

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

KATEDRA ELEKTROENERGETIKY A EKOLOGIE

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Velké transformátory se změnou odboček pod zatížením

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
Fakulta elektrotechnická
Akademický rok: 2016/2017

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE
(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Martin LÉBL**
Osobní číslo: **E15N0107P**
Studijní program: **N2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Elektroenergetika**
Název tématu: **Velké transformátory se změnou odboček pod zatížením**
Zadávající katedra: **Katedra elektroenergetiky a ekologie**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

1. Popište transformátor s mechanismem změny odbočky pod zatížením.
2. Rozeberte význam regulovatelných blokových transformátorů a transformátorů vlastní spotřeby elektráren a účelové spotřeby velkoodběratelů.
3. Shrňte význam regulovatelných transformátorů všech napěťových úrovní přenosové a distribuční soustavy.
4. Uveďte jaký význam mají PST (Phase Shifting Transformers).



Rozsah grafických prací: podle doporučení vedoucího

Rozsah kvalifikační práce: 40 - 60 stran

Forma zpracování diplomové práce: tištěná/elektronická

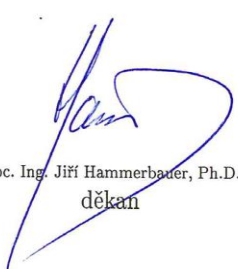
Seznam odborné literatury:

Student si vhodnou literaturu vyhledá v dostupných pramenech podle doporučení vedoucího práce.


Vedoucí diplomové práce: **Doc. Ing. Jiřina Mertlová, CSc.**
Katedra elektroenergetiky a ekologie

Datum zadání diplomové práce: **14. října 2016**

Termín odevzdání diplomové práce: **19. května 2017**


Doc. Ing. Jiří Hammerbauer, Ph.D.
děkan




Doc. Ing. Karel Noháč, Ph.D.
vedoucí katedry

V Plzni dne 14. října 2016

Abstrakt

Předkládaná diplomová práce je zaměřena na regulace transformátorů, které pracují v síti pod trvalým zatížením. Práce ukazuje význam regulačních mechanismů, a jak ovlivňují požadavky v síti.

Práce začíná shrnutím různých typů transformátorů a ukazuje jejich zapojení v transformátorové koncepci ČR. Vysvětluje se zde princip odbočkových přepínačů a jejich význam pro regulaci napětí pod zatížením. Uvádíme si zde i zapojení transformátorů v elektrárenských blocích a jejich význam pro vlastní spotřebu. Nakonec si ukážeme i význam fázově řízených transformátorů a jejich schopnost regulace výkonů v síti.

Klíčová slova

Transformátor, regulace pod zatížením, přepínač odboček transformátorů, regulace napětí, vlastní spotřeba, transformátor s řízeným posuvem fáze.

Abstract

The diploma thesis is focused on regulation of transformers working in the network under permanent load. The work shows the importance of regulatory mechanisms and how they affect network requirements.

The work begins with a summary of various types of transformers and shows their involvement in the transformer concept of the Czech Republic. This explains the principle of tap changers and their significance for stress control under load. We also mention the inclusion of transformers in power plants and their importance for their own consumption. Finally, we show the importance of phase shifting transformers and their ability to regulate network performance.

Key words

Transformers, load regulation, tap changer of transformers, voltage regulation, own consumption, phase shifting transformer.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této diplomové práce.

Dále prohlašuji, že veškerý software, použitý při řešení této diplomové práce, je legální.

.....
podpis

V Plzni dne 17.5.2017

Martin Lébl

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucí diplomové práce Doc. Ing. Jiřině Mertlové, CSc. za poskytnuté rady a literaturu v rámci diplomové práce. Také bych rád poděkoval Doc. Ing. Miloslavě Tesařové, Ph.D. za pomoc při doplnění diplomové práce. Také bych chtěl poděkovat své rodině za podporu v době studia.

