + \quad (6.9)$$
$$(5{,}742 + j6{,}48).(1{,}0083 + j5{,}963).(1{,}491 - j6{,}78).10^{-5} =$$
$$= (6{,}752 + j12{,}448)\Omega = 14{,}159\angle +61{,}51^{o}\Omega$$

$$\overline{C} = \overline{Y}_q = (1{,}491 - j6{,}78).10^{-5}\,S \quad (6.10)$$

$$\overline{D} = 1 + \overline{Z}_{1b}.\overline{Y}_q$$

$$1 + (1{,}0083 + j5{,}963).(1{,}491 - j6{,}78).10^{-5} = \quad (6.11)$$
$$(1{,}000419 + j0{,}0000205) = 1{,}000419\angle 0{,}0017^{o}$$

Pri riešení úlohy sa vychádza z nasledovného vzťahu (Literatúra[4] 4.5):

$$\overline{U_1} = \overline{A}.\overline{U}_2 + \overline{B}.\frac{\overline{S}_2}{\overline{U}_2^*} \tag{6.12}$$

Po úprave vzniká tvar:

$$\overline{S}_2 = \frac{\overline{U}_1.\overline{U}_2^*}{\overline{B}} - \frac{\overline{A}}{\overline{B}}.U_2^2 \tag{6.13}$$

V predchádzajúcom vzťahu sa uvážilo:

$$\overline{U}_2.\overline{U}_2^* = U_2^2 \tag{6.14}$$

Pre jednotlivé prvky platí:

$$\overline{U}_1 = U_1\angle 0^o \tag{6.15}$$

$$\overline{U}_2 = k.U_1\angle\vartheta_2 \tag{6.16}$$

$$\overline{A} = A\angle\alpha \tag{6.17}$$

$$\overline{B} = B\angle\beta \tag{6.18}$$

Riešením rovnice (6.13) dostávame po dosadení (6.15, 6.16, 6.17, 6.18):

$$\overline{S}_2 = P_2 - jQ_2 = \frac{k.U_1^2}{B}\angle -(\vartheta_2 + \beta) - \frac{A.k^2.U_1^2}{B}\angle(\alpha - \beta) \tag{6.19}$$

Pri zadanom P_2, Q_2 sú hľadanými veličinami k, υ_2. Rozpis vzťahu (6.19) sa prevedie pomocou formálnych skratiek:

$$m_1 = \frac{U_1^2}{B} \tag{6.20}$$

$$m_2 = \frac{A.U_1^2}{B}.\cos(\alpha - \beta) \tag{6.21}$$

$$m_3 = \frac{A.U_1^2}{B}.\sin(\alpha - \beta) \tag{6.22}$$

Teraz sa budú aplikovať zmienené formálne skratky a verzorový tvar výkonu prevedieme na tvar:

$$\begin{aligned}\overline{S}_2 = P_2 - jQ_2 &= \frac{k.U_1^2}{B}\angle -(\vartheta_2+\beta) - \frac{A.k^2.U_1^2}{B}\angle(\alpha-\beta) = \\ &= \left\{\frac{k.U_1^2}{B}.\cos\left[-(\vartheta_2+\beta)\right] + j\frac{k.U_1^2}{B}.\sin\left[-(\vartheta_2+\beta)\right]\right\} - \\ &- \left\{\frac{k^2.A.U_1^2}{B}.\cos(\alpha-\beta) + j\frac{k^2.A.U_1^2}{B}.\sin(\alpha-\beta)\right\} = \\ &= \left[k.m_1.\cos(\vartheta_2+\beta) - k^2.m_2\right] - j\left[k.m_1.\sin(\vartheta_2+\beta) + k^2.m_3\right]\end{aligned} \tag{6.23}$$

Platí teda:

$$P_2 = k.m_1.\cos(\vartheta_2+\beta) - k^2.m_2 \tag{6.24}$$

$$Q_2 = k.m_1.\sin(\vartheta_2+\beta) + k^2.m_3 \tag{6.25}$$

Z rovníc (6.24),(6.25) sa vyjadria goniometrické členy:

$$\cos(\vartheta_2+\beta) = \frac{P_2 + m_2.k^2}{m_1.k} \tag{6.26}$$

$$\sin(\vartheta_2+\beta) = \frac{Q_2 - m_3.k^2}{m_1.k} \tag{6.27}$$

Pre goniometrické funkcie platí:

$$\cos^2(\vartheta_2+\beta) + \sin^2(\vartheta_2+\beta) = 1 \tag{6.28}$$

Dosadením (6.26) a (6.27) do vzťahu (6.28) vznikne:

$$\left(\frac{P_2 + m_2.k^2}{m_1.k}\right)^2 + \left(\frac{Q_2 - m_3.k^2}{m_1.k}\right)^2 = 1 \tag{6.29}$$

Postupným upravovaním (6.29) sa vytvorí vzťah (6.30):

$$\frac{P_2^2 + 2P_2.m_2.k^2 + m_2^2.k^4}{m_1^2.k^2} + \frac{Q_2^2 - 2Q_2.m_3.k^2 + m_3^2.k^4}{m_1^2.k^2} = 1$$

$$P_2^2 + 2P_2.m_2.k^2 + m_2^2.k^4 + Q_2^2 - 2Q_2.m_3.k^2 + m_3^2.k^4 = m_1^2.k^2$$

$$k^4.\left(m_2^2+m_3^2\right)+k^2.\left(2P_2.m_2-2Q_2.m_3-m_1^2\right)+\left(P_2^2+Q_2^2\right)=0 \tag{6.30}$$

Táto rovnica je bikvadratickou pre k. Vyrieši sa substitučnou metódou pri uvážení: $k^2 = x$.

V nasledujúcej časti bude poukázaný príklad výpočtu konštanty k a následne sekundárneho napätia pre menovitú hodnotu zaťaženia.

Zo zadania alebo z predchádzajúcich výpočtov sú známe tieto hodnoty:

- Sn = 4800kVA,
- cos φ = 0,95,
- $\overline{U}_1 = \left|\overline{U}_1\right|\angle\vartheta_1 = 23100\angle 0^o V$,
- $\overline{A} = A\angle\alpha = 1{,}000525\angle -0{,}01676$,
- $\overline{B} = B\angle\beta = 14{,}159\angle 61{,}51^o\Omega$,

Uvedené hodnoty sa dosadia do vzťahov 6.20 až 6.22:

$$m_1 = \frac{U_1^2}{B} = \frac{23100^2}{14{,}159} = 37686984 \tag{6.31}$$

$$m_2 = \frac{A.U_1^2}{B}.\cos(\alpha-\beta) = \frac{1{,}000525.23100^2}{14{,}159}.\cos(-0{,}01676-61{,}51) = 17976671 \tag{6.32}$$

$$m_2 = \frac{A.U_1^2}{B}.\sin(\alpha-\beta) = \frac{1{,}000525.23100^2}{14{,}159}.\sin(-0{,}01676-61{,}51) = -33145735 \tag{6.33}$$

Výpočet činného a jalového výkonu:

$$P = \left|\overline{S}\right|.\cos\varphi = 4{,}8.10^6.0{,}95 = 4{,}56.10^6 W \tag{6.34}$$

$$Q = \left|\overline{S}\right|.\sin(\cos^{-1}\varphi) = 4{,}8.10^6.\sin 18{,}1948^o = 1{,}4988.10^6 VAr \tag{6.35}$$

Teraz sa vyčíslia jednotlivé členy bikvadratickej rovnice.

Bikvadratický člen:

$$m_2^2+m_3^2 = 17976671^2+(-33145735)^2 = 1{,}4218.10^{15} \tag{6.36}$$

Kvadratický člen:

$$\begin{aligned} &2P_2.m_2-2Q_2.m_3-m_1^2 = \\ &2.4560000.17976671 - 2.1498800.(-33145735) - 37686984^2 = \\ &= -1{,}157.10^{15} \end{aligned} \tag{6.37}$$

Absolútny člen:

$$P_2^2 + Q_2^2 = 4560000^2 + 1498800^2 = 2{,}304.10^{13} \tag{6.38}$$

Bikvadratická rovnica má teda nasledovný tvar:

$$k^4.1{,}4218.10^{15} - k^2.1{,}157.10^{15} + 2{,}304.10^{13} = 0 \tag{6.39}$$

Pri jej riešení sa použije substitučná metóda, kedy bude platiť:

$$k^2 = x \tag{6.40}$$

Dosadením vzťahu (6.40) do (6.39) vznikne kvadratická rovnica, ktorej riešenie spočíva na výpočte diskriminantu D.

$$x^2.E - x.\mathrm{F} + G = 0 \tag{6.41}$$

$$x^2.1{,}4218.10^{15} - x.1{,}157.10^{15} + 2{,}304.10^{13} = 0 \tag{6.42}$$

$$D = F^2 - 4.E.G = (\text{-}1{,}157.10^{15})^2 - 4.1{,}4218.10^{15}.2{,}304.10^{13} = 1{,}2076.10^{30} \tag{6.43}$$

$$x_1 = \frac{-F + \sqrt{D}}{2.E} = \frac{-(\text{-}1{,}157.10^{15}) + \sqrt{1{,}2076.10^{30}}}{2.1{,}4218.10^{15}} = 0{,}793333 \tag{6.44}$$

$$x_2 = \frac{-F - \sqrt{D}}{2.E} = \frac{-(\text{-}1{,}157.10^{15}) - \sqrt{1{,}2076.10^{30}}}{2.1{,}4218.10^{15}} = 0{,}020426225 \tag{6.45}$$

Využitím vzťahu (6.40) sa získajú hodnoty konštánt:

$$k_1 = \sqrt{x_1} = \sqrt{0{,}793333} = 0{,}890693 \tag{6.46}$$

$$k_2 = \sqrt{x_2} = \sqrt{0{,}020426225} = 0{,}14292 \tag{6.47}$$

Z týchto konštánt k_2 nedáva zmysel, preto sa v ďalšej fáze nevyužije. Využitím vzťahu (6.16) získame hodnotu modulu napätia na konci dvojbranu.

$$U_2 = k.U_1 = 0{,}890693.23100 = 20575\mathrm{V} \tag{6.48}$$

Fáza sekundárneho napätia sa určí zo vzťahu (6.27).

$$\vartheta_2 = \left[\sin^{-1}\left(\frac{Q_2 - m_3.k^2}{m_1.k}\right)\right] - \beta = \left[\sin^{-1}\left(\frac{1498800 - (\text{-}33145735).0{,}890693^2}{37686984.0{,}890693}\right)\right] - 61{,}51 = \text{-}5{,}61^{\circ} \tag{6.49}$$

Napätie na konci dvojbranu uvažovaného s pomernými veličinami pri U_n = 23,1kV je 20,575kV. Úloha však vyžaduje zistiť napätie na NN svorkách transformátora. Preto je nutné napätie U_2 previezť zo strany VN na stranu NN.

Transformátor má odbočky (0,95 – 1,05) x U_n. Z toho plynie 20,9kV - 22kV – 23,1kV. Do úvahy prichádzajú odbočky 22kV – 23,1kV. Dôvod bude zrejmý z nasledovných výpočtov. Pri chode naprázdno by sa na nízkonapäťovej strane objavilo 440V združeného napätia.

a) Nastavenie odbočky pre 23,1kV

Napätie U_2 prevedené na NN bude:

$$U_2' = U_2.\frac{400}{23100} = k.U_1.\frac{400}{23100} = k.23100.\frac{400}{23100} = k.400 \text{ (V)} \tag{6.50}$$

b) Nastavenie odbočky na 22kV

Napätie U_2 prevedené na NN bude:

$$U_2'' = U_2.\frac{400}{22000} = k.U_1.22000 = k.23100.\frac{400}{22000} = k.420 \text{ (V)} \tag{6.51}$$

Aby sme vedeli rozhodnúť, na ktorú odbočku má byť nastavené vinutie, musíme zistiť napätie U_{2P} na svorkách primárneho vinutia transformátora. Podľa obr. 6-4 je potrebné k napätiu U_2 pripočítať úbytok na pozdĺžnej impedancii transformátora Z_{1b} = (R_{1b} + j.X_{1b}). Použije sa k tomu nasledovná rovnica, kde sa uváži len pozdĺžna zložka úbytku napätia. K tomu nás oprávňuje zistenie, že fázový posun pre celý prenos je takmer nulový, takže priečna zložka úbytku napätia nemá praktický vplyv na veľkosť napätia.

$$U_{2P} = U_2 + \frac{R_{TR}.P_2 + X_{TR}.Q_2}{U_2} \text{ (V)} \tag{6.52}$$

Výpočet pre menovitú hodnotu zaťaženia je nasledovný:

Pre odbočku 23,1kV po dosadení do (6.50):

$$U_2' = k.400 = 0{,}890693.400 = 356{,}28\text{V} \tag{6.53}$$

Pre odbočku 22kV po dosadení do (6.51):

$$U_2' = k.400 = 0{,}890693.420 = 374{,}09\text{V} \tag{6.54}$$

Napätie U_{2P} na svorkách primárneho vinutia transformátora po dosadení do (6.52):

$$U_{2P} = U_2 + \frac{R_{TR}.P_2 + X_{TR}.Q_2}{U_2} = \\ 20575 + \frac{1{,}0083.4{,}56.10^6 + 5{,}9633.1{,}4988.10^6}{20575} = 21233V \tag{6.55}$$

Výsledky pre ostatné hodnoty zaťažení vystihuje tabuľka 6-1.

Tab. 6-1 Vývoj napätia na nn svorkách distribučného transformátora v závislosti na zaťažení (O÷100%) pri cos φ_1 = 0,95

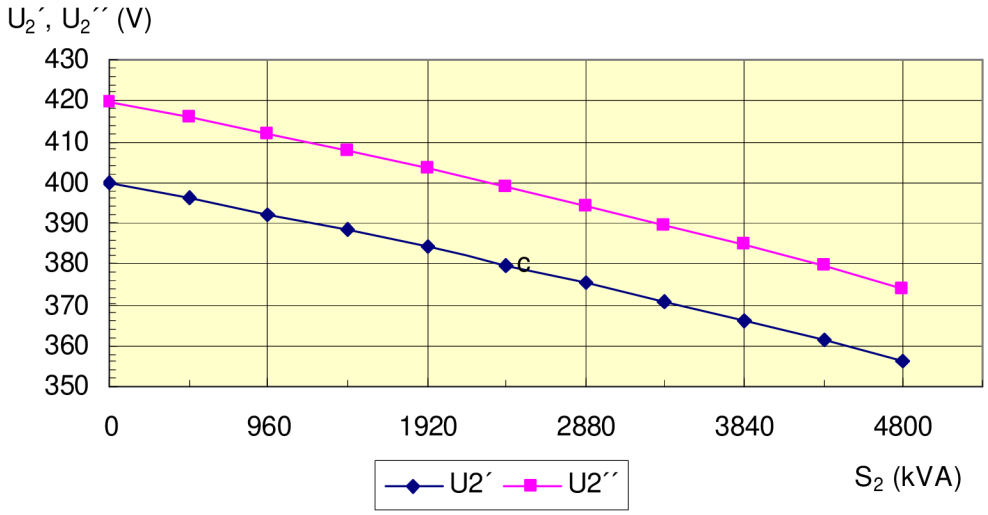
S_2	P_2	U_2	U_{2P}	k	$U_2´$	$U_2´´$	θ_2
(kVA)	(kW)	(kV)	(kV)	(-)	(kV)	(kV)	(°)
0	0	23087,87	23087,87	0,999475	399,79	419,78	0,017
480	456	22870,94	22930,14	0,990084	396,03	415,84	-0,489
960	912	22647,89	22767,45	0,980428	392,17	411,78	-1,005
1440	1368	22418,25	22599,43	0,970487	388,19	407,60	-1,531
1920	1824	22181,57	22425,71	0,960241	384,10	403,30	-2,070
2400	2280	21937,26	22245,84	0,949665	379,87	398,86	-2,621
2880	2736	21684,69	22059,29	0,938731	375,49	394,27	-3,186
3360	3192	21423,12	21865,50	0,927408	370,96	389,51	-3,766
3840	3648	21151,68	21663,74	0,915657	366,26	384,58	-4,363
4320	4104	20869,37	21453,24	0,903436	361,37	379,44	-4,978
4800	4560	20575,01	21233,03	0,890693	356,28	374,09	-5,615

Z tejto tabuľky je vidieť, že pri nastavovaní odbočky na 23,1kV klesá združené napätie $U_2´$ na svorkách sekundárneho vinutia distribučného transformátora v intervale < 399,79 ; 356,28> (V). Fázové sekundárne napätie klesá v intervale $U_{2f}´ \in$ < 230,82 ; 205,70> (V).