Obsah

OBSAH	8
ÚVOD	9
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	10
1 TRANSFORMÁTORY	12
1.1 ROZDĚLENÍ TRANSFORMÁTORŮ.....	12
1.2 KONSTRUKCE TRANSFORMÁTORU.....	13
1.3 TRANSFORMÁTOROVÁ KONCEPCE.....	14
2 ŘÍZENÍ NAPĚTÍ VÝKONOVÝCH TRANSFORMÁTORŮ	16
2.1 PŘEPÍNAČ ODBOČEK.....	16
2.1.1 Přepínač odboček bez zatížení.....	17
2.1.2 Přepínač odboček pod zatížením.....	17
2.2 ODPOROVÁ REGULACE.....	18
2.3 REGULACE TLUMIVKOU.....	19
2.4 REGULACE POMOCÍ STYKAČŮ.....	21
2.5 REGULACE PŘÍMO NA VINUTÍ.....	21
2.6 REGULACE POMOCÍ AUTOTRANSFORMÁTORŮ.....	23
3 VÝZNAM ELEKTRÁRENSKÝCH TRANSFORMÁTORŮ	25
3.1 BLOKOVÝ TRANSFORMÁTOR.....	26
3.1.1 Příklady provedení blokových transformátorů.....	28
3.1.2 Zahraniční výrobci.....	29
3.2 ODBOČKOVÝ TRANSFORMÁTOR.....	29
3.3 REZERVNÍ TRANSFORMÁTOR.....	31
3.4 VLASTNÍ SPOTŘEBA ELEKTRÁREN.....	31
3.4.1 Schéma bloků alternátorového vypínače a vlastní spotřeby.....	32
4 PHASE SHIFTING TRANSFORMERS	38
4.1 PŘENOS VÝKONU PO VEDENÍ.....	38
4.2 TRANSFORMÁTOR S REGULACÍ FÁZE.....	39
4.3 KONSTRUKCE PST.....	41
4.3.1 Jednojádrová konstrukce.....	41
4.3.2 Dvojjádrová konstrukce.....	43
4.4 VYUŽITÍ PST.....	44
5 VYUŽITÍ REGULAČNÍCH TRANSFORMÁTORŮ V SÍTI	47
ZÁVĚR	51
SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ	52

Úvod

Diplomová práce je zaměřená na transformátory pracující pod zátěží a jejich regulací pomocí odbočkového přepínače. Typy a význam transformátorů a jejich použití v síti.

V první kapitole si ukážeme rozdělení transformátorů a jejich konstrukci. Zaměření na transformátorovou koncepci a používané systémy v elektrizační soustavě. Ve druhé kapitole se zaměřím na regulace používaných transformátorů a ukážeme si typy odbočkových přepínačů, které se používají. Třetí kapitola je věnována elektrárenským zařízením. Konkrétně transformátorům, které napájejí vlastní spotřebu elektráren. Představíme si různé typy zapojení a vysvětlíme si výhody a nevýhody jednotlivých použití. Poslední kapitola nám představí fázově řízené transformátory, jejich funkci a využití v elektrizační soustavě.

Seznam zkratek

Zkratka	Název
nn	Nízké napětí
vn	Vysoké napětí
vvn	Velmi vysoké napětí
zvn	Zvlášť vysoké napětí
S_1, S_2	Výkonové spínače
ČKD	Českomoravská Kolben Daněk
n	Počet odboček
g	Počet poloh
I.	Primární vinutí
II.	Sekundární vinutí
III.	Terciární vinutí
Y,y	Označení zapojení do hvězdy
D,d	Označení zapojení do trojúhelníku
ASEA	Allmänna Svenska Elektriska Aktiebolaget
ACEC	Ateliers de Constructions Électriques de Charleroi
BBC	Brown, Boveri & Cie
V.S.	Vlastní spotřeba
B.T.	Blokový transformátor
JE	Jaderná elektrárna
V1, V2	Vývody
PST	Phase shifting transformers
QBT	Quadrature booster transformer
PAR	Phase angle regulátor

Seznam značek

Značka	Název	Jednotka
I	Elektrický proud	A
I^*	Komplexně sdružený elektrický proud	A
l	Délka	m
P	Činný výkon	W
Q	Jalový výkon	VAr
R	Elektrický odpor	Ω
S	Zdánlivý výkon	VA
U	Elektrické napětí	V
\bar{U}_M	Elektrické napětí za PST	V
\bar{U}_T	Regulační napětí	V
X	Reaktance	Ω
Z	Impedance	Ω
ΔP	Činné ztráty	W
Δu	Úbytek napětí	V
α	Zátěžný úhel PST	$^\circ$
β	Regulační úhel	$^\circ$
δ	Zátěžný úhel, úhel přenosu	$^\circ$
$\cos\varphi$	Účinník	-

Transformátory

Transformátory patří mezi netočivé elektrické stroje pracující na principu elektromagnetické indukce. Přivedené střídavé napětí mění na jinou hodnotu za předpokladu nezměněné frekvence. Nejvýznamnější využití mají v energetice, především v elektrizační soustavě, kde rozdělují veškerou síť a transformují velikost napětí na potřebné hodnoty. Musejí se tedy navrhovat tak, abychom zajistili bezpečný a spolehlivý provoz sítě.