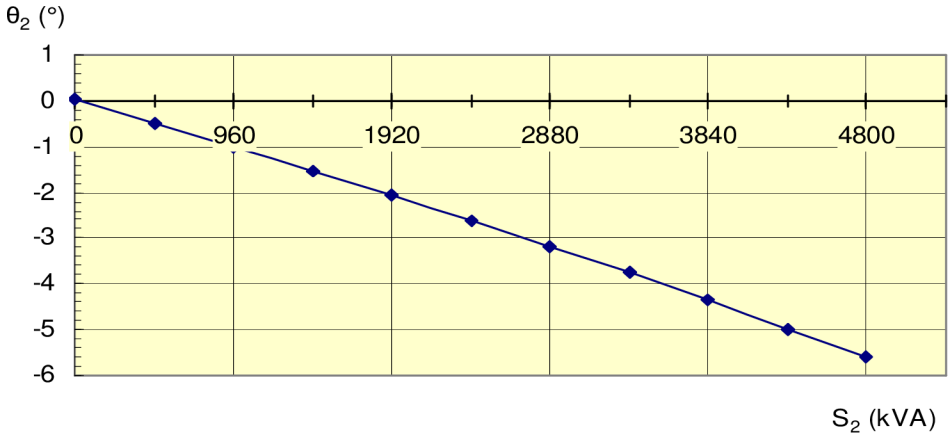
Pri nastavovaní odbočky na 22kV klesá združené napätie $U_2´$ na svorkách sekundárneho vinutia distribučného transformátora v intervale < 419,78 ; 374,09> (V). Fázové sekundárne napätie klesá v intervale $U_{2f}´ \in$ < 242,36 ; 215,98> (V).

Uvedené hodnoty platia pre cos φ_1 = 0,95ind a U_1 = 23,1kV.

Pre tabuľku 6-1 prislúcha nasledovný graf:



Obr. 6-5 Graf závislosti modulu sekundárneho napätia na zaťažení



Obr. 6-6 Graf závislosti fázy sekundárneho napätia na zaťažení

Pre orientáciu slúži nasledovná tabuľka pre 110% menovitého výkonu:

Tab. 6-2 Vývoj napätia na nn svorkách distribučného transformátora v závislosti na zaťažení (110%) pri cos φ_1 = 0,95

S_2	P_2	U_2	U_{2P}	k	$U_2´$	U2´´	θ_2
(kVA)	(kW)	(kV)	(kV)	(-)	(kV)	(kV)	(°)
5280	5016	20267,12	21001,94	0,877	351,0	368,5	-6,27

Z tabuľky 6-1 je tiež zrejmé, že napätie U_{2P} klesá z hodnoty 23087,87 (V) pri chode naprázdno na hodnotu 21233,03 (V) pri menovitom zaťažení. **Odbočka sa nastaví podľa zisteného priebehu zaťaženia.**

Podstatne väčšie úbytky napätia vznikajú na vedení. Ako je zrejmé z bilancie pre chod s menovitým zaťažením (U_1 = 23,1kV, U_{2P} = 21,23303kV, U_2 = 20575kV), je úbytok napätia na časti dvojbranu, ktorý reprezentuje transformátor: $U_{2P} - U_2$ = 658,02V. Pritom úbytok napätia na vedení je $U_1 - U_{2P}$ = 1866,97V.

Veľkosť týchto úbytkov by bolo možné zlepšiť napríklad úpravou účinníku na hodnotu cos φ_1 = 1,00. Tu sa však objavuje nutnosť presnej kompenzácie, keďže jalová dodávka je penalizovaná distribučnými spoločnosťami.

Pre cos φ_1 = 1,00 platí nasledovná tabuľka:

Tab. 6-3 Vývoj napätia na nn svorkách distribučného transformátora v závislosti na zaťažení (0-100%) pri cos φ_1 = 1,00

S_2	P_2	U_2	U_{2P}	k	U_2'	$U2''$	θ_2
(kVA)	(kW)	(kV)	(kV)	(-)	(kV)	(kV)	(°)
0	0	23087,87	23087,873	0,999475	399,79	419,78	0,017
480	480	22945,28	22966,369	0,993302	397,32	417,19	-0,629
960	960	22872,16	22914,485	0,990137	396,05	415,86	-1,283
1440	1440	22722,22	22786,123	0,983646	393,46	413,13	-1,947
1920	1920	22567,04	22652,823	0,976928	390,77	410,31	-2,620
2400	2400	22406,31	22514,309	0,96997	387,99	407,39	-3,304
2880	2880	22239,73	22370,306	0,962759	385,10	404,36	-4,000
3360	3360	22066,88	22220,404	0,955276	382,11	401,22	-4,708
3840	3840	21887,34	22064,242	0,947504	379,00	397,95	-5,431
4320	4320	21700,63	21901,35	0,939421	375,77	394,56	-6,168
4800	4800	21506,19	21731,236	0,931004	372,40	391,02	-6,923

Pre 110% menovitého výkonu:

Tab. 6-4 Vývoj napätia na nn svorkách distribučného transformátora v závislosti na zaťažení (110%) pri cos φ_1 = 1,00

S_2	P_2	U_2	U_{2P}	k	U_2'	$U2''$	θ_2
(kVA)	(kW)	(kV)	(kV)	(-)	(kV)	(kV)	(°)
5280	5280	21198,59	21449,733	0,917688	367,075	385,429	-7,696

6.4 Zhrnutie výsledkov

Príklad poukázal na zmenu sekundárneho napätia na svorkách distribučného transformátora vplyvom zmeny záťaže.

Pri nastavovaní odbočky na 23,1kV klesá združené napätie $U_2´$ na svorkách sekundárneho vinutia distribučného transformátora vplyvom zvyšovania zaťaženia v intervale < 399,79 ; 356,28> (V). Fázové sekundárne napätie klesá v intervale $U_{2f}´ \in$ < 230,82 ; 205,70> (V).

Pri nastavovaní odbočky na 22kV klesá združené napätie $U_2´$ na svorkách sekundárneho vinutia distribučného transformátora vplyvom zvyšovania zaťaženia v intervale < 419,78 ; 374,09> (V). Fázové sekundárne napätie klesá v intervale $U_{2f}´ \in$ < 242,36 ; 215,98> (V).

Uvedené hodnoty platia pre cos $\varphi_1 = 0,95$ind a $U_1 = 23,1$kV.

Odbočka sa nastaví podľa zisteného priebehu zaťaženia.

Podstatne väčšie úbytky napätia vznikajú na vedení. Ako je zrejmé z bilancie pre chod s menovitým zaťažením ($U_1 = 23,1$kV, $U_{2P} = 21,23303$kV, $U_2 = 20575$kV), je úbytok napätia na časti dvojbranu, ktorý reprezentuje transformátor: $U_{2P} - U_2 = 658,02$V. Pritom úbytok napätia na vedení je $U_1 - U_{2P} = 1866,97$V.

7 ZÁVER

Transformátor je neoddeliteľnou súčasťou elektrizačnej sústavy. Pre dosahovanie nízkych strát vo vedení sú vhodné vysoké menovité hodnoty napätí. Pri konštantnom výkone dosiahne prúd menšiu hodnotu a stratovosť je nižšia. Lenže pre maloodber sa požaduje nízke napätie. To je dôvod potreby transformácie.

Distribučné transformátory sú hnané pokrokom v smere znižovania strát. Hlavné sú straty naprázdno a nakrátko. Zisťujú sa meraním, výpočtami. Pritom sa jednotlivé prvky spôsobujúce straty nahradzujú ideálnymi elektrickými prvkami, ktoré sú systematicky zhromaždené do náhradnej schémy tak, aby reprezentovali chod transformátora.

Teoretické pojednanie o transformátoroch pripravilo pôdu pre výpočet zadanej úlohy, ktorá bude predmetom riešenia bakalárskej práce. Hlavná kontúra teoretických údajov sa nesie v duchu náhrady transformátora dvojbranom Γ / π. Je to dôležitý krok, ktorý dovoľuje riešiť transformátor ako jeden obvod. Spomenutý proces však má svoje úskalia, ktoré sa skrývajú za pojmom prepočet transformátora.

Výsledky príkladu poukázali na pokles napätia na nízkonapäťovej strane distribučného transformátoru, ktorých príčinou je nárast zaťaženia. Koridor hodnôt sa dá posúvať pomocou odbočiek transformátora. Nastavená odbočka by mala korešpondovať so zaťažením, na čo poukazuje Obr. 6-5.

POUŽITÁ LITERATURA

[1] Bašta, J., Chládek, J., Mayer, I. *Teorie elektrických stroju*. SNTL/ALFA, Praha, 1968, 584 strán, DT 621.313.

[2] BEZ A.S., [ON LINE] (17.12.2007) www.bez.sk

[3] BLAŽEK, V., *Distribuce elektrické energie.Scriptum. VUT*, Brno, 2007

[4] BLAŽEK, V., PAAR, M., *Přenosové sítě. Scriptum. VUT*, Brno, 2007

[5] JAROŠEK, J., PLENCNER, R. *Transformátory*. Slovenské vydavateľstvo technickej literatúry, Bratislava, 1961, 404 strán

[6] JEZIERSKI, E., *Transformátory. Teoretické základy*. Academia, Praha, 1973, 652 strán

[7] ONDRŮŠEK, Č., *Elektrické stroje.Scriptum. VUT*, Brno, 2006

[8] SKÁLA, M., *Transformátory*. SNTL, Praha, 1964, 356 strán, DT621.314.2

Príloha A : Parametre vybraných typov transformátorov

(Zdroj: Literatúra [2])

Menovitý výkon Sn	Napätie Un	Spojenie vinutia	Napätie nakrátko	Straty		Váha oleja	Celková váha
(kVA)	(kV)		uk(%)	ΔP_0 (W)	ΔP_k (W)	(kg)	(kg)
50	22/0,4	Yzn1	4	120	1100	100	460
100	22/0,5	Yzn1	4	190	1750	115	590
160	22/0,6	Yzn1	4	270	2500	125	710
250	22/0,7	Dyn1	4	390	3100	155	955
400	22/0,8	Dyn1	4	530	4700	205	1200
630	22/0,9	Dyn1	6	770	7300	305	1655
800	22/0,10	Dyn1	6	950	9500	385	2090
1000	22/0,11	Dyn1	6	1100	11600	445	2535
1250	22/0,12	Dyn1	6	1300	14300	590	3050
1600	22/0,13	Dyn1	6	1600	16800	655	3605

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV ELEKTROENERGETIKY

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Změna napětí na nn svorkách distribučního transformátoru vn/nn při změně jeho zatížení

BRNO 2008 **FRANTIŠEK BERNÁTH**

LICENČNÍ SMLOUVA

POSKYTOVANÁ K VÝKONU PRÁVA UŽÍT ŠKOLNÍ DÍLO

uzavřená mezi smluvními stranami:

1. Pan

Jméno a příjmení: František Bernáth

Bytem: Petőfiho 65, 94131 Dvory nad Žitavou, Slovenská republika

Narozen (datum a místo): 30.07.1986 v Nových Zámkoch

(dále jen „autor“)

a

2. Vysoké učení technické v Brně

Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií,

se sídlem Údolní 244/53, 602 00 Brno,

jejímž jménem jedná na základě písemného pověření děkanem fakulty:

doc. Ing. Čestmír Ondrůšek, CSc.

(dále jen „nabyvatel“)

Čl. 1

Specifikace školního díla

1. Předmětem této smlouvy je vysokoškolská kvalifikační práce (VŠKP):
   □ bakalářská práce

   (dále jen VŠKP nebo dílo)

Název VŠKP:	Změna napětí na nn svorkách distribučního transformátoru vn/nn při změně jeho zatížení
Vedoucí/ školitel VŠKP:	doc. Ing. Vladimír Blažek, CSc.
Ústav:	Ústav elektroenergetiky
Datum obhajoby VŠKP:	16.06.2008

VŠKP odevzdal autor nabyvateli v*:

□ tištěné formě – počet exemplářů 2

□ elektronické formě – počet exemplářů 2

2. Autor prohlašuje, že vytvořil samostatnou vlastní tvůrčí činností dílo shora popsané a specifikované. Autor dále prohlašuje, že při zpracovávání díla se sám nedostal do rozporu s autorským zákonem a předpisy souvisejícími a že je dílo dílem původním.
3. Dílo je chráněno jako dílo dle autorského zákona v platném znění.
4. Autor potvrzuje, že listinná a elektronická verze díla je identická.

Článek 2

Udělení licenčního oprávnění

1. Autor touto smlouvou poskytuje nabyvateli oprávnění (licenci) k výkonu práva uvedené dílo nevýdělečně užít, archivovat a zpřístupnit ke studijním, výukovým a výzkumným účelům včetně pořizovaní výpisů, opisů a rozmnoženin.
2. Licence je poskytována celosvětově, pro celou dobu trvání autorských a majetkových práv k dílu.
3. Autor souhlasí se zveřejněním díla v databázi přístupné v mezinárodní síti
   □ ihned po uzavření této smlouvy

   (z důvodu utajení v něm obsažených informací)

4. Nevýdělečné zveřejňování díla nabyvatelem v souladu s ustanovením § 47b zákona č. 111/ 1998 Sb., v platném znění, nevyžaduje licenci a nabyvatel je k němu povinen a oprávněn ze zákona.

Článek 3

Závěrečná ustanovení

1. Smlouva je sepsána ve třech vyhotoveních s platností originálu, přičemž po jednom vyhotovení obdrží autor a nabyvatel, další vyhotovení je vloženo do VŠKP.
2. Vztahy mezi smluvními stranami vzniklé a neupravené touto smlouvou se řídí autorským zákonem, občanským zákoníkem, vysokoškolským zákonem, zákonem o archivnictví, v platném znění a popř. dalšími právními předpisy.
3. Licenční smlouva byla uzavřena na základě svobodné a pravé vůle smluvních stran, s plným porozuměním jejímu textu i důsledkům, nikoliv v tísni a za nápadně nevýhodných podmínek.
4. Licenční smlouva nabývá platnosti a účinnosti dnem jejího podpisu oběma smluvními stranami.

V Brně dne: …….

……. …….

Nabyvatel Autor

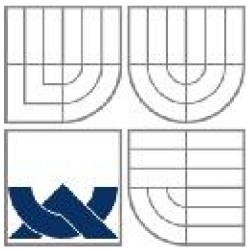
Bibliografická citace práce:

BERNÁTH, F. Změna napětí na nn svorkách distribučního transformátoru vn/nn při změně jeho zatížení. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2008. 51 s. Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Vladimír Blažek, CSc.

Prehlasujem, že som svoju bakalársku prácu vypracoval samostatne a použil som len podklady uvedené v priloženom zozname.

Zároveň by som chcel poďakovať vedúcemu bakalárskej práce p. doc. Ing. Vladimírovi Blažkovi, CSc. za cenné rady a pripomienky k mojej práci, poskytnutú literatúru. Vďaka taktiež patrí svojím blízkym za podporu počas môjho štúdia.

……



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií

Ústav elektroenergetiky

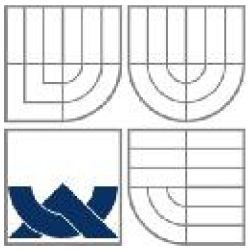
BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Změna napětí na nn svorkách distribučního transformátoru vn/nn při změně jeho zatížení

František Bernáth

vedoucí: doc. Ing. Vladimír Blažek, CSc.

Ústav elektroenergetiky, FEKT VUT v Brně, 2008



BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

Faculty of Electrical Engineering and Communication

Department of Electrical Power Engineering

Bachelor's Thesis

Change of voltage at LV terminals of a MV/LV power distribution transformer caused by changes in its load

by

František Bernáth

Supervisor: doc. Ing. Vladimír Blažek, CSc.

Brno University of Technology, 2007

ABSTRAKT

Práca sa zaoberá problematikou distribučných transformátorov. Čitateľovi sú predložené teoretické informácie v prvej časti. Táto úvodná vedomosť umožňuje bližšie sa oboznámiť s príkladom, ktorého riešenie je cieľom práce. Príklad zahŕňa modelovú situáciu v elektrizačnej sústave, kedy je priemyselný závod napájaný cez vedenie VN a tri paralelne pracujúce transformátory VN/NN. Ich napätie na nízkonapäťových svorkách sa bude meniť v závislosti na zaťažení. Príklad bude zahŕňať riešenie Blondelových konštánt pre zvolenú náhradnú schému.