1.1 Rozdělení transformátorů [1]

- **Energetické výkonové transformátory** – mají za úkol přenos elektrické energie v rozvodných sítích, jsou navrženy na velký výkon, proto je potřeba vysoké účinnosti (99%) a vzhledem k měnícímu se zatížení je potřeba stabilizovat výstupní napětí
- **Energetické distribuční transformátory** – jejich účelem je spolehlivá dodávka elektrické energie přímo ke spotřebitelům, stejně jako výkonové transformátory je dbáno na velkou účinnost
- **Pecové transformátory** – slouží k napájení pecí, jichž máme několik druhů
 - Odporové
 - Obloukové
 - Indukční
- **Svařovací transformátory** – patří mezi speciální typy pro obloukové a odporové svařování
 - Transformátory pro svařování elektrickým obloukem
 - Transformátory pro odporové svařování
- **Měničové transformátory** – napájejí polovodičové měniče
- **Autotransformátory** – mají pouze jedno vinutí (v případě poruchy se na výstup dostane plné napětí)
- **Regulační** – transformátory a autotransformátory s regulací výstupního napětí
- **Měřicí transformátory napětí a proudu**

- **Napájecí (sít'ové) transformátory** – napájí elektrická zařízení nízkého a malého napětí
 - Převodové – mění napětí
 - Oddělovací – vytvářejí elektrický obvod odizolovaný od sítě i země, musí splňovat požadavky na zvýšenou izolaci vinutí
 - Bezpečnostní – vytvářejí obvod napájený bezpečným napětím, musí splňovat požadavky na zvýšenou izolaci vinutí
- **Vysokofrekvenční transformátory** – pro vysokofrekvenční obvody a spínané zdroje

1.2 Konstrukce transformátoru

Konstrukce transformátorů je jednoduchá oproti ostatním strojům. Je to netočivý stroj, takže nemá žádné mechanické ztráty a není třeba uvažovat drážky pro vinutí. Transformátory proto mají vysokou účinnost.

Hlavní části výkonového transformátoru:

- Magnetický obvod (jádro)
- Primární a sekundární vinutí
- Zařízení pro chlazení – nejčastěji vzduchové nebo olejové
- Mechanické, konstrukční a izolační součásti

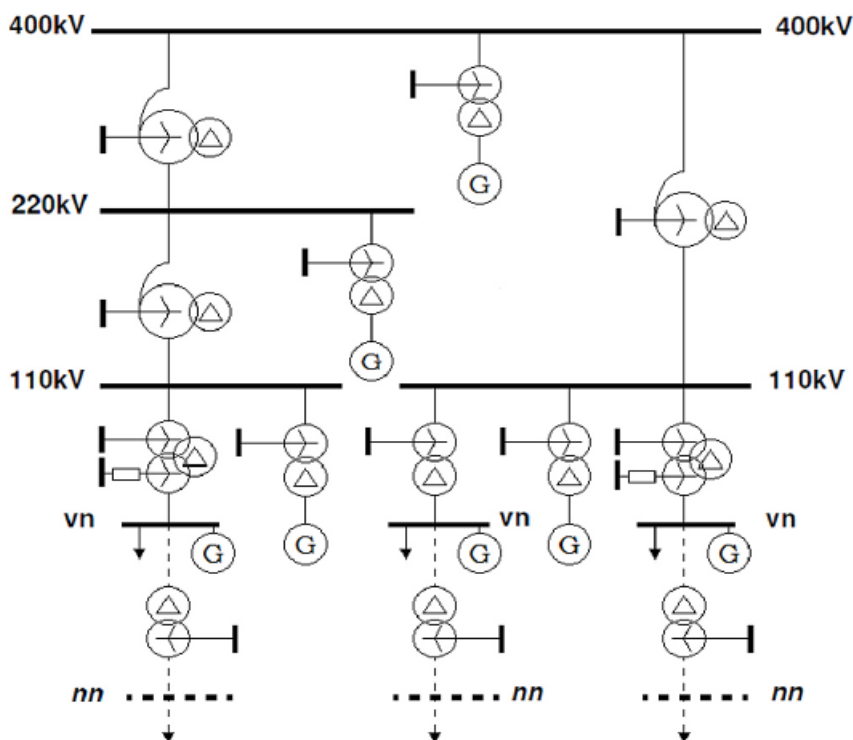
Magnetický obvod vysokonapěťových transformátorů je složen z transformátorových plechů a je tvořen sloupky. Na sloupcích je vinutí nižšího i vyššího napětí, která musí být vzájemně odizolována. Takto navinutá konstrukce je ponořena do nádoby s olejem, který je schopen odvádět teplo při nadměrném přehřívání vinutí. Olej při zvyšování teploty nabývá na objemu, proto musí být v transformátoru dilatační nádoba, kam se přebytečný olej dostává. Chlazení transformátoru se také zvyšuje radiátory nebo žebry, kterými proudí vzduch. V případě přehřívání je u nádoby umístěné plynové relé, které signalizuje vysoké teploty. Vinutí je z nádoby vyvedeno porcelánovými průchodkami, kde je i přepínač odboček.