KĽÚČOVÉ SLOVÁ: Distribučný transformátor; Náhradné schémy; Blondelove konštanty; Elektrický výkon,

ABSTRACT

This thesis is devoted to topic of distribution transformers. In the first part of text there are mentioned theoretical knowledge which prepare basement for solving model situation in electric network. The industrial park is plugged by three transformers and we are interested in change of voltage at LV terminals of transformers according its load. Solving of example will include counting Blondel's constancies of chosen substitute circuit.

KEY WORDS: Distribution transformer; Substitute circuit; Blondel's constancies; Electric power

OBSAH

ZOZNAM OBRÁZKOV 10

ZOZNAM TABULIEK 11

1 ÚVOD 12

2 CHARAKTERISTIKA SÚČASNÉHO STAVU RIEŠENEJ PROBLEMATIKY 13

3 CIELE PRÁCE 14

4 METÓDY A POSTUPY RIEŠENIA 15

5 TEÓRIA TRANSFORMÁTOROV 16

5.1 PRINCÍP ČINNOSTI TRANSFORMÁTOROV 16

5.2 TROJFÁZOVÝ TRANSFORMÁTOR 18

5.2.1 ZAPOJENIE VINUTÍ. HODINOVÝ UHOL. 18

5.2.2 PARALELNÁ SPOLUPRÁCA. PODMIENKY PARALELNEJ SPOLUPRÁCE. 20

5.3 NÁHRADNÁ SCHÉMA TRANSFORMÁTORA A PREPOČET 21

5.3.1 PREPOČÍTANIE PARAMETROV TRANSFORMÁTORA 22

5.4 SPRÁVANIE TRANSFORMÁTORA PRI ROZLIČNOM ZAŤAŽENÍ, FÁZOROVÉ DIAGRAMY 23

5.4.1 TRANSFORMÁTOR PRI PREVÁDZKOVOM ZAŤAŽENÍ 23

5.4.2 TRANSFORMÁTOR NAPRÁZDNO 25

5.4.3 TRANSFORMÁTOR NAKRÁTKO 26

5.5 UKÁŽKOVÝ VÝPOČET PARAMETROV NÁHRADNEJ SCHÉMY 3F TRANSFORMÁTORA 28

ZADANIE 28

NÁHRADNÁ SCHÉMA 28

VÝPOČET PARAMETROV PRIEČNEJ VETVY 29

VÝPOČET PARAMETROV POZDĹŽNEJ VETVY 29

5.6 NÁHRADA DVOJBRANOM Γ 31

5.7 STRATY A ÚČINNOSŤ 32

5.8 KONŠTRUKČNÉ VYHOTOVENIE 35

6 VÝPOČET ZMENY NAPÄTIA NA NN SVORKÁCH DISTRIBUČNÉHO TRANSFORMÁTORA VN/NN PRI ZMENE JEHO ZAŤAŽENIA 36

6.1 ZADANIE 36

6.2 SCHÉMA ZODPOVEDAJÚCA ZADANIU, POSTUP RIEŠENIA ÚLOHY 37

6.3 RIEŠENIE 37

6.4 ZHRNUTIE VÝSLEDKOV 48

7 ZÁVER 49

POUŽITÁ LITERATURA 50

PRÍLOHA A : PARAMETRE VYBRANÝCH TYPOV TRANSFORMÁTOROV 51

ZOZNAM OBRÁZKOV

Obr. 1-1 Prevedenie trafostanice 12

Obr. 5-1 Model ideálneho transformátora 16

Obr. 5-2 Trojfázový jadrový transformátor 18

Obr. 5-3 Zapojenie vinutia Yd1 transformátora a fázorový diagram napätí. 19

Obr. 5-4 Náhradná schéma transformátora. 21

Obr. 5-5 Fázorový diagram transformátora zaťaženého kapacitnou záťažou cos φ= 0,30. 24

Obr. 5-6 Fázorový diagram transformátora zaťaženého ohmickým odporom. 25

Obr. 5-7 Fázorový diagram transformátora zaťaženého záťažou cos φ= 0,60ind. 25

Obr. 5-8 Náhradná schéma pre príklad. 28

Obr. 5-9 Náhrada dvojbranom Γ . 31

Obr. 5-10 Schéma zapojenia pre meranie stavu a)naprázdno, b) nakrátko 33

Obr. 5-11 Amorfný transformátor 35

Obr. 6-1 Schéma riešenej úlohy 37

Obr. 6-2 Náhrada dvojbranom Γ 37

Obr. 6-3 Náhrada dvojbranom jedným pozdĺžnym parametrom 38

Obr. 6-4 Náhrada schémy nesúmerným T - článkom 39

Obr. 6-5 Graf závislosti modulu sekundárneho napätia na zaťažení 46

Obr. 6-5 Graf závislosti fázy sekundárneho napätia na zaťažení 46

ZOZNAM TABULIEK

Tab. 5-1 Prepočítavacie koeficienty medzi nominálnymi a fázovými hodnotami 20

Tab. 6-1 Vývoj napätia na nn svorkách distribučného transformátora v závislosti na zaťažení (O÷100%) pri cos $\varphi_1 = 0,95$ 45

Tab. 6-2 Vývoj napätia na nn svorkách distribučného transformátora v závislosti na zaťažení (110%) pri cos $\varphi_1 = 0,95$ 46

Tab. 6-3 Vývoj napätia na nn svorkách distribučného transformátora v závislosti na zaťažení (O÷100%) pri cos $\varphi_1 = 1,00$ 47

Tab. 6-4 Vývoj napätia na nn svorkách distribučného transformátora v závislosti na zaťažení (O÷100%) pri cos $\varphi_1 = 1,00$ 47

1 ÚVOD

Pojem transformátor v sebe ukrýva obrovské množstvo informácií. Tie sú zaznamenané vo vysokom počte literárnych zdrojov. Obyčajne sa v nich pojednáva o teórii transformátorov a kvôli vysokej miere zmapovania problematiky sa autori poddávajú veľmi podrobnej analýze. Tá obyčajne úzko súvisí s medziodvetvovými interakciami (elektrotechnika – strojárstvo – chémia - ..). Takáto činnosť je právom v plnej miere podporovaná, pretože len presné a podrobné následnosti dejov: analýza – syntéza zabezpečujú očakávané zlepšenie fungovania transformátorov a tým pádom sú pre rozvodné závody predostierané hospodárnejšie stroje, s ktorými sú schopní dosahovať vyššiu efektivitu prenosu elektrickej energie.

To je výsledok, ale v pozadí je ukrytá vedecká publikačná činnosť.

Ako negatívum sa vynára, že potenciálni záujemcovia (študenti) o problematiku distribučných transformátorov majú možnosť študovať len túto rozsiahlu literatúru pojednávajúcu všeobecne o transformátoroch. A to nie je ideálne. Preto má byť tento text komplex ucelených poznatkov, ktoré sa budú orientovať na teóriu transformátorov. Rozsah a obsah tejto publikácie sa snaží byť prispôsobený pre absolventov vysokých škôl. Poskytuje im dobrý prehľad na poli všeobecnej teórie, ktorej použiteľnosť je demonštrovaná na modelovom príklade napájania priemyslového závodu. A prehľad je v súčasnosti rozhodujúci pre schopnosť uplatnenia sa na pracovnom trhu. Je to prvoradý faktor, ktorý jedincovi umožňuje špecializovať sa.

Obr. 0-1 Prevedenie trafostanice 22/0.4 ([2])

2 CHARAKTERISTIKA SÚČASNÉHO STAVU RIEŠENEJ PROBLEMATIKY

Distribučné transformátory patria medzi základné elementy elektrizačnej sústavy už od samotného vznikania prenosových sietí. 1. transformátor zhotovili v roku 1885 traja inžinieri závodov Ganz: Zipernowski, Déri, Bláthy. Z toho vyplýva, že na proces vývoja bola v porovnaní s inými, v súčasnosti rýchlo rastúcimi odvetviami, vyhradená dlhá doba. Ako je to zvyčajné pre prírodný princíp zachovania rýchlosti rozvoja, transformátory tiež v prvopočiatkoch zažili veľké zmeny najmä z hľadiska zmeny použitých izolačných hmôt, lakov, konštrukčných prvkov, spôsobu chladenia, ochrany proti vzniku nepriaznivých elektrických stavov. Tak sme sa dostali z výkonu transformátorov 7,5kVA vyrobených v roku 1886 na 1000kVA pri použití 800kV napätia. Pritom rástla efektivita procesu transformácie, klesali hodnoty stratových čísel. ([1], [6])

Momentálne je v trende zvyšovať mieru minimalizácie použitého priestoru pre distribučný transformátor. V tomto smere má však elektrotechnická inovátorská skupina pred sebou veľkú výzvu. Dôvod vysvetlím. Pri miniaturizácii na poli elektroniky sa do výroby vniesli nové spôsoby izolácie (všeobecne zabezpečovania oddelených trás vedenia el. prúdu). Na tomto poli to funguje. Je však potrebné dodať, že transformátor pracuje aj s magnetickými obvodmi. A zatiaľ nebola objavená magnetická izolačná páska. To znamená, že hospodárny chod si vyžaduje určitý objem železného jadra.

Momentálne sa pri realizácii distribučných transformačných staníc dodáva celý objekt spôsobom unblock. Stavebný objekt, ktorý v sebe skrýva distribučný transformátor, je rozmerovo nadimenzovaný práve na použitý typ transformátora. A pri takomto pohľade sa dosahuje poznateľné znižovania priestoru určeného pre transformáciu elektrickej energie. Transformátor má pomerne dobré chladenie, ktoré je podporované kvalitným odvádzaním tepla z objektu. Okrem toho je zabezpečená vysoká miera bezpečnosti, keďže stavebné práce sa prevádzajú z nehorľavého materiálu, buď zo špeciálnej umelej hmoty alebo betónu. Na tohtoročnej elektrotechnickej výstave Elosys v Trenčíne popredné firmy prezentovali transformačné stanice s výkonom 2MVA na priestore 15m^2, ktorý zahrňoval aj časť pre nn rozvody. Mohol by som tiež začať hovoriť o tom, že takýmto spôsobom estetika nášho okolia stúpa a elektrotechnický rozvoj má dopad aj na formovanie životného prostredia.

Faktom ostáva, že dnešné rozšírené použitie elektrickej energie závisí v prvom rade od transformátorov, ktoré umožnili veľkú hospodárnosť pri prenose el. energie.

3 CIELE PRÁCE

Ciele, ktoré majú byť dosiahnuté:

1. Pojednajte o distribučných transformátoroch, ich elektrických parametroch a o ich náhrade dvojbranom.

2. Priemyselný závod má tri transformátory, každý s menovitým výkonom S_n = 1,6MVA a prevodom p = 22/0,4kV. Závod je napájaný z trojfázového vedenia s menovitým napätím U_n = 22kV so zadanými parametrami z rozvodne 22kV, kde sa udržuje konštantné napätie U = 23,1kV. Určte, ako sa bude meniť napätie na svorkách nízkeho napätia transformátorov pri zmenách výkonu od chodu naprázdno do menovitého zaťaženia transformátorov. Účinník sa predpokladá konštantný a rovná sa 0,95.

4 METÓDY A POSTUPY RIEŠENIA

Vstupným momentom pre skúmanie nového je rekapitulácia poznatkov bádateľa. Opakovanie v tejto sfére bolo organizované predmetom elektrické stroje v druhom ročníku bakalárskeho štúdia na FEKT VUT v Brne. Takto nahromadený celok údajov sa zveľadil do dvoch smerov.

1. Technická literatúra prevyšujúca rámec spomínaného predmetu. Zdrojom bola knižnica Ústavu výkonovej elektroniky.

2. Konfrontácia s praxou. Konzultácia so zainteresovanými spoločnosťami na výstave ELOSYS 2007, Trenčín. Sledovanie informačných materiálov o produktoch (web, prospekty) vrátane technických a ekonomických ukazovateľov. Hľadanie SW podpory pre výpočty transformátorov.

Nasledovala striedavá činnosť štúdia a zaznamenávania.

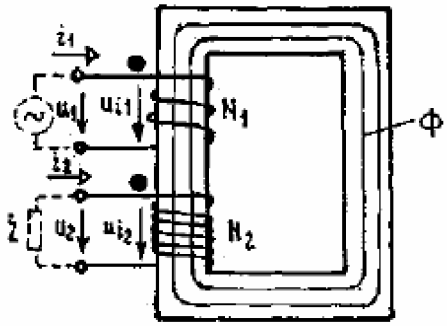
Po zhodnotení dostatku informačných zdrojov sa zahájila príprava samotnej semestrálnej práce, ktorá neskôr prekvitla do bakalárskej práce.

5 TEÓRIA TRANSFORMÁTOROV

Transformátor je netočivý stroj premieňajúci privedené striedavé napätie a prúd na iné zvolené hodnoty. Pri transformácii ostáva výkon nezmenený, ak neprihliadneme k istej, celkom malej spotrebe činného a jalového výkonu v samotnom transformátore. Transformátor je možné použiť k transformácii striedavého elektrického výkonu jednofázového i viacfázového. ([1], [5], [6], [7])

5.1 Princíp činnosti transformátorov

Transformátor je v porovnaní s ostatnými el. strojmi konštrukčne pomerne jednoducho vybavený. Základ je tvorený železným jadrom (vyhotovením sa budem podrobnejšie zaoberať v stati 5.5), ktoré je navinuté primárnym a sekundárnym vinutím tak, ako je naznačené na obr.5-1



Obr. 5-1 Model ideálneho transformátora (Zdroj: LITERATÚRA[7])

Obrázok poslúži k vysvetleniu základného princípu činnosti. Na svorky primárneho vinutia sa pripojí striedavého napätia. To spôsobí pretekanie prúdu primárnym vinutím s N_1 závitmi, kde sa podľa vzťahu

$$U_{i1} = L_1 . \frac{di_1}{dt} \ (\text{V};\text{-},\text{Vs},\text{s}) \tag{5.1}$$

indukuje napätie U_{i1}. Iné vyjadrenie pre U_{i1} je nasledovné:

$$U_{i1} = N_1 . \frac{d\Phi}{dt} \ (\text{V};\text{-},\text{Vs},\text{s}) \tag{5.2}$$

Pravá strana tohto vzťahu je dôsledkom, to znamená, že musí dôjsť k zmene magnetického toku. Cez železné jadro preženie magnetický tok Φ, ktorý je premenlivý. Na zmenu Φ reaguje sekundárna cievka, v ktorej sa indukuje napätie podľa

$$U_{i2} = N_2 . \frac{d\Phi}{dt} \text{ (V;-,Vs,s)} \tag{5.3}$$

a následne preteká cez sekundárne vinutie a impedanciu prúd I_2. Smer prúdu má taký smer, aby svojim účinkom pôsobil proti zmene, ktorá ho vyvolala. Posledná veta je vyjadrením Lencovho zákona. Ak je zmena, ktorá vyvolala indukciu prúdu zmenšovanie magnetického toku v železnom jadre, dôsledkom bude prúd pretekajúci v takom smere, v akom bude podporovať zväčšenie Φ.

V prípade harmonických priebehov napätí transformátorov môžeme napísať pre efektívne hodnoty indukovaných napätí:

$$U_{i1} = 4{,}44 . \Phi_m . f_1 . N_1 \text{ (V;Vs,Hz,-)} \tag{5.4}$$

$$U_{i2} = 4{,}44 . \Phi_m . f_2 . N_2 \text{ (V; Vs,Hz,-)} \tag{5.5}$$

Rovnice (5.4)a(5.5) sú dôležité z hľadiska dimenzovania.

Podelením vzťahov (5.4)a(5.5) dostávame výsledok

$$\frac{U_{i1}}{U_{i2}} = \frac{N_1}{N_2} = k \text{ (V,V;-,-;-)} \tag{5.6}$$

kde k značí prevod transformátora. Tento vzťah slovne značí, že veľkosť indukovaného napätia na danej strane je lineárne závislá na počte závitov tej strany.

Pomer prúdov sa rovná prevrátenej hodnote prevodu.