Obr. 1.1: Olejový výkonový transformátor SGB Regensburg

1.3 Transformátorová koncepce

Transformátorová koncepce se v ČR od 50. let nezměnila. Stále se dbá na to, aby byl zvolen správný transformátor do stávající sítě a byl zajištěn stabilní a bezpečný provoz.



Obr. 1.2: Transformátorová koncepce ČR+SR [5]

Napěťové úrovně a normalizovaná řada střídavých trojfázových napětí jsou vidět v tab. 1.1.

Tab. 1.1: Normalizovaná řada střídavých trojfázových napětí [3]

Nizké napětí (mn) [kV]	Jmenovité	0,4 / 0,23			0,50	0,69
	max. provozovací	0,42 / 0,241			---	0,73
Vysoké napětí (vn) [kV]	jmenovité	3	6	10	22	35
	max. provozovací	3,6	7,2	12	25	37
Velmi vysoké napětí (vvn) [kV]	jmenovité	110		220		---
	max. provozovací	123		245		---
Zvláště vysoké napětí (zvn) [kV]	jmenovité	400	750			
	max. provozovací	420	787 (předp. zvýšení na 800)			

Normalizovaná řada výkonů trojfázových transformátorů je:

12,5-16-20-31,5-40-50-63-80-100-(125)-160-(200)-250-(315)-400-(500)-630-(800)-1000 [kVA] a násobky 10, 10^2 , 10^3 , těchto hodnot. Hodnoty v závorkách se používají výjimečně. [3]

Nejčastěji používané výkony transformátorů v české přenosové a rozvodné soustavě se vstupním napětím vvn (zvn) jsou:

- 400/242 kV: 400; 630 [MVA]
- 400/121 kV: 200; 250; 330 [MVA]
- 220/121 kV: 200 MVA (3 x 66 MVA)
- 110/23 kV: 10; 16; 25; 40 [MVA]
- 110/6,3 kV: 31,5 [MVA]

Transformátory tvoří základní uspořádání sítí, které jsou rozdělené podle jmenovitých napětí jednotlivých hladin a způsobem zemnění. Podle řazení transformátorů se dále propojují sítě a tvoří velké celky, které se můžou vzájemně zastupovat. Tím docílíme spolehlivý provoz s omezením ztrát a zajistíme stabilitu provozu.

Transformátory zvn/vvn a vvn/vvn

Sítě začínají největšími transformátory zvn/vvn a vvn/vvn. Jsou řešeny jako autotransformátory kvůli stejnému provozu sítí zvn (400 kV) a vvn (220 kV a 110 kV). Autotransformátor má společné vinutí pro primární i sekundární stranu. Výhodou je jednodušší provedení, jsou tedy levnější a lehčí. Nevýhodou je galvanické spojení vstupní a výstupní strany. V případě poruchy vinutí se na výstupní svorky dostane plné napětí.

Terciární vinutí je zapojeno do trojúhelníka a slouží jako vyrovnávací vinutí, které potlačuje vliv nesymetrického zatížení nebo poruch. Je navrženo na hodnoty vn a je zde možnost dodávky energie do sítě, napájení vlastní spotřeby, případně pro připojení kompenzační tlumivky. Terciární vinutí se nejčastěji dimenzuje na třetinový výkon autotransformátoru, což odpovídá maximálnímu proudu pro jednopólový zkrat.

Transformátory 400/220 kV mají regulaci na nižší straně u uzlu vinutí, regulační rozsah transformátoru je 23 odboček po kroku přibližně 1,14 % nebo 21 odboček po kroku přibližně 0,87 %.

Transformátory 400/110 kV a 220/110 kV mají také regulaci na nižší straně napětí u uzlu vinutí, regulační rozsah je zde 19 odboček po kroku přibližně 1,45 %.

Transformátory vvn/vn

Sítě vn jsou provozovány jako izolované, kde je sekundární vinutí zapojené do trojúhelníka nebo jako neúčinně uzemněné, kde je uzel sekundárního vinutí uzemněn přes tlumivku nebo odpor.