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{U_2}{U_1} = \frac{N_2}{N_1} = \frac{1}{k} \tag{5.7}$$

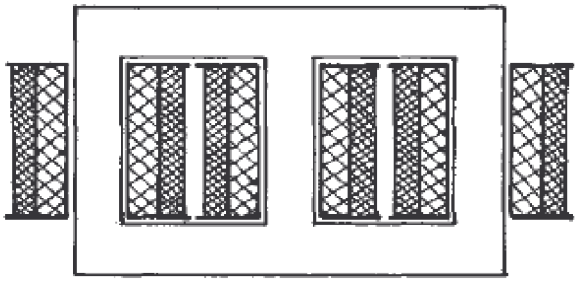
Z pomeru vyplýva, že:

$$I_1 . N_1 = I_2 . N_2 \tag{5.8}$$

čo znamená, že na oboch stranách sú rovnaké prietoky, ako aj to, že pri rovnakom zaťažení dostaneme pre obidve strany rovnaké váhy vodičov. O koľko menej je závitov na strane nižšieho napätie, presne o to väčší prierez je potrebný. ([7])

5.2 Trojfázový transformátor

Distribučné transformátory sa vyrábajú v trojfázovom vyhotovení, keďže distribučná sieť je trojfázová. Trojfázové transformátory sa dajú predstaviť ako tri jednofázové transformátory. Najčastejšie sa vyrábajú jadrové transformátory, ktorého stĺpy sú v 1 rovine, ako to naznačuje obr.5-2.



Obr. 5-2 Trojfázový jadrový transformátor (Zdroj: LITERATÚRA[7])

Z takéhoto umiestnenia vyplýva nerovnaká dĺžka stredných indukčných čiar pre stredný stĺp a pre krajné stĺpy, čoho dôsledkom sú rozličné magnetizačné prúdy(magnetizačný prúd predstavuje prúd potrebný na vytvorenie magnetického toku). Nesymetria sa dá odstrániť použitím stredného stĺpu s menším prierezom.

Ako je z obrázku zrejmé, na jednom stĺpe sa nachádza primárne a sekundárne vinutie jednej fázy. Nesmú byť umiestnené na rôznych stĺpoch, pretože by sa anulovali magnetické toky. Nebola by splnená podmienka funkčnosti.

Pre správanie sa takéhoto transformátora v elektrizačnej sústave je nevyhnutné dbať na spôsob zapojenia vinutí. To je problematika nasledujúceho pododdielu.

5.2.1 Zapojenie vinutí. Hodinový uhol.

Vinutia trojfázových transformátorov môžu byť zapojené tromi rôznymi spôsobmi:

- zapojenie do hviezdy, značenie: λ, Y ,
- zapojenie do trojuholníka , značenie Δ , D ,
- zapojenie do lomenej hviezdy, značenie Z.

V prípade, že vstupné a výstupné vinutia trojfázového transformátora sú spojené rovnakým spôsobom (λ , λ ;Δ, Δ) , sú linkové napätia na oboch stranách vo fáze. Ak sú zapojenia rozdielne, medzi linkovými napätiami vstupného a výstupného vinutia je fázový posuv 30°. Ďalej je dôležité prihliadať na to, či sú na svorkovnicu transformátora pripojené začiatky alebo konce vinutia výstupného napätia. Fázový posuv medzi rovnako označenými svorkami vstupného a výstupného vinutia sa udáva tzv. hodinovým uhlom. Platí pre hodinový uhol, že hodina = 30°.

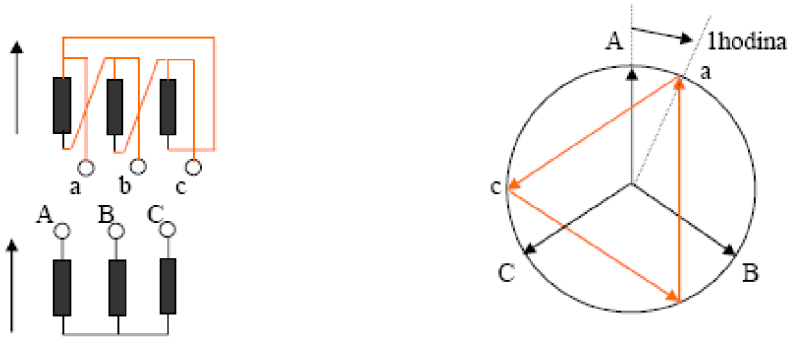
Zapojenie vinutí a hodinový uhol je určujúcou vlastnosťou paralelne pracujúcich transformátorov.

Táto vlastnosť sa vyjadruje symbolom trojznakovým symbolom:

- spojenie vinutia vyššieho napätia – veľké písmená Y,D,Z,
- spojenie vinutia nižšieho napätia – malé písmená y,d,z,

- hodinový uhol v hodinách 0, 1, 2, 4, 5, 6 ,7, 8, 10,11,

Napríklad Yd1 značí, že vinutie vyššieho napätia je spojené do hviezdy, vinutie nižšieho napätia je spojené do trojuholníka a fázový rozdiel meraný od fázy vyššieho napätia k rovnakej fáze nižšieho napätia je 1 x 30° = 30°. Toto zapojenie demonštruje nasledujúci obrázok. Poznamenávam, že šípky smerujú od začiatkov ku koncom vinutí.



Obr. 5-3 Zapojenie vinutia Yd1 transformátora a fázorový diagram napätí. (Zdroj: LITERATÚRA[7])

Hodinový uhol dostanem, ak fázu A cievky vyššieho napätia posuniem do polohy 12 na hodinkách a zodpovedajúci vektor fázy nn ukazuje číslo, ktoré je totožné s hodinovým uhlom. Hodinový uhol sa najlepšie určí z vektorového diagramu vzťahovaného na danú schému zapojenia, v ktorej si označíme zmysly indukovaných napätí, príp. zmysli vinutia cievok. Ak je zmysel rovnaký, aj smery šípok sú rovnaké. V opačnom prípade sú protibežné, posunuté o 6 hodín. Uhol medzi vektormi tej istej fázy na vn a nn strane udáva hodinový uhol.

Ak by som chcel kráčať opačným smerom, t.j. zo zadaného symbolu definujúceho vinutie (vn, nn a hodinový uhol) zvoliť príslušné zapojenie, postupoval by som takto:

> platí predstava, že okraj kruhu, ktorý obkolesuje vektorový diagram, prislúcha svorkovnici. To znamená, že je postačujúce sledovať smer šípky daného vektora napätia.
>
> Tá časť vektora, kde sa končí šípka, sa uvažuje za koniec vinutia, naopak, za začiatok vinutia sa zohľadňuje začiatok šípky.

Pri riešení trojfázových transformátorov budem počítať s jednofázovým modelom. Pri výpočtoch použijem fázové hodnoty napätia a prúdu. Musím však hľadieť na to, že všeobecne je transformátor zadávaný nominálnymi hodnotami. A nominálne hodnoty sú združené hodnoty. Tak napríklad pri zapojení niektorej strany transformátora do trojuholníka počítame so zadanými hodnotami, pretože pri tomto zapojení sú združené hodnoty súčasne aj fázovými hodnotami. Pre zapojenie do hviezdy musím zadané napätie vydeliť hodnotou $\sqrt{3}$, aby som pracoval s fázovou hodnotou. ([7])

Nasledovná tabuľka zahŕňa prepočtové koeficienty pre všetky varianty zapojenia.

Tab. 5-1 Prepočtové koeficienty medzi nominálnymi a fázovými hodnotami (Zdroj: LITERATÚRA[7]

Spojení vinutí		Napětí			proudy		
Vstupní v.	Výstupní v.	U_1	U_2	U_1/U_2	I_1	I_2	I_1/I_2
Y	y	$\sqrt{3}U_{1f}$	$\sqrt{3}U_{2f}$	N_1/N_2	I_{1f}	I_{2f}	N_2/N_1
D	D	U_{1f}	U_{2f}	N_1/N_2	$\sqrt{3}I_{1f}$	$\sqrt{3}I_{2f}$	N_2/N_1
Y	D	$\sqrt{3}U_{1f}$	U_{2f}	$\sqrt{3}N_1/N_2$	I_{1f}	$\sqrt{3}I_{2f}$	$N_2/(\sqrt{3}N_1)$
D	Y	U_{1f}	$\sqrt{3}U_{2f}$	$N_1/(\sqrt{3}N_2)$	$\sqrt{3}I_{1f}$	I_{2f}	$\sqrt{3}N_2/N_1$
D	Z	U_{1f}	$3U_{2f}/2$	$2N_1/(3N_2)$	$\sqrt{3}I_{1f}$	I_{2f}	$3N_2/(2N_1)$
Y	z	$\sqrt{3}U_{1f}$	$3U_{2f}/2$	$2N_1/(3N_2)$	I_{1f}	I_{2f}	$\sqrt{3}N_2/(2N_1)$

5.2.2 Paralelná spolupráca. Podmienky paralelnej spolupráce.

Pri potrebe zabezpečenia dodávky elektrickej energie z viacerých zdrojov sa realizuje riešenie pomocou viacerých transformátorov napájajúcich jedno odberné miesto. Stupeň dodávky elektrickej energie je jedným z možných dôvodov potreby paralelnej spolupráce. Existuje však mnoho iných prípadov, keď je potrebné pripojiť k jestvujúcemu transformátoru ďalší s vyhovujúcimi parametrami, aby sa uspokojili výkonové požiadavky po rozšírení výroby priemyselného závodu.

Ako som už naznačil v predchádzajúcej stati, existujú podmienky pre možnosť paralelnej spolupráce transformátorov. Tie sú nasledovné:

- rovnaký hodinový uhol,
- rovnaké menovité hodnoty vstupného a výstupného napätia,
- rovnaké napätie nakrátko, aby sa zaťaženie transformátorov rozdelilo úmerne ich menovitým výkonom,
- musia byť spojené zodpovedajúcimi fázami.

V prípade nedodržania týchto podmienok dochádza k rozdielu potenciálov medzi vinutiami transformátorov, keďže priebehy napätí sa neprekrývajú. Vznikajú vyrovnávacie prúdy. O ich závažnosti asi netreba polemizovať, ak uvediem, že rozdiel okamžitých hodnôt napätia je hnacou silou a odpor vinutia je brzdou. Takýmto prípadom sa musí predchádzať dôkladným výberom transformátorov.

5.3 Náhradná schéma transformátora a prepočet

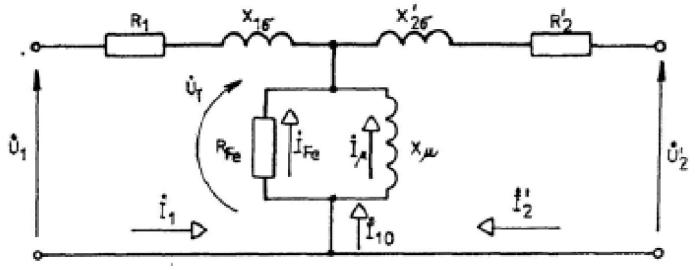
Transformátor sa z elektrického hľadiska skladá z dvoch častí, a to z primárnej a sekundárnej. Logika diktuje, že sa nedá nakresliť náhradná schéma ako jeden celok. Existuje však výnimka. A tou je rovnaké napätie na svorkách primárneho a sekundárneho vinutia. Aj keď distribučné transformátory nemajú túto vlastnosť (negovala by sa ich hlavná funkcia), dá sa to početne zariadiť. Proces sa volá prepočítanie transformátora. Napätie na strane, ktorú prepočítavam, sa zmení lineárne s hodnotou prevodu k, hodnoty prvkov náhradnej schémy sa zmenia kvadraticky s veľkosťou k. Tento aparát bude neskôr hlbšie popísaný. Pre transformátor sa aplikujú dve náhradné schémy.

Jedná sa o:

- Gamma (Γ),
- π.

V tejto práci bude najprv rozanalyzované správanie transformátora pri uvážení náhrady dvojbranom π. V stati 5.6 sa potom zhrnú vzťahy pre článok Γ.

Náhradná schéma π prepočítaného transformátora na primárnu stranu je nasledovná:



Obr. 5-4 Náhradná schéma transformátora. (Zdroj: LITERATÚRA[7])

Uvedené veličiny značia:

R_1 – ohmický odpor vstupného vinutia,

$X_{1\sigma}$ – rozptylová reaktancia vstupného vinutia, zahŕňa tú skutočnosť, že celý magnetický tok sa neuzatvorí cez železné jadro, v prípade veľkého nasýtenia sa časť uzatvorí vzduchom, a teda rastie magnetický odpor,

X_μ – magnetizačná reaktancia,

$X'_{2\sigma}$ – prepočítaná rozptylová reaktancia výstupného vinutia,

R'_2 – prepočítaný ohmický odpor výstupného vinutia,

R_{FE} – odpor nahradzujúci straty v železe.

5.3.1 Prepočítanie parametrov transformátora

Výber strany, na ktorú sa bude prepočítavať, je voľný. Musia sa však brať do úvahy niektoré skutočnosti. A to:

« v prvom rade sa zvolí napätie, ku ktorému sa prispôsobí druhé napätie. Uváži sa, že strana nn je konštantná, tak sa napätie strany vn podelí hodnotou prevodu a dostaneme sa na úroveň napätia strany nn.

Otázkou zostáva, ktoré prvky náhradnej schémy sa budú prepočítavať, keď sa snažím o prepočet na stranu nn. Odpoveď je nasledovná:

« parametre, ktoré sa zistili pri napätí nn sú skutočné a nepodliehajú prepočtu. Napríklad priečna vetva náhradnej schémy sa vypočítava z údajov, ktoré boli nadobudnuté pri meraní naprázdno. Meranie naprázdno sa obyčajne realizuje na strane nn.

« Parametre, ktoré sa zistili pri napätí vn sa musia prepočítať. Na základe merania nakrátko, ktoré sa obvykle realizuje na strane vn, zisťujem eparametre pozdĺžnej vetvy náhradnej schémy. Z toho vyplývajúc parametre pozdĺžnej vetvy na strane vn sú skutočné, na strane nn neskutočné. Preto sa musí aplikovať prepočet na stranu nn. Vhodne sa použije kvadrát prevodu, aby sme sa dopracovali k žiadanému cieľu.

Opísaný postup bude v neskoršej fáze predvedený na príklade.

Ako už bolo spomenuté, pre napätie platí

$$U_2' = U_1 = k.U_2 \tag{5.9}$$

$$U_1' = U_2 = \frac{U_1}{k} \tag{5.10}$$

Pre prepočítavania ohmických odporov a reaktancií je situácia iná. Vychádza sa z toho, že straty pri prepočítanom a skutočnom odpore musia byť také isté, aké boli pri skutočnom odpore a prúde.

$$I_2'^2.R_2' = I_2^2.R_2 \tag{5.11}$$

Úpravou vzťahu 5.11 dostávame:

$$R_2' = R_2.\frac{I_2^2}{I_2'^2} = R_2.\left(\frac{N_1}{N_2}\right)^2 = R_2.k^2 \tag{5.12}$$

$$R_1' = \frac{R_1}{k^2} \tag{5.13}$$

Podobne pre prepočet induktívnych odporov bude platiť vzťah:

$$X_{\sigma 2}' = X_{\sigma 2}.k^2 \tag{5.14}$$

$$X'_{\sigma 1} = \frac{X_{\sigma 1}}{k^2} \tag{5.15}$$

5.4 Správanie transformátora pri rozličnom zaťažení, fázorové diagramy

Práve sledovanie zmeny elektrických stavov pri rozličnej záťaži je hlavným predmetom skúmania tejto semestrálnej práce. Okrem klasického prípadu zaťaženia sa načrtnú aj stavy nakrátko a naprázdno. Meranie týchto stavov nám umožňuje počítať parametre náhradnej schémy.

5.4.1 Transformátor pri prevádzkovom zaťažení

Predpokladáme, že je transformátor zaťažený, t.j. na svorky výstupného vinutia je pripojený určitý odpor. Týmto vinutím potečie prúd. Napätie vstupnej strany má konštantnú hodnotu, rovnú súčtu elektromotorickej sily a úbytku napätia na odpore primárneho vinutia. V činnosti naprázdno je magnetický tok Φ vyvolaný magnetomotorickou silou(ampérzávitmi) $I_\mu.N_1$. Pri zaťažení vznikne v transformátore dodatočná magnetomotorická sil rovná $I_2.N_2$ pôsobiaca proti pôvodnému magnetickému toku. Pretože magnetický tok má konštantnú veľkosť, musí sa v magnetomotorickej sile vstupného vinutia objaviť zložka rovná $I_2.N_2$,kompenzujúca v každom okamihu vplyv ampérzávitov sekundárnej strany $I_2.N_2$. Z toho vyplýva, každému vzrastu výstupného prúdu musí zodpovedať vzrast primárneho prúdu tak, aby ostala zložka na vytvorenie magnetického toku. ([5])

Z predchádzajúcich úvah vyplynulo, že k vytvoreniu magnetického toku Φ je potrebný magnetizačný prúd I_μ. Má charakter jalového prúdu, pretože je vo fázi s magnetizačným tokom Φ, ktorý je oneskorený oproti napätiu U_1 o uhol $\pi/2$. So vznikom striedavého magnetického toku vo feromagnetickom obvode sú spojené straty v železe, ktorého krytie musí transformátor zabezpečiť prúdom I_{FE}, ktorý je vo fáze s U_1.

Výsledok oboch prúdov je súčet fázorov:

$$\overline{I_0} = \overline{I_\mu} + \overline{I_{FE}} \tag{5.16}$$

V tomto vzťahu je hodnota I_{FE} zanedbateľná, práve preto sa niekedy uvažuje o rovnosti ostatných 2 členov. Taktiež je zrejmé z predchádzajúcich úvah:

$$\overline{I_\mu} = \overline{I_1} + \overline{I'_2} \tag{5.17}$$

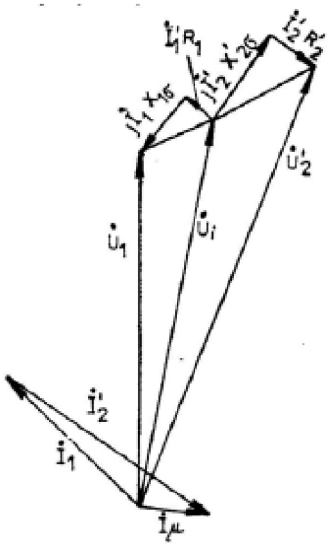
Po tomto poznatku sa môžem venovať konštrukcii fázorových diagramov pre rôzne zaťaženia, ktoré odhalia, akým spôsobom sa bude vyvíjať napätie na sekundárnej strane.

Pri zhotovovaní fázorového diagramu sa vychádza z fázora napätia $\overline{U'_2}$. K nemu sa zostrojí prúd určitej veľkosti, fázovo posunutý. Ak sa pričítajú k napätiu $\overline{U'_2}$ úbytky napätí: činné a jalové (sú vo fáze, resp. kolmé na $\overline{I'_2}$), dostaneme fázor indukovaného

napätia. $\overline{U_i}$ je indukované hlavným tokom Φ, ktorý ju (a teda aj $\overline{I_0}$) predbieha o uhol π/2. $\overline{I_0}$ alebo po zanedbaní $\overline{I_{FE}}$, platí pre $\overline{I_\mu}$ vzťah (5.17). Teraz sa pričítajú k indukovanému napätiu úbytky napätí na primárnej strane a dostanem napätie $\overline{U_1}$.

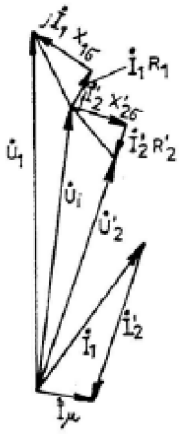
Je potrebné poznamenať, že prúdy sú nakreslené v spotrebiteľskom systéme. To znamená, že prúd tečie z miesta plusového symbolu do mínusu. Preto napríklad fázový posun pri zaťažení čistým ohmickým odporom medzi napätím a prúdom na sekundárnej strane je 180°. Ak by sa bral do úvahy generátorický režim, fázový posun by činil 0°.

Fázorové diagramy niektorých typov zaťažení:



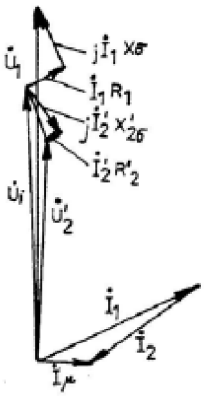
Obr. 5-5 Fázorový diagram transformátora zaťaženého kapacitnou záťažou cos φ= 0,30 (Zdroj: LITERATÚRA [7])

Transformátor napájajúci záťaž kapacitného charakteru sa správa obdobne ako to ukazuje fázorový diagram na obr. 5-5. Prúd predbieha napätie na primárnej aj sekundárnej strane. Tento stav spôsobuje, že úbytky napätí na prvkoch náhradnej schémy budú záporné. To znamená, že kapacitné zaťaženie spôsobuje napäťové zisky. Reálny napäťový pomer nekorešponduje s týmto fázorovým diagramom, keďže úbytky napätí sú v nepomere s reálnymi. Účelom je však v tejto fáze názornosť.



Obr. 5-6 Fázorový diagram transformátora zaťaženého ohmickým odporom. (Zdroj: LITERATÚRA[7])

Pre zaťaženie ohmickým odporom je príznačný nulový (resp. 180°) fázový posun medzi napätím a prúdom na svorkách sekundárneho vinutia. Badateľným vstupom do transformátora je určitá miera jalovej energie, ktorá sa spotrebuje na vytvorenie magnetického poľa a pokrytie strát rozptylovou reaktanciou. A tá badateľnosť spočíva v $\cos\varphi_1$ induktívneho charakteru. Samozrejme je prítomný aj jav poklesu sekundárneho napätia oproti primárnemu. Ten pokles je spôsobený stratami v pozdĺžnej vetve náhradnej schémy transformátora.



Obr. 5-7 Fázorový diagram transformátora zaťaženého záťažou cos φ= 0,60ind. (Zdroj: LITERATÚRA[7])

Indukčný charakter záťaže je charakteristický úbytkom napätia, ktorého dôvod je rovnaký ako v predchádzajúcom prípade(straty v pozdĺžnej vetve). A obdobne platí: $\varphi_1 > \varphi 2$. Rozdiel je ekvivalentný s jalovými stratami.

5.4.2 Transformátor naprázdno

Ak má transformátor rozpojené sekundárne vinutie, neodovzdáva žiadnu energiu, potom sa hovorí o stave naprázdno. Jej správanie je v takom prípade rovnaké ako pre klasickú tlmivku so železným jadrom. Ak sa zoberieme do úvahy ideálny prípad transformátora, ktorý nemá nijaké straty, dostávame jednoduchý obraz o napäťových

a magnetických pomeroch. Transformátor berie zo siete len magnetizačný prúd, ktorý je potrebný na vyvolanie magnetického toku. Tento prúd je fázovo zaostávajúci o 90° oproti napätiu.

Ak sa však uváži reálny stav, transformátor naprázdno bude odoberať aj činnú elektrickú energiu na pokrytie činných strát (straty vo vinutí transformátora a straty v železe – vírivé prúdy, hysterézne straty). V skutočnosti teda $\varphi < 90°$.

Po zhrnutí, transformátor naprázdno je spotrebiteľom jalovej energie a nepatrnej činnej energie. Takýto chod nemá svoje opodstatnenie, pretože na kompenzačné účely sa aplikuje tlmivka. Existuje však jedna nezanedbateľná skutočnosť, kvôli ktorej sa popisuje tento stav.

Výsledky z merania naprázdno sú vstupnými údajmi pri výpočtoch parametrov náhradnej schémy, konkrétne priečnej vetvy T- článku.

Meranie sa prevádza obyčajne zo strany nn. Merajú sa klasickým zapojením tri veličiny, a to: P_{10}, I_{10}, U_{10}.

Pri výpočte sa zanedbávajú prvky pozdĺžnej vetvy. Postupuje sa nasledovne:

$$\cos\varphi_{10} = \frac{P_{10}}{U_{10}.I_{10}} \tag{5.18}$$

$$I_{FE} = I_{10}.\cos\varphi \tag{5.19}$$

$$R_{FE} = \frac{U_{10}}{I_{FE}} \tag{5.20}$$

$$I_{\mu} = I_{10}.\sin\varphi \tag{5.21}$$

$$X_{\mu} = \frac{U_{10}}{I_{\mu}} \tag{5.22}$$

Ostáva poznamenať, že všetky hodnoty sa vzťahujú na jednu fázu. Pri trojfázových transformátoroch, ktoré majú meranú stranu zapojenú do hviezdy, namerané údaje budú združené a súčasne nefázové. Tento fakt treba ošetriť vhodným ponásobením konštantami. Algoritmus sa predvedie na modelovom príklade pre trojfázový transformátor v neskoršej stati.

5.4.3 Transformátor nakrátko

Stav nakrátko sa dosiahne, ak sa skratujú svorky jedného vinutia transformátora vodičom dostatočného prierezu. Takýto stav sa bežne využíva pri zváracích transformátoroch, ale v oblasti distribúcie elektrickej energie je pre nás meranie stavu

nakrátko druhým pilierom pre výpočet parametrov náhradnej schémy transformátora. Určujeme pomocou nej prvky pozdĺžnej vetvy.

Meranie nakrátko sa obyčajne prevádza zo strany vn. Zisťujú sa nasledovné tri veličiny: P_{1K}, I_{1K}, U_{1K}. Vďaka elektrickým stavom, ku ktorým dochádza pri stave nakrátko náhradná schéma môže bez spôsobenia relevantnej chyby podľahnúť zjednodušeniu. To pozostáva z vynechania priečnej vetvy. Prvky pozdĺžnej vetvy sa nahradia jedným spoločným prvkom a tým je impedancia Z_K. Ak by sa začala rozbaľovať, dostali by sme X_K a R_K, t.j. celkovú hodnotu reaktancie a činného odporu na pozdĺžnej vetve.

Pri určovaní sa postupuje nasledovne:

$$\cos\varphi_{1K} = \frac{P_{1K}}{U_{1K}.I_{1K}} \tag{5.23}$$

$$Z_K = \frac{U_{1K}}{I_{1K}} \tag{5.24}$$

$$R_K = \frac{P_{1K}}{I_{1K}^2} \tag{5.25}$$

$$X_K = \sqrt{Z_K^2 - R_K^2} \tag{5.26}$$

Keďže prvky považujeme za symetrické, bude platiť:

$$R_1 = R_2' = \frac{R_K}{2} \tag{5.27}$$

obdobne pre prvky reprezentujúce vplyv rozptylových reaktancií:

$$X_{1\sigma} = X_{2\sigma}' = \frac{X_K}{2} \tag{5.28}$$

Platí to isté ako pri počítaní z merania naprázdno. Všetky hodnoty sa vzťahujú na jednu fázu. Pri trojfázových transformátoroch, ktoré majú meranú stranu zapojenú do hviezdy, namerané údaje budú združené a súčasne nefázové. Tento fakt treba ošetriť vhodným ponásobením konštantami. Algoritmus sa predvedie na modelovom príklade pre trojfázový transformátor v nasledujúcej kapitole.

5.5 Ukážkový výpočet parametrov náhradnej schémy 3f transformátora

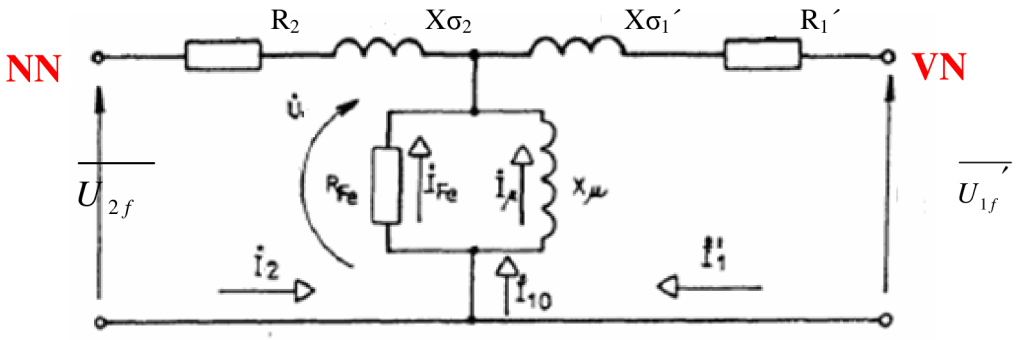
Zadanie

Trojfázový transformátor s výkonom 130kVA s menovitými hodnotami napätí 6000V/400V v zapojení Dy má tieto hodnoty z merania nakrátko a naprázdno:

- Meranie naprázdno realizované zo strany nn: P_{10} = 1800W, I_{10} = 15A, U_{10} = 400V.
- Meranie nakrátko realizované zo strany vn: P_{1K} = 2550W, I_{1K} = 12,5A, U_{1K} = 310V.

Vypočítajte parametre náhradnej schémy prepočítané na stranu nn.

Náhradná schéma



Obr. 5-8 Náhradná schéma pre príklad (Zdroj: LITERATÚRA[7])

Náhradná schéma sa nakreslila takým spôsobom, že do ľavej časti je situovaná časť obvodu, na ktorú sa prepočítava (nízkonapäťová časť).

Poznámka k zapojeniu vinutí transformátora a k výpočtovým dôsledkom:

- Pre výpočet parametrov trojfázového transformátora platí, že sa počíta obdobne ako pre jednofázový transformátor, ale výsledok sa násobí konštantou 3.
- Pre výpočet výsledkov sa používajú fázové hodnoty napätia a prúdu.
- NN strana je zapojená do hviezdy. Zadaná menovitá hodnota napätia je združená, a nie fázová hodnota. Preto sa musí deliť menovitá hodnota konštantou $\sqrt{3}$. Menovitá hodnota prúdu je fázová hodnota.

« VN strana je zapojená do trojuholníka. Platí, že menovitá hodnota napätia je fázová hodnota. Fázová hodnota prúdu sa rovná podielu menovitej hodnoty prúdu a konštanty $\sqrt{3}$.

Výpočet parametrov priečnej vetvy

Parametre sa počítajú z výsledkov merania naprázdno. Výpočet je nasledovný:

$$P_{20} = 3.\frac{U_{2f}^2}{R_{FE}} = 3.\frac{\frac{U_2^2}{(\sqrt{3})^2}}{R_{FE}} \tag{5.29}$$

$$R_{FE} = \frac{U_2^2}{P_{20}} = \frac{400^2}{1800} = 88{,}88\Omega \tag{5.30}$$

$$I_{FE} = \frac{U_{2f}}{R_{FE}} = \frac{\frac{400}{\sqrt{3}}}{88{,}88} = 2{,}59A \tag{5.31}$$

$$I_{\mu} = \sqrt{I_0^2 - I_{FE}^2} = \sqrt{15^2 - 2{,}59^2} = 14{,}77A \tag{5.32}$$

$$X_{\mu} = \frac{U_2}{I_{\mu}} = \frac{\frac{400}{\sqrt{3}}}{14{,}77} = 15{,}63\Omega \tag{5.33}$$

Poznámka: Aplikovateľný by bol aj model výpočtu ukázaný v kapitole 5.4.2

Výpočet parametrov pozdĺžnej vetvy

Rátam sa s tým, že uvedená hodnota prúdu pri meraní nakrátko je menovitá hodnota. Ale môžeme sa o tom presvedčiť:

$$S = 3.U_{1f}.I_{1f} \tag{5.34}$$

$$I_{1f} = \frac{S}{3.U_{1f}} = \frac{130000}{3.6000} = 7{,}2A \tag{5.35}$$

Výsledok poukázal na pravdivosť predchádzajúceho výroku, keďže fázová hodnota prúdu je 7,2A, ale po prenásobení konštantou $\sqrt{3}$ dostávame menovitú hodnotu, čo je 12,5A.

$$P_{1K} = 3.R_{1K}.I_{1f}^2 \tag{5.36}$$

$$R_{1K} = \frac{P_{1K}}{I_{1f}^2} = \frac{2550}{7,2^2} = 16,32\Omega \tag{5.37}$$

$$Z_{1K} = \frac{U_{1K}}{I_{1f}} = \frac{310}{7,2} = 42,95\Omega \tag{5.37}$$

$$X_{1K} = \sqrt{Z_{1K}^2 - R_{1K}^2} = \sqrt{42,95^2 - 16,32^2} = 39,73\Omega \tag{5.38}$$

Teraz je nutný prepočet, pretože sme počítali z údajov získaných pri meraní nakrátko zo strany VN.

$$R_{2K} = \frac{R_{1K}}{k^2} = \frac{16,32}{\left(\frac{\frac{6000}{400}}{\sqrt{3}}\right)^2} = 0,024\Omega \tag{5.39}$$

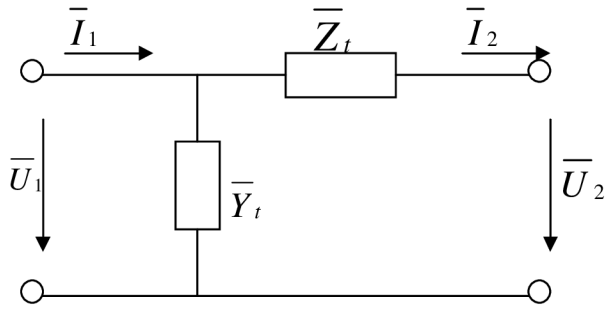
$$R_2 = R_1' = \frac{R_{2K}}{2} = \frac{0,024}{2} = 0,012\Omega \tag{5.40}$$

$$X_{2K} = \frac{X_{1K}}{k^2} = \frac{39,73}{\left(\frac{\frac{6000}{400}}{\sqrt{3}}\right)^2} = 0,059\Omega \tag{5.41}$$

$$X_{\sigma 2} = X_{\sigma 1}' = \frac{X_{2K}}{2} = \frac{0,059}{2} = 0,0295\Omega \tag{5.42}$$

5.6 Náhrada dvojbranom Γ

Literatúra [4] uvádza nasledovné. Náhradná schéma je nasledovná:



Obr. 5-9 Náhrada dvojbranom Γ.