Regulace transformátorů je zde prováděna při zatížení na vyšší straně napětí. Regulační rozsah je 17 odboček po kroku 2 %. Transformátory jsou vybaveny automatickými hladinovými regulátory napětí, které z důvodu nároků na přepínač odboček nesmí přesáhnout 25 přepnutí denně.

Transformátory vn/nn

Tyto menší transformátory využívají regulaci napětí bez zatížení, tedy obě strany transformátoru jsou odpojeny. Regulace je zde na vyšší straně napětí, opět u uzlu vinutí. Dřívější transformátory měly 3 odbočky po kroku 5 %, novější stroje mají regulační rozsah 5 odboček po kroku 2,5 %.

2 Řízení napětí výkonových transformátorů

U transformátorů pracujících v síti je třeba dodržovat konstantní výstupní napětí, které se ale mění se změnou zatížení. Jediné způsoby změny napětí jsou přes změny počtu závitů. Změny na sekundárním vinutí ovšem nejsou příliš praktické pro výkonové transformátory, kde by byly velké skoky vzhledem k malému počtu závitů. Navíc tam vznikají velké proudy, což má vliv na větší a složitější přepínač. Regulace se tedy provádí na primární straně. Samotná regulace je jemnější a nároky na přepínač odboček nejsou tak velké.

2.1 Přepínač odboček

Přepínač odboček je zařízení, díky kterému přepínáme odbočky vinutí transformátorů a tím měníme velikost napětí. Pro každý přepínač je nutné, aby měl transformátor vyvedené jednotlivé odbočky z přepínaného vinutí. Počet odboček a přepínatelný krok určuje výrobce zařízení. Záleží samozřejmě na typu transformátoru a místě použití. Samotný přepínač musí zabezpečit rychlé a co nejméně ztrátové přepnutí odbočky. Dělení přepínačů má dvě základní skupiny, podle kterého se určuje složitost přepínacího systému. Buď jsou to přepínače, které pracují na zařízeních bez zatížení nebo pracující pod zatížením.

Problémy při přepínání:

- 1) Transformátor musí být navržen na změny impedance, které jsou vždy dané aktuální odbočkou.
- 2) Při návrhu chlazení transformátoru se musí počítat s proměnnými ztrátami, které jsou měněny podle aktuální odbočky.
- 3) V transformátoru vznikají nerovnoměrné síly. Ty jsou způsobeny neaktivními odbočkami, na které působí elektromagnetické síly.
- 4) Čím větší je počet odboček transformátoru, tím je systém složitější a tím je náchylnější k poruše.