Článok má v pozdĺžnom smere impedanciu Zt, ktorá reprezentuje rozptylové toky vinutí a rezistancie. V priečnom smere sa berie do úvahy admitancia Yt, ktorá modeluje magnetizačný prúd.

S ohľadom na to, že impedancie v priečnom a pozdĺžnom smere sú značne rozdielne (Zt >> 1/Yt), je impedancia Zt približne rovnaká ako impedancia pri chode nakrátko pri menovitom prúde. 1/Yt sa približne rovná impedancii naprázdno pri menovitom napätí.

Tieto hodnoty sa dajú určiť zo štítkových údajov (ide o obdobu predvedeného pre článok π):

1. S_n › menovitý výkon
2. e_k › pomerná hodnota napätia nakrátko vzťažená k menovitému napätiu
3. ΔP_{Fe} › straty výkonu v železe (výkon naprázdno)
4. ΔP_{Cu} › straty výkonu vo vinutí (výkon nakrátko)
5. i_0 › pomerná hodnota prúdu naprázdno vzťažená k menovitému prúdu
6. U_{n1}, U_{n2} › menovité hodnoty primárneho a sekundárneho napätia

Reálna zložka pozdĺžnej impedancie predstavuje rezistanciu oboch vinutí R_t :

$$\Delta P_{Cu} = 3.R_t.I_n^2 = 3.R_t.\left(\frac{S_n}{\sqrt{3}.U_n}\right)^2 \tag{5.43}$$

$$R_t = \frac{\Delta P_{Cu}.U_n^2}{S_n^2} \tag{5.44}$$

Imaginárna zložka pozdĺžnej impedancie predstavuje rozptylovú reaktanciu oboch vinutí.

Platí pre ňu vzťah:

$$X_t = \frac{U_n^2}{S_n} \cdot \sqrt{e_k^2 - \left(\frac{\Delta P_{Cu}}{S_n} \right)^2} \tag{5.45}$$

Reálna zložka priečnej admitancie G_t zahŕňa straty v magnetickom obvode vírivými prúdmi a magnetickou hysteréziou pri menovitom napätí a frekvencii 50 Hz.

$$\Delta P_{Fe} = 3.G_t.U_n^2 \tag{5.46}$$

$$G_t = \frac{\Delta P_{Fe}}{U_n^2} \tag{5.47}$$

Imaginárna zložka priečnej admitancie B_t zahŕňa jalový výkon potrebný k magnetizácii pri menovitom napätí:

$$B_t = \frac{1}{U_n^2} \cdot \sqrt{(S_n.i_0)^2 - \Delta P_{Fe}^2} \tag{5.48}$$

Za napätie U_n dosadzujeme primárne alebo sekundárnu menovitú hodnotu podľa toho, na ktorú z týchto napäťových úrovní hodlám prepočítavať.

5.7 Straty a účinnosť

V súčasnosti je otázka udržiavania stavu životného prostredia viac než aktuálnou otázkou. Spomínané je najmä globálne otepľovanie. Skleníkový efekt je spôsobovaný enormným zvyšovaním obsahu oxidu uhličitého v atmosfére. K značnej produkcii CO_2 dochádza aj pri výrobe elektrickej energie. Z toho vyplývajúc úspora elektrickej energie znamená aj zníženie produkcie CO_2. Veľké straty vznikajú aj pri procese distribúcie elektrickej energie a k týmto stratám prispievajú aj transformátory. Len v Európe sa odhadujú straty elektrickej energie transformátorov na 50TWh za rok. Pre názornosť tohto čísla, ročná spotreba elektrickej energie sa na Slovensku pohybuje okolo hodnoty 25TWh.

Preto je dôležité definovať transformátor z hľadiska stratovosti a podporovať zlepšovanie.

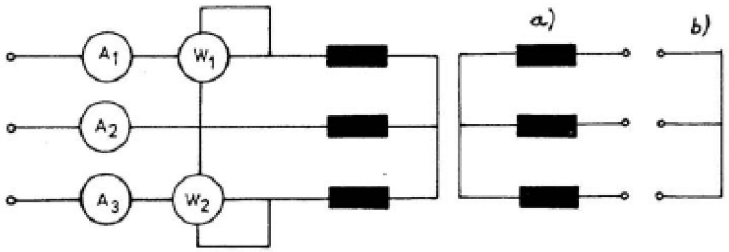
Straty transformátora sa rozdeľujú na [1]:

- Straty naprázdno vznikajúce v materiáli magnetického jadra. Do tejto skupiny patria hysterézne straty (úmerné frekvencii) a straty vírivými prúdmi (úmerné kvadrátu frekvencie). Tvoria hlavný podiel na stratách transformátora, preto technológia výrobného procesu rešpektuje materiály a ich uloženie prispievajúce k znižovaniu strát naprázdno. Tieto straty sú činného charakteru, preto sa v náhradnej schéme nahradzujú prvkom R_{FE}.
- Straty nakrátko alebo Joulove straty pri prechode prúdu vinutiami. Taktiež znamenajú straty činného výkonu.

« Dodatočné straty sú hlavne straty vírivými prúdmi vo vinutí a v konštrukčných častiach blízko vinutia So stúpajúcou teplotou klesajú.. Sú to straty spôsobené rozptylovými tokmi a majú jalový charakter. Účinok dodatočných strát je o to väčší, čím sú železné časti bližšie k jadru a vinutiu transformátora. Závisia od výkonu transformátora. Tieto straty tvoria asi 2% zo strát nakrátko, pri menších transformátoroch sa tento parameter môže vyšplhať na hodnotu 10 – 30% zo strát nakrátko. Na presné určovanie tejto hodnoty sa používajú tabuľky.

« Straty v dielektriku. Dielektrickými stratami nazývame tú časť energie, ktorá sa rozptýli v dielektriku pri pôsobení elektrického poľa a zapríčiňuje jej zohriatie. Do úvahy prichádzajú najmä pri vysokonapäťových transformátoroch, kde sú elektrické polia s vysokým gradientom. Tieto straty sú v porovnaní s ostatnými nepatrné a zanedbávame ich.

Meranie celkových strát prebieha nasledovným spôsobom [7]. Použije sa meracie zapojenie naznačené v ďalšom obrázku.



Obr. 5-10 Schéma zapojenia pre meranie stavu a)naprázdno, b) nakrátko. (Zdroj: LITERATÚRA[7])

Celkové straty určíme z merania naprázdno a nakrátko. Celkové straty sú zložené z týchto dielčch :

$$\Delta P = \Delta P_0 + \Delta P_K + \Delta P_d \tag{5.43}$$

kde
$_{\Delta}P_0$ – straty naprázdno pri menovitom napätí,
$_{\Delta}P_K$ – straty nakrátko pri menovitom prúde,
$_{\Delta}P_0$ – dodatočné straty.

Postup pri meraní je taký, že si v prvej fáze sa merajú odpory vinutí R_1, R_2. Z merania naprázdno sa vyvodzuje hodnota strát v železe podľa vzťahu:

$$\Delta P_{FE} = P_{10} - \Delta P_{10} \tag{5.44}$$

kde
P_{10} – príkon transformátora naprázdno ,
$_{\Delta}P_{10}$ – Joulove straty pri stave naprázdno, rovnajú sa

$$\Delta P_{10} = 3.R_{10}.I_{10}^2 \tag{5.45}$$

Z merania stavu nakrátko sa odvodzujú straty vo vinutí a dodatočné straty. Straty nakrátko $_{\Delta}P_{1K}$ – straty sa rovnajú súčtu Joulových strát $_{\Delta}P_{JK}$ a dodatočných strát $_{\Delta}P_{d}$. Joulove straty majú nasledovný vzťah pre výpočet:

$$\Delta P_{JK} = 3.R_1.I_1^2 + 3.R_2.I_2^2 = 3.(R_1 + R_2').I_1^2 + 3.(R_1' + R_2).I_2^2 \tag{5.46}$$

Straty s teplotou stúpajú, preto ak chceme odmerať reálny prevádzkový stav, musím použiť prepočítanie pomocou konštanty. Matematická operácia pre prepočet strát, ktoré prislúchajú teplote napr. 70°C, je nasledovná:

$$\Delta P_{J70} = \Delta P_{Jt1}.\frac{235+70}{235+t_1} \tag{5.47}$$

kde
$_{\Delta}P_{J70}$ – Joulove straty pre 70°C ,
$_{\Delta}P_{Jt1}$ – Joulove straty pre teplotu okolia ,
t_1 – teplota okolia.

Dodatočné straty sú

$$\Delta P_d = P_{1K} - \Delta P_{JK} \tag{5.48}$$

Skutočnosť, že so stúpajúcou teplotou dodatočné straty klesajú, je ošetrená nasledovným vzťahom:

$$\Delta P_{d70} = \Delta P_{Jt1}.\frac{235+t_1}{235+70} \tag{5.49}$$

Poznamenávam, že teplota 70°C slúži iba pre názornosť, reprezentuje teplotu t_2.

Celkové straty transformátora:

$$\Delta P = \Delta P_{FE} + \Delta P_{Jt2} + \Delta P_{dt2} \tag{5.50}$$

Pre dosahovanie porovnateľnosti iných druhov transformátorov sa zavádza pojem účinnosť. Účinnosť transformátorov je najväčšia spomedzi všetkých elektrických strojov.

Účinnosť je definovaná ako pomer výkonu, ktorý je daný vzťahom $mU_2I_2cos\varphi_2$ k príkonu $mU_1I_1cos\varphi_1$ (súčet výkonu a strát), kde m je počet fáz a hodnoty prúdu a napätia sú fázové veličiny.

Účinnosť pre menovitý prúd I_{2n} je vyjadrená vzťahom:

$$\eta_{t2}(\%) = \frac{m.U_2.I_{2n}.\cos\varphi_2.100}{m.U_2.I_{2n}.\cos\varphi_2 + \Delta P_{FE} + \Delta P_{Jt2} + \Delta P_{dt2}} \tag{5.51}$$

Účinnosť transformátorov v súčasnosti konverguje k hodnote 98%. Uvedené meracie postupy a vzťahy sa čerpajú z literatúry [7].

5.8 Konštrukčné vyhotovenie

Transformátory sa vyrábajú v niekoľkých vyhotoveniach. Významné z historického hľadiska sú najmä olejové transformátory, nedávno prišli na trh suché transformátora, ktoré sú zaliate v epoxide. Novinkou sú amorfné transformátory, ktoré reflektujú požiadavku znižovania strát.

« Olejové transformátory

sú vyrábané hermeticky uzavreté – distribučné transformátory vo vlnových nádobách a výkonové transformátory v radiátorových nádobách. Chladiacim médiom je minerálny olej, silikónový olej alebo ekologické dielektrikum na báze esterov- MIDEL 7131. Magnetické obvody sú vyrábané z orientovaného plechu, skladané spôsobom step-lap.

« Suché transformátory

Klasické suché transformátory a suché transformátory s liatou izoláciou, ktoré spoločnosť vyrába už od roku 1969, sú ekologicky akceptovateľné - neohrozujú životné prostredie, majú bezpečnú prevádzku , minimálnu údržbu a prakticky neobmedzené možnosti inštalácie na mieste spotreby elektrickej energie.

Suché transformátory sú určené iba do vnútorného prostredia, suché transformátory s liatou izoláciu sa vyrábajú aj vo vyhotovení pre montáž do vonkajšieho prostredia.

« Amorfné transformátory

Amorfné transformátory majú magnetický obvod z amorfného kovu. Voči štandardným transformátorom. majú radikálne znížené straty naprázdno o 75% až 80 %.

Obr. 5-11 Amorfný transformátor (Zdroj: LITERATÚRA[2])

6 VÝPOČET ZMENY NAPÄTIA NA NN SVORKÁCH DISTRIBUČNÉHO TRANSFORMÁTORA VN/NN PRI ZMENE JEHO ZAŤAŽENIA

6.1 Zadanie

Priemyselný závod má tri transformátory, každý s menovitým výkonom S_n = 1,6MVA a prevodom p = 22/0,4kV. Závod je napájaný z trojfázového vedenia s menovitým napätím U_n = 22kV so zadanými parametrami z rozvodne 22kV, kde sa udržuje konštantné napätie U = 23,1kV. Určte, ako sa bude meniť napätie na svorkách nízkeho napätia transformátorov pri zmenách výkonu od chodu naprázdno do menovitého zaťaženia transformátorov. Účinník sa predpokladá konštantný a rovná sa 0,95.

Parametre transformátoru:

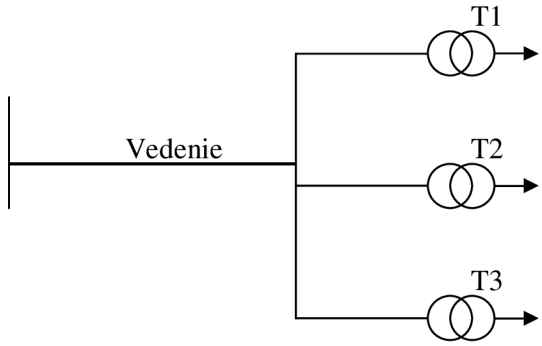
- S_n = 1600 kVA,
- U_{1n} = 22000V,
- U_{2n} = 400V,
- D/yn1,
- $u_{k\%}$ = 6,
- $i_{0\%}$ = 0,7,
- $_{\Delta}P_{Fe}$ = 2410W,
- $_{\Delta}P_{cu}$ = 16000W.

Odbočky transformátorov sa môžu nastaviť na hodnoty U_n x (0,95 – 1,00 – 1,05). To znamená: (20,9kV – 22kV – 23,1kV).

Parametre vedenia:

- R_k = 0,319 Ω/km,
- X_k = 0,36 Ω/km,
- l = 18 km,
- U_n = 22000V.

6.2 Schéma zodpovedajúca zadaniu, postup riešenia úlohy

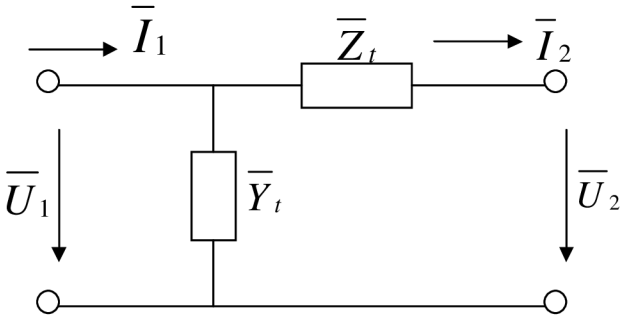


Obr. 6-1 Schéma riešenej úlohy

6.3 Riešenie

Náhrada transformátora:

Náhradná schéma je nasledovná:



Obr. 6-2 Náhrada dvojbranom Γ.

1 kus transformátoru má nasledovné parametre:

Reálna zložka pozdĺžnej impedancie predstavuje rezistanciu oboch vinutí R_t :

$$R_t = \frac{\Delta P_{Cu}.U_n^2}{S_n^2} = \frac{16000.22000^2}{1600000^2} = 3{,}025\Omega \qquad (6.1)$$

Imaginárna zložka pozdĺžnej impedancie predstavuje rozptylovú reaktanciu oboch vinutí.