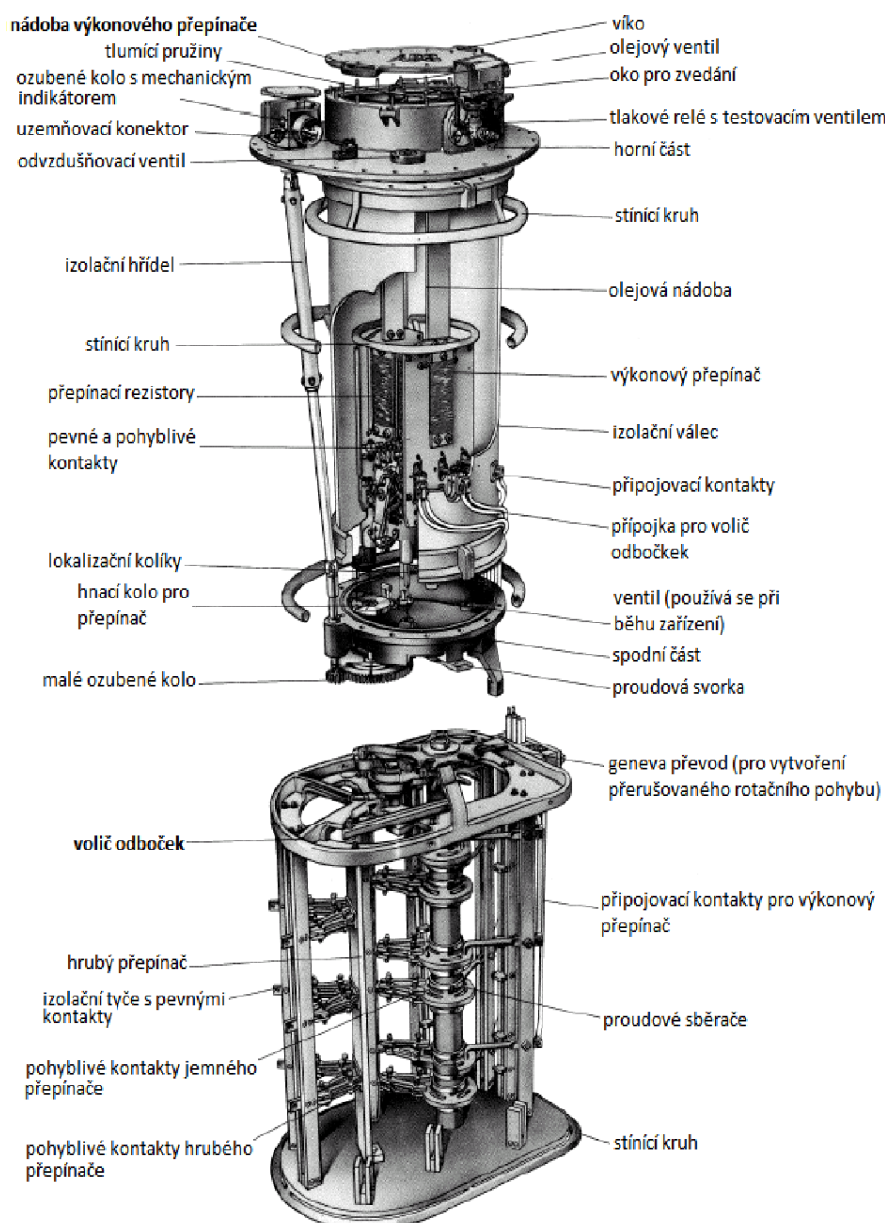
2.1.1 Přepínač odboček bez zatížení

Oproti přepínačům pracujících pod zatížením je konstrukce jednodušší. Systém zde nepřepíná během provozu a nevznikají tak velké proudy, které je třeba omezovat. Tento přepínač je volen u transformátorů, které nepotřebují průběžně přepínat a tím pádem měnit velikost výstupního napětí. Použití je zejména na nízkých hladinách. Například distribuční transformátor 22/0,4 kV se před uvedením do provozu nastaví tak, že se manuálně zvolí odbočka na požadované výstupní napětí. Transformátor pracuje v síti, kde se nijak výrazně zatížení nemění a změny odboček nejsou nutné. Může však nastat situace, kdy se do vedení připojí nová větev, to způsobí zvýšení zátěže a pokles výstupního napětí. Poté je nutné změnit odbočku, aby se síť stabilizovala na požadované napětí. Hlavní důraz u přepínačů je kladen na kvalitu a sílu přepínacích kontaktů, které musí vytvořit co nejmenší přechodový odpor mezi odbočkou vinutí a přepínačem.

2.1.2 Přepínač odboček při zatížení

V případě přepínačů, které musí zajistit přepnutí pod zatížením, je nutné, aby dokázaly přepínat protékající proudy. Proto jsou přepínače navrženy tak, že nedojde k přerušení proudu při přepnutí z jedné odbočky na jinou. Proud také nesmí vytvořit žádné částečné zkratky v přepínaném vinutí. Celková funkce popisovaného přepínače odboček může být rozdělena na dvě části.

První část se skládá ze sofistikovaného přepínače, který dokáže přenášet výkon jedné odbočky přepnout na přenášení výkonu z následující odbočky. Při přepínání jsou obě odbočky spojeny přes impedanci a prochází jimi zatěžovací proud. Poté se přeruší spojení s původní odbočkou a veškerá zátěž se přenesse na nově zvolenou odbočku. Zařízení, které má přepnutí na starosti, se nazývá výkonový přepínač a tvoří horní část celého přepínače odboček. Druhá část se nazývá volič odboček. Ten má za úkol řídit přepínání výkonového spínače a určit odbočku, která má být přepnuta. Pracuje tedy bez proudové zátěže vzniklé při přepínání. S touto se musí vypořádat výkonový spínač. Systém je vyobrazen na obr. 2.1. Z obrázku také vidíme, celé zařízení je samostatně zapouzdřeno. Při instalaci je integrováno do transformátoru tak, že olej, kterým je výkonový přepínač naplněn, není společný s olejem transformátoru. Je to z toho důvodu, aby bylo možné lehce vyměnit náplň přepínače, protože při provozu zde dochází k větší degradaci oleje, než u oleje transformátoru.



Obr. 2.1: Přepínač odboček

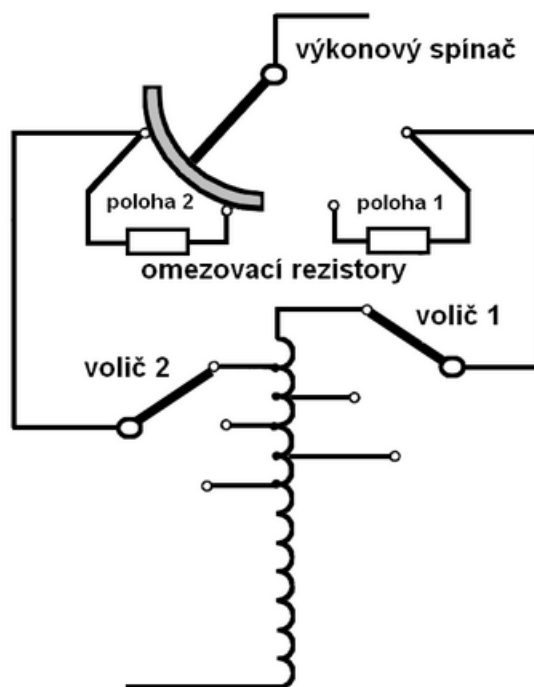
2.2 Odporová regulace

Do odporové regulace spadá tzv. *Jansenovo* zapojení. Odboček je tolik jako poloh a jsou rozdělené střídavě do dvou skupin. Každá skupina, má svůj volič odbočky. Přepínání mezi voliči provádí výkonový spínač.

- Požadavky na přepínání:**
- Při přepínání se nesmí přerušit proud
 - Zamezit mezizávitovým zkratům
 - Co nejrychlejší přepnutí

Transformátory vyšších výkonů (od 2000 kVA) mají $\pm 8 \div 9$ napětových stupňů, odstupňovaných po 2% jmenovité hodnoty vyššího napětí. Přepínání trvá asi 0,04 s. Hodí se pro malé a střední výkony.

Takový přepínač vidíme na obr. 2.2. Výkonový spínač je připojen k voliči 2. Volič 1 má připravenou odbočku a v případě přepnutí spínače do polohy 1 nedojde k přerušení. Při spínání vznikají na vinutí odboček proudy, proto jsou připojené přes rezistory, které omezují velikost proudů a chrání vinutí.

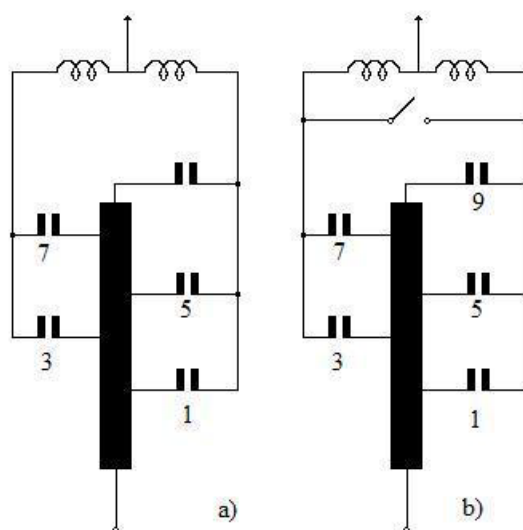


Obr. 2.2: Jansenův přepínač odboček

2.3 Regulace tlumivkou

Pro přehlednost a zjednodušení se kreslí schémata s regulací na konci vinutí a s vývodem ze středu tlumivky ke svorce, ačkoliv ve skutečnosti jsou regulace i tlumivka připojeny k vnitřním cívkám nebo jsou u uzlu. [2]

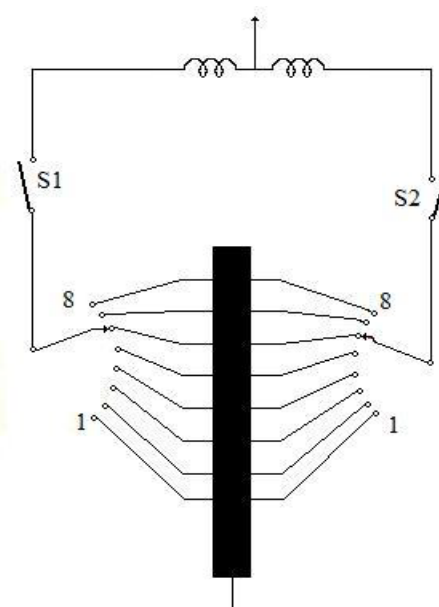
Na obr. 2.3 vidíme zapojení, která se využívají pro lichý počet poloh. K dosažení sudých poloh se zde tlumivka využívá jako dělič napětí. Odbočky z vinutí slouží pro liché polohy. Počet při g polohách je $(g+1)/2$. Pro přechod na druhou polohu stačí jen jeden úkon. Spínač je zde umístěn mimo olej transformátoru, kvůli proudovému přepínání. Vznikají zde ale poměrně velké ztráty v železe a úbytky napětí na tlumivce.