Platí pre ňu vzťah:

$$X_t = \frac{U_n^2}{S_n}.\sqrt{e_k^2 - \left(\frac{\Delta P_{Cu}}{S_n}\right)^2} = \frac{22000^2}{1600000}.\sqrt{0{,}06^2 - \left(\frac{16000}{1600000}\right)^2} = 17{,}89\Omega \qquad (6.2)$$

Reálna zložka priečnej admitancie G_t zahŕňa straty v magnetickom obvode vírivými prúdmi a magnetickou hysteréziou pri menovitom napätí a frekvencii 50 Hz.

$$G_t = \frac{\Delta P_{Fe}}{U_n^2} = \frac{2410}{22000^2} = 4{,}98.10^{-6}\,S \tag{6.3}$$

Imaginárna zložka priečnej admitancie B_t zahŕňa jalový výkon potrebný k magnetizácii pri menovitom napätí:

$$B_t = \frac{1}{U_n^2}.\sqrt{(S_n.i_0)^2 - {}_\Delta P_{Fe}^2} = \frac{1}{22000^2}.\sqrt{(1600000.0{,}007)^2 - 2410^2} = 2{,}26.10^{-5}\,S \tag{6.4}$$

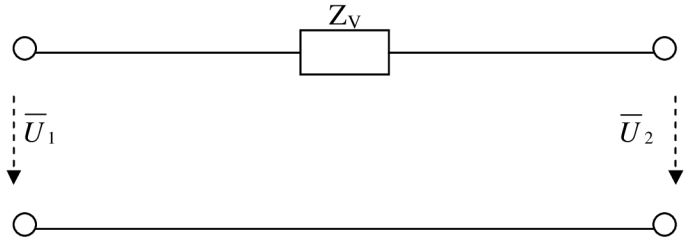
Tri transformátory majú nasledovné parametre prvkov náhradného článku Γ:

$$\overline{Z_t} = \frac{1}{3}.\overline{Z_{1t}} = \frac{1}{3}.(3{,}025 + j17{,}89) = (1{,}0083 + j5{,}9633)\Omega \tag{6.5}$$

$$\overline{Y_t} = 3.\overline{Y_{1t}} = 3.(4{,}97 - j22{,}6).10^{-6} = (1{,}491 - j6{,}78).10^{-5}\,\Omega \tag{6.6}$$

Náhrada vedenia:

Náhradná schéma je nasledovná:

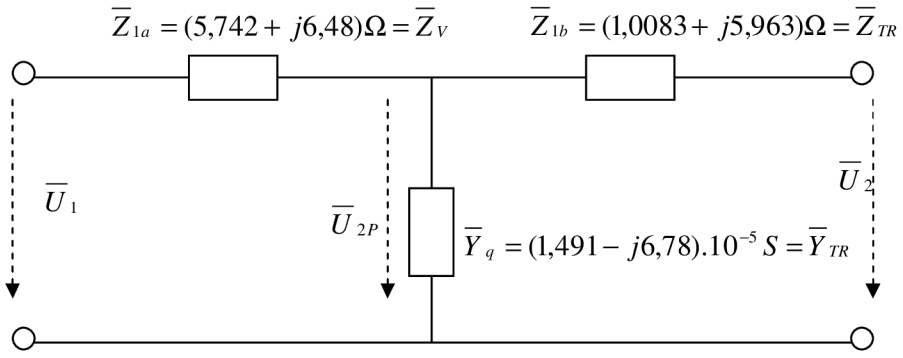


Obr. 6-3 Náhrada dvojbranom jedným pozdĺžnym parametrom.

Vedenie má nasledovnú pozdĺžnu impedanciu:

$$\overline{Z_V} = l.(R_k + jX_k) = 18.(0{,}319 + j0{,}36) = (5{,}742 + j6{,}48)\Omega \tag{6.7}$$

Nesúmerný T článok, ktorý modeluje celú situáciu (spojenie vedenia a transformátorov) má nasledovnú podobu:



Obr. 6-4 Náhrada schémy nesúmerným T-článkom

Z tohto T – článku vypočítam Blondelove konštanty:

$$\overline{A} = 1 + \overline{Z}_{1a}.\overline{Y}_q =$$

$$1 + (5{,}742 + j6{,}48).(1{,}491 - j6{,}78).10^{-5} = \quad (6.8)$$
$$(1{,}0005249 - j0{,}0002927) = 1{,}000525\angle -0{,}0167^{o}$$

$$\overline{B} = \overline{Z}_{1a} + \overline{Z}_{1b} + \overline{Z}_{1a}.\overline{Z}_{1b}.\overline{Y}_q =$$

$$(5{,}742 + j6{,}48) + (1{,}0083 + j5{,}963) + \quad (6.9)$$
$$(5{,}742 + j6{,}48).(1{,}0083 + j5{,}963).(1{,}491 - j6{,}78).10^{-5} =$$
$$= (6{,}752 + j12{,}448)\Omega = 14{,}159\angle +61{,}51^{o}\Omega$$

$$\overline{C} = \overline{Y}_q = (1{,}491 - j6{,}78).10^{-5}\,S \quad (6.10)$$

$$\overline{D} = 1 + \overline{Z}_{1b}.\overline{Y}_q$$

$$1 + (1{,}0083 + j5{,}963).(1{,}491 - j6{,}78).10^{-5} = \quad (6.11)$$
$$(1{,}000419 + j0{,}0000205) = 1{,}000419\angle 0{,}0017^{o}$$

Pri riešení úlohy sa vychádza z nasledovného vzťahu (Literatúra[4] 4.5):

$$\overline{U_1} = \overline{A}.\overline{U}_2 + \overline{B}.\frac{\overline{S}_2}{\overline{U}_2^*} \tag{6.12}$$

Po úprave vzniká tvar:

$$\overline{S}_2 = \frac{\overline{U}_1.\overline{U}_2^*}{\overline{B}} - \frac{\overline{A}}{\overline{B}}.U_2^2 \tag{6.13}$$

V predchádzajúcom vzťahu sa uvážilo:

$$\overline{U}_2.\overline{U}_2^* = U_2^2 \tag{6.14}$$

Pre jednotlivé prvky platí:

$$\overline{U}_1 = U_1 \angle 0^o \tag{6.15}$$

$$\overline{U}_2 = k.U_1 \angle \vartheta_2 \tag{6.16}$$

$$\overline{A} = A \angle \alpha \tag{6.17}$$

$$\overline{B} = B \angle \beta \tag{6.18}$$

Riešením rovnice (6.13) dostávame po dosadení (6.15, 6.16, 6.17, 6.18):

$$\overline{S}_2 = P_2 - jQ_2 = \frac{k.U_1^2}{B} \angle -(\vartheta_2 + \beta) - \frac{A.k^2.U_1^2}{B} \angle (\alpha - \beta) \tag{6.19}$$

Pri zadanom P_2, Q_2 sú hľadanými veličinami k, υ_2. Rozpis vzťahu (6.19) sa prevedie pomocou formálnych skratiek:

$$m_1 = \frac{U_1^2}{B} \tag{6.20}$$

$$m_2 = \frac{A.U_1^2}{B}.\cos(\alpha - \beta) \tag{6.21}$$

$$m_3 = \frac{A.U_1^2}{B}.\sin(\alpha - \beta) \tag{6.22}$$

Teraz sa budú aplikovať zmienené formálne skratky a verzorový tvar výkonu prevedieme na tvar:

$$\begin{aligned}\overline{S}_2 = P_2 - jQ_2 &= \frac{k.U_1^2}{B}\angle -(\vartheta_2+\beta) - \frac{A.k^2.U_1^2}{B}\angle(\alpha-\beta) = \\ &= \left\{\frac{k.U_1^2}{B}.\cos\left[-(\vartheta_2+\beta)\right] + j\frac{k.U_1^2}{B}.\sin\left[-(\vartheta_2+\beta)\right]\right\} - \\ &- \left\{\frac{k^2.A.U_1^2}{B}.\cos(\alpha-\beta) + j\frac{k^2.A.U_1^2}{B}.\sin(\alpha-\beta)\right\} = \\ &= \left[k.m_1.\cos(\vartheta_2+\beta) - k^2.m_2\right] - j\left[k.m_1.\sin(\vartheta_2+\beta) + k^2.m_3\right]\end{aligned} \tag{6.23}$$

Platí teda:

$$P_2 = k.m_1.\cos(\vartheta_2+\beta) - k^2.m_2 \tag{6.24}$$

$$Q_2 = k.m_1.\sin(\vartheta_2+\beta) + k^2.m_3 \tag{6.25}$$

Z rovníc (6.24),(6.25) sa vyjadria goniometrické členy:

$$\cos(\vartheta_2+\beta) = \frac{P_2 + m_2.k^2}{m_1.k} \tag{6.26}$$

$$\sin(\vartheta_2+\beta) = \frac{Q_2 - m_3.k^2}{m_1.k} \tag{6.27}$$

Pre goniometrické funkcie platí:

$$\cos^2(\vartheta_2+\beta) + \sin^2(\vartheta_2+\beta) = 1 \tag{6.28}$$

Dosadením (6.26) a (6.27) do vzťahu (6.28) vznikne:

$$\left(\frac{P_2 + m_2.k^2}{m_1.k}\right)^2 + \left(\frac{Q_2 - m_3.k^2}{m_1.k}\right)^2 = 1 \tag{6.29}$$

Postupným upravovaním (6.29) sa vytvorí vzťah (6.30):

$$\frac{P_2^2 + 2P_2.m_2.k^2 + m_2^2.k^4}{m_1^2.k^2} + \frac{Q_2^2 - 2Q_2.m_3.k^2 + m_3^2.k^4}{m_1^2.k^2} = 1$$

$$P_2^2 + 2P_2.m_2.k^2 + m_2^2.k^4 + Q_2^2 - 2Q_2.m_3.k^2 + m_3^2.k^4 = m_1^2.k^2$$

$$k^4.\left(m_2^2+m_3^2\right)+k^2.\left(2P_2.m_2-2Q_2.m_3-m_1^2\right)+\left(P_2^2+Q_2^2\right)=0 \tag{6.30}$$

Táto rovnica je bikvadratickou pre k. Vyrieši sa substitučnou metódou pri uvážení: $k^2 = x$.

V nasledujúcej časti bude poukázaný príklad výpočtu konštanty k a následne sekundárneho napätia pre menovitú hodnotu zaťaženia.

Zo zadania alebo z predchádzajúcich výpočtov sú známe tieto hodnoty:

- Sn = 4800kVA,
- cos φ = 0,95,
- $\overline{U}_1 = \left|\overline{U}_1\right|\angle\vartheta_1 = 23100\angle 0^o V$,
- $\overline{A} = A\angle\alpha = 1{,}000525\angle -0{,}01676$,
- $\overline{B} = B\angle\beta = 14{,}159\angle 61{,}51^o\Omega$,

Uvedené hodnoty sa dosadia do vzťahov 6.20 až 6.22:

$$m_1 = \frac{U_1^2}{B} = \frac{23100^2}{14{,}159} = 37686984 \tag{6.31}$$

$$m_2 = \frac{A.U_1^2}{B}.\cos(\alpha-\beta) = \frac{1{,}000525.23100^2}{14{,}159}.\cos(-0{,}01676-61{,}51) = 17976671 \tag{6.32}$$

$$m_2 = \frac{A.U_1^2}{B}.\sin(\alpha-\beta) = \frac{1{,}000525.23100^2}{14{,}159}.\sin(-0{,}01676-61{,}51) = -33145735 \tag{6.33}$$

Výpočet činného a jalového výkonu:

$$P = \left|\overline{S}\right|.\cos\varphi = 4{,}8.10^6.0{,}95 = 4{,}56.10^6 W \tag{6.34}$$

$$Q = \left|\overline{S}\right|.\sin(\cos^{-1}\varphi) = 4{,}8.10^6.\sin 18{,}1948^o = 1{,}4988.10^6 VAr \tag{6.35}$$

Teraz sa vyčíslia jednotlivé členy bikvadratickej rovnice.

Bikvadratický člen:

$$m_2^2+m_3^2 = 17976671^2+(-33145735)^2 = 1{,}4218.10^{15} \tag{6.36}$$

Kvadratický člen:

$$\begin{aligned} &2P_2.m_2-2Q_2.m_3-m_1^2 = \\ &2.4560000.17976671 - 2.1498800.(-33145735) - 37686984^2 = \\ &= -1{,}157.10^{15} \end{aligned} \tag{6.37}$$

Absolútny člen:

$$P_2^2 + Q_2^2 = 4560000^2 + 1498800^2 = 2{,}304.10^{13} \tag{6.38}$$

Bikvadratická rovnica má teda nasledovný tvar:

$$k^4.1{,}4218.10^{15} - k^2.1{,}157.10^{15} + 2{,}304.10^{13} = 0 \tag{6.39}$$

Pri jej riešení sa použije substitučná metóda, kedy bude platiť:

$$k^2 = x \tag{6.40}$$

Dosadením vzťahu (6.40) do (6.39) vznikne kvadratická rovnica, ktorej riešenie spočíva na výpočte diskriminantu D.

$$x^2.E - x.\mathrm{F} + G = 0 \tag{6.41}$$

$$x^2.1{,}4218.10^{15} - x.1{,}157.10^{15} + 2{,}304.10^{13} = 0 \tag{6.42}$$

$$D = F^2 - 4.E.G = (\text{-}1{,}157.10^{15})^2 - 4.1{,}4218.10^{15}.2{,}304.10^{13} = 1{,}2076.10^{30} \tag{6.43}$$

$$x_1 = \frac{-F + \sqrt{D}}{2.E} = \frac{-(\text{-}1{,}157.10^{15}) + \sqrt{1{,}2076.10^{30}}}{2.1{,}4218.10^{15}} = 0{,}793333 \tag{6.44}$$

$$x_2 = \frac{-F - \sqrt{D}}{2.E} = \frac{-(\text{-}1{,}157.10^{15}) - \sqrt{1{,}2076.10^{30}}}{2.1{,}4218.10^{15}} = 0{,}020426225 \tag{6.45}$$

Využitím vzťahu (6.40) sa získajú hodnoty konštánt:

$$k_1 = \sqrt{x_1} = \sqrt{0{,}793333} = 0{,}890693 \tag{6.46}$$

$$k_2 = \sqrt{x_2} = \sqrt{0{,}020426225} = 0{,}14292 \tag{6.47}$$

Z týchto konštánt k_2 nedáva zmysel, preto sa v ďalšej fáze nevyužije. Využitím vzťahu (6.16) získame hodnotu modulu napätia na konci dvojbranu.

$$U_2 = k.U_1 = 0{,}890693.23100 = 20575\mathrm{V} \tag{6.48}$$

Fáza sekundárneho napätia sa určí zo vzťahu (6.27).

$$\vartheta_2 = \left[\sin^{-1}\left(\frac{Q_2 - m_3.k^2}{m_1.k}\right)\right] - \beta = \left[\sin^{-1}\left(\frac{1498800 - (\text{-}33145735).0{,}890693^2}{37686984.0{,}890693}\right)\right] - 61{,}51 = \text{-}5{,}61^{\circ} \tag{6.49}$$

Napätie na konci dvojbranu uvažovaného s pomernými veličinami pri U_n = 23,1kV je 20,575kV. Úloha však vyžaduje zistiť napätie na NN svorkách transformátora. Preto je nutné napätie U_2 previezť zo strany VN na stranu NN.

Transformátor má odbočky (0,95 – 1,05) x U_n. Z toho plynie 20,9kV - 22kV – 23,1kV. Do úvahy prichádzajú odbočky 22kV – 23,1kV. Dôvod bude zrejmý z nasledovných výpočtov. Pri chode naprázdno by sa na nízkonapäťovej strane objavilo 440V združeného napätia.

a) Nastavenie odbočky pre 23,1kV

Napätie U_2 prevedené na NN bude:

$$U_2' = U_2.\frac{400}{23100} = k.U_1.\frac{400}{23100} = k.23100.\frac{400}{23100} = k.400 \text{ (V)} \tag{6.50}$$

b) Nastavenie odbočky na 22kV

Napätie U_2 prevedené na NN bude:

$$U_2'' = U_2.\frac{400}{22000} = k.U_1.22000 = k.23100.\frac{400}{22000} = k.420 \text{ (V)} \tag{6.51}$$

Aby sme vedeli rozhodnúť, na ktorú odbočku má byť nastavené vinutie, musíme zistiť napätie U_{2P} na svorkách primárneho vinutia transformátora. Podľa obr. 6-4 je potrebné k napätiu U_2 pripočítať úbytok na pozdĺžnej impedancii transformátora Z_{1b} = (R_{1b} + j.X_{1b}). Použije sa k tomu nasledovná rovnica, kde sa uváži len pozdĺžna zložka úbytku napätia. K tomu nás oprávňuje zistenie, že fázový posun pre celý prenos je takmer nulový, takže priečna zložka úbytku napätia nemá praktický vplyv na veľkosť napätia.

$$U_{2P} = U_2 + \frac{R_{TR}.P_2 + X_{TR}.Q_2}{U_2} \text{ (V)} \tag{6.52}$$

Výpočet pre menovitú hodnotu zaťaženia je nasledovný:

Pre odbočku 23,1kV po dosadení do (6.50):

$$U_2' = k.400 = 0{,}890693.400 = 356{,}28\text{V} \tag{6.53}$$

Pre odbočku 22kV po dosadení do (6.51):

$$U_2' = k.400 = 0{,}890693.420 = 374{,}09\text{V} \tag{6.54}$$

Napätie U_{2P} na svorkách primárneho vinutia transformátora po dosadení do (6.52):

$$U_{2P} = U_2 + \frac{R_{TR}.P_2 + X_{TR}.Q_2}{U_2} = \\ 20575 + \frac{1{,}0083.4{,}56.10^6 + 5{,}9633.1{,}4988.10^6}{20575} = 21233V \tag{6.55}$$

Výsledky pre ostatné hodnoty zaťažení vystihuje tabuľka 6-1.

Tab. 6-1 Vývoj napätia na nn svorkách distribučného transformátora v závislosti na zaťažení (O÷100%) pri cos φ_1 = 0,95

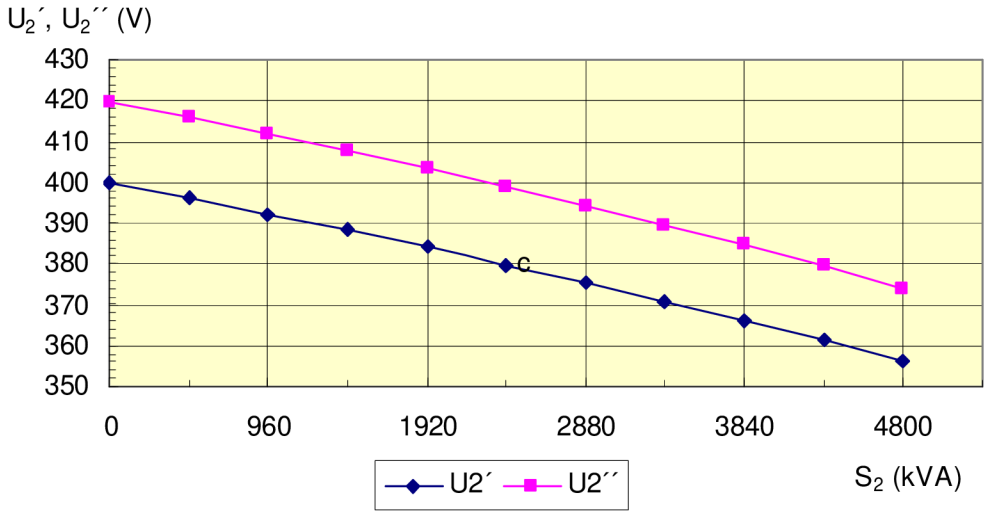
S_2	P_2	U_2	U_{2P}	k	$U_2´$	$U_2´´$	θ_2
(kVA)	(kW)	(kV)	(kV)	(-)	(kV)	(kV)	(°)
0	0	23087,87	23087,87	0,999475	399,79	419,78	0,017
480	456	22870,94	22930,14	0,990084	396,03	415,84	-0,489
960	912	22647,89	22767,45	0,980428	392,17	411,78	-1,005
1440	1368	22418,25	22599,43	0,970487	388,19	407,60	-1,531
1920	1824	22181,57	22425,71	0,960241	384,10	403,30	-2,070
2400	2280	21937,26	22245,84	0,949665	379,87	398,86	-2,621
2880	2736	21684,69	22059,29	0,938731	375,49	394,27	-3,186
3360	3192	21423,12	21865,50	0,927408	370,96	389,51	-3,766
3840	3648	21151,68	21663,74	0,915657	366,26	384,58	-4,363
4320	4104	20869,37	21453,24	0,903436	361,37	379,44	-4,978
4800	4560	20575,01	21233,03	0,890693	356,28	374,09	-5,615

Z tejto tabuľky je vidieť, že pri nastavovaní odbočky na 23,1kV klesá združené napätie $U_2´$ na svorkách sekundárneho vinutia distribučného transformátora v intervale < 399,79 ; 356,28> (V). Fázové sekundárne napätie klesá v intervale $U_{2f}´ \in$ < 230,82 ; 205,70> (V).

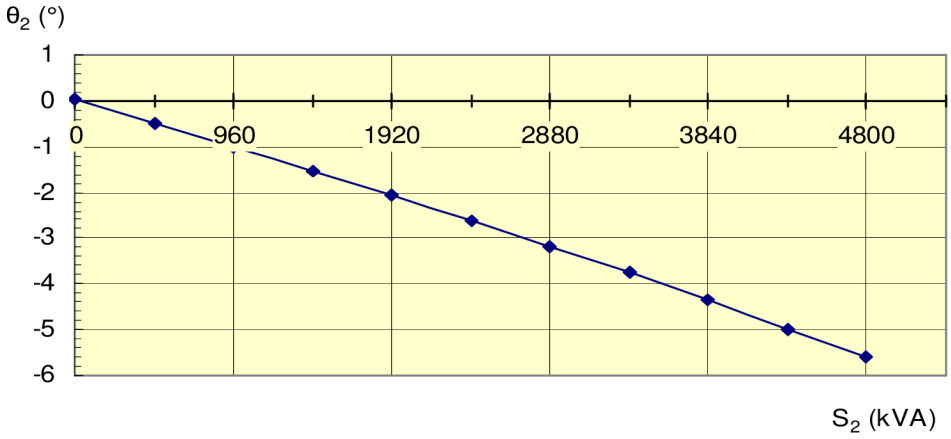
Pri nastavovaní odbočky na 22kV klesá združené napätie $U_2´$ na svorkách sekundárneho vinutia distribučného transformátora v intervale < 419,78 ; 374,09> (V). Fázové sekundárne napätie klesá v intervale $U_{2f}´ \in$ < 242,36 ; 215,98> (V).

Uvedené hodnoty platia pre cos φ_1 = 0,95ind a U_1 = 23,1kV.

Pre tabuľku 6-1 prislúcha nasledovný graf:



Obr. 6-5 Graf závislosti modulu sekundárneho napätia na zaťažení



Obr. 6-6 Graf závislosti fázy sekundárneho napätia na zaťažení

Pre orientáciu slúži nasledovná tabuľka pre 110% menovitého výkonu:

Tab. 6-2 Vývoj napätia na nn svorkách distribučného transformátora v závislosti na zaťažení (110%) pri cos φ_1 = 0,95

S_2	P_2	U_2	U_{2P}	k	$U_2´$	U2´´	θ_2
(kVA)	(kW)	(kV)	(kV)	(-)	(kV)	(kV)	(°)
5280	5016	20267,12	21001,94	0,877	351,0	368,5	-6,27

Z tabuľky 6-1 je tiež zrejmé, že napätie U_{2P} klesá z hodnoty 23087,87 (V) pri chode naprázdno na hodnotu 21233,03 (V) pri menovitom zaťažení. **Odbočka sa nastaví podľa zisteného priebehu zaťaženia.**

Podstatne väčšie úbytky napätia vznikajú na vedení. Ako je zrejmé z bilancie pre chod s menovitým zaťažením (U_1 = 23,1kV, U_{2P} = 21,23303kV, U_2 = 20575kV), je úbytok napätia na časti dvojbranu, ktorý reprezentuje transformátor: $U_{2P} - U_2$ = 658,02V. Pritom úbytok napätia na vedení je $U_1 - U_{2P}$ = 1866,97V.

Veľkosť týchto úbytkov by bolo možné zlepšiť napríklad úpravou účinníku na hodnotu cos φ_1 = 1,00. Tu sa však objavuje nutnosť presnej kompenzácie, keďže jalová dodávka je penalizovaná distribučnými spoločnosťami.

Pre cos φ_1 = 1,00 platí nasledovná tabuľka:

Tab. 6-3 Vývoj napätia na nn svorkách distribučného transformátora v závislosti na zaťažení (0-100%) pri cos φ_1 = 1,00

S_2	P_2	U_2	U_{2P}	k	U_2'	$U2''$	θ_2
(kVA)	(kW)	(kV)	(kV)	(-)	(kV)	(kV)	(°)
0	0	23087,87	23087,873	0,999475	399,79	419,78	0,017
480	480	22945,28	22966,369	0,993302	397,32	417,19	-0,629
960	960	22872,16	22914,485	0,990137	396,05	415,86	-1,283
1440	1440	22722,22	22786,123	0,983646	393,46	413,13	-1,947
1920	1920	22567,04	22652,823	0,976928	390,77	410,31	-2,620
2400	2400	22406,31	22514,309	0,96997	387,99	407,39	-3,304
2880	2880	22239,73	22370,306	0,962759	385,10	404,36	-4,000
3360	3360	22066,88	22220,404	0,955276	382,11	401,22	-4,708
3840	3840	21887,34	22064,242	0,947504	379,00	397,95	-5,431
4320	4320	21700,63	21901,35	0,939421	375,77	394,56	-6,168
4800	4800	21506,19	21731,236	0,931004	372,40	391,02	-6,923

Pre 110% menovitého výkonu:

Tab. 6-4 Vývoj napätia na nn svorkách distribučného transformátora v závislosti na zaťažení (110%) pri cos φ_1 = 1,00

S_2	P_2	U_2	U_{2P}	k	U_2'	$U2''$	θ_2
(kVA)	(kW)	(kV)	(kV)	(-)	(kV)	(kV)	(°)
5280	5280	21198,59	21449,733	0,917688	367,075	385,429	-7,696

6.4 Zhrnutie výsledkov

Príklad poukázal na zmenu sekundárneho napätia na svorkách distribučného transformátora vplyvom zmeny záťaže.

Pri nastavovaní odbočky na 23,1kV klesá združené napätie $U_2´$ na svorkách sekundárneho vinutia distribučného transformátora vplyvom zvyšovania zaťaženia v intervale < 399,79 ; 356,28> (V). Fázové sekundárne napätie klesá v intervale $U_{2f}´ \in$ < 230,82 ; 205,70> (V).

Pri nastavovaní odbočky na 22kV klesá združené napätie $U_2´$ na svorkách sekundárneho vinutia distribučného transformátora vplyvom zvyšovania zaťaženia v intervale < 419,78 ; 374,09> (V). Fázové sekundárne napätie klesá v intervale $U_{2f}´ \in$ < 242,36 ; 215,98> (V).

Uvedené hodnoty platia pre cos $\varphi_1 = 0,95$ind a $U_1 = 23,1$kV.

Odbočka sa nastaví podľa zisteného priebehu zaťaženia.

Podstatne väčšie úbytky napätia vznikajú na vedení. Ako je zrejmé z bilancie pre chod s menovitým zaťažením ($U_1 = 23,1$kV, $U_{2P} = 21,23303$kV, $U_2 = 20575$kV), je úbytok napätia na časti dvojbranu, ktorý reprezentuje transformátor: $U_{2P} - U_2 = 658,02$V. Pritom úbytok napätia na vedení je $U_1 - U_{2P} = 1866,97$V.

7 ZÁVER

Transformátor je neoddeliteľnou súčasťou elektrizačnej sústavy. Pre dosahovanie nízkych strát vo vedení sú vhodné vysoké menovité hodnoty napätí. Pri konštantnom výkone dosiahne prúd menšiu hodnotu a stratovosť je nižšia. Lenže pre maloodber sa požaduje nízke napätie. To je dôvod potreby transformácie.

Distribučné transformátory sú hnané pokrokom v smere znižovania strát. Hlavné sú straty naprázdno a nakrátko. Zisťujú sa meraním, výpočtami. Pritom sa jednotlivé prvky spôsobujúce straty nahradzujú ideálnymi elektrickými prvkami, ktoré sú systematicky zhromaždené do náhradnej schémy tak, aby reprezentovali chod transformátora.

Teoretické pojednanie o transformátoroch pripravilo pôdu pre výpočet zadanej úlohy, ktorá bola predmetom riešenia bakalárskej práce. Hlavná kontúra teoretických údajov sa nesie v duchu náhrady transformátora dvojbranom Γ / π. Je to dôležitý krok, ktorý dovoľuje riešiť transformátor ako jeden elektrický obvod. Spomenutý proces však má svoje úskalia, ktoré sa skrývajú za pojmom prepočet transformátora.

Potom, ako sme disponovali dvojbranom s presne vymedzenými hodnotami jeho prvkov, mohli sa zahájiť úvahy o vzájomných vplyvoch elektrických veličín (v našom prípade závislosť sekundárneho napätia na zaťažení). Pre získanie funkcie, kde premennou bol elektrický výkon, sa museli zaviesť niektoré formálne matematické úpravy. Súčasťou bolo riešenie bikvadratickej rovnice.

Výsledky príkladu poukázali na pokles napätia na nízkonapäťovej strane distribučného transformátoru, ktorých príčinou je nárast zaťaženia. Koridor hodnôt sa dá posúvať pomocou odbočiek transformátora. Nastavená odbočka by mala korešpondovať so zaťažením, na čo poukazuje Obr. 6-5.

Význam záujmu k hodnote napätia na sekundárnej strane distribučných transformátorov je neodškriepiteľný. Distribučné závody sú zmluvne viazané na kvalitu dodávky elektrickej energie. Jedným z parametrov určujúcich kvalitu je hodnota napätia. Cieľom bolo udržiavať menovitú hodnotu napätia 400V. Je však otázne, či nenastane v blízkej budúcnosti vývojová zmena zapríčinená európskymi normami, ktoré preferujú menovitú hodnotu nízkeho napätia 420V.

Celkový pohľad na riešený modelový príklad navodzuje myšlienku dôležitosti prepojenia oborov matematiky a elektrotechniky. To sú základné piliere elektroenergetiky. Tá v súčasnosti rieši dodávku ušľachtilej energie obrovskej mase odberateľov, čo predstavuje vysoké nároky na optimalizáciu dodávky. Tá je možná len vďaka matematickým aparátom.

POUŽITÁ LITERATURA

[1] Bašta, J., Chládek, J., Mayer, I. *Teorie elektrických stroju*. SNTL/ALFA, Praha, 1968, 584 strán, DT 621.313.

[2] BEZ A.S., [ON LINE] (17.12.2007) www.bez.sk

[3] BLAŽEK, V., *Distribuce elektrické energie.Scriptum. VUT*, Brno, 2007

[4] BLAŽEK, V., PAAR, M., *Přenosové sítě. Scriptum. VUT*, Brno, 2007

[5] JAROŠEK, J., PLENCNER, R. *Transformátory*. Slovenské vydavateľstvo technickej literatúry, Bratislava, 1961, 404 strán

[6] JEZIERSKI, E., *Transformátory. Teoretické základy*. Academia, Praha, 1973, 652 strán

[7] ONDRŮŠEK, Č., *Elektrické stroje.Scriptum. VUT*, Brno, 2006

[8] SKÁLA, M., *Transformátory*. SNTL, Praha, 1964, 356 strán, DT621.314.2

Príloha A : Parametre vybraných typov transformátorov

(Zdroj: Literatúra [2])

Menovitý výkon Sn	Napätie Un	Spojenie vinutia	Napätie nakrátko	Straty		Váha oleja	Celková váha
(kVA)	(kV)		uk(%)	ΔP_0 (W)	ΔP_k (W)	(kg)	(kg)
50	22/0,4	Yzn1	4	120	1100	100	460
100	22/0,5	Yzn1	4	190	1750	115	590
160	22/0,6	Yzn1	4	270	2500	125	710
250	22/0,7	Dyn1	4	390	3100	155	955
400	22/0,8	Dyn1	4	530	4700	205	1200
630	22/0,9	Dyn1	6	770	7300	305	1655
800	22/0,10	Dyn1	6	950	9500	385	2090
1000	22/0,11	Dyn1	6	1100	11600	445	2535
1250	22/0,12	Dyn1	6	1300	14300	590	3050
1600	22/0,13	Dyn1	6	1600	16800	655	3605