Obr. 2.3: Regulace tlumená tlumivkou zapnutou a) trvale, b) přechodně. [2]

Pro případ zapojení podle obr. 2.4 pracuje tlumivka jako dělič proudu, tedy beze ztrát v železe. Reaktance omezuje velikost vyrovnávacího proudu jen při přepínání. Počet vývodů z vinutí je stejný jako počet poloh.

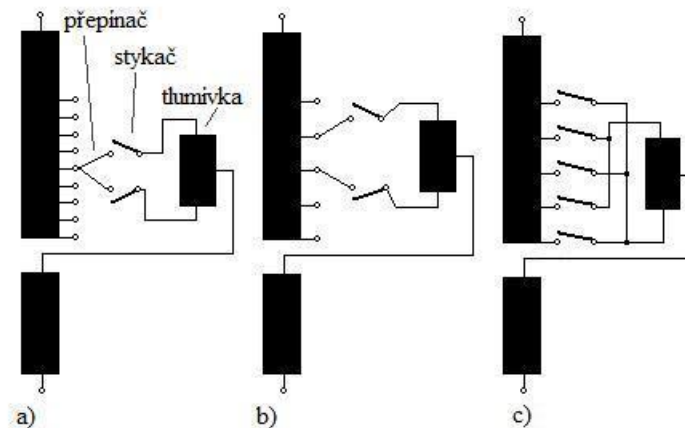
Pro přechod na sousední odbočku je třeba šesti úkonů. Přepíná se pouze s napětím, takže přepojovací zařízení u odboček může být ve společné nádobě s transformátorem; mimo nádobu se dávají oba hlavní spínače S_1 a S_2 . Tlumivka je zde lehčí a s menšími ztrátami než u předchozích způsobů; zato je větší počet odboček a přepínacích úkonů. [2]



Obr. 2.4: Regulace s tlumivkou pracující jako dělič napětí [2]

2.4 Regulace pomocí stykačů

V případě transformátorů, které pracují na největší výkony, je nutná regulace při plném zatížení. Nepoužívají se zde řadiče s posuvnými kontakty ale stykače a přepínače.

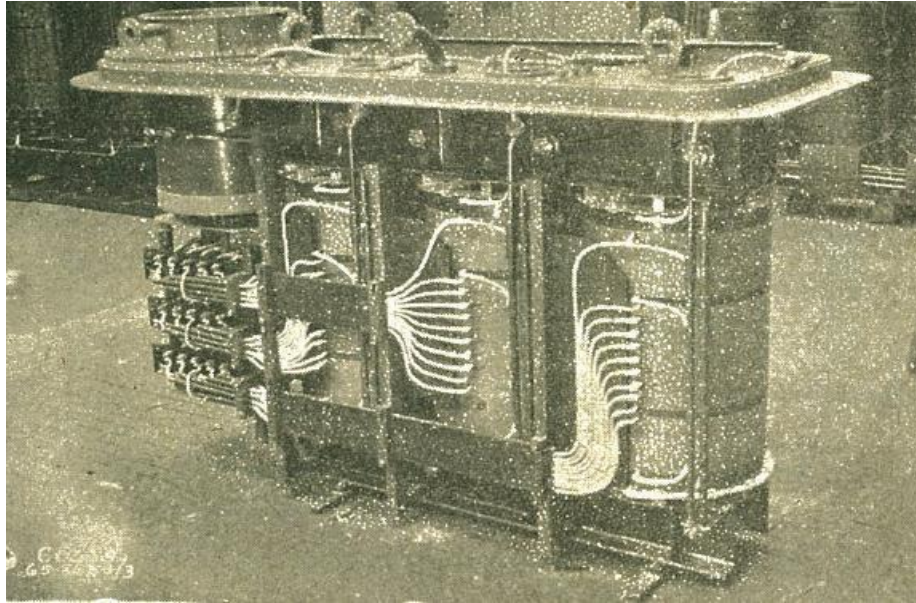


Obr. 2.5: Regulace stykači [2]

- Má stejný počet odboček a stupňů, použití dvou přepínačů a dvou stykačů. Dává stejnosměrné stupně. V chodu je tlumivka nakrátko.
- Má při n odbočkách $2n-1$ stupňů, dva přepínače a dva stykače. Napětí je méně stálé, proto je zde tlumivka větší než u případu a). Tlumivka je zde zapnuta na sudých odbočkách.
- Má při n odbočkách $2n-1$ stupňů a chování je stejné jako zapojení b).

2.5 Regulace přímo na vinutí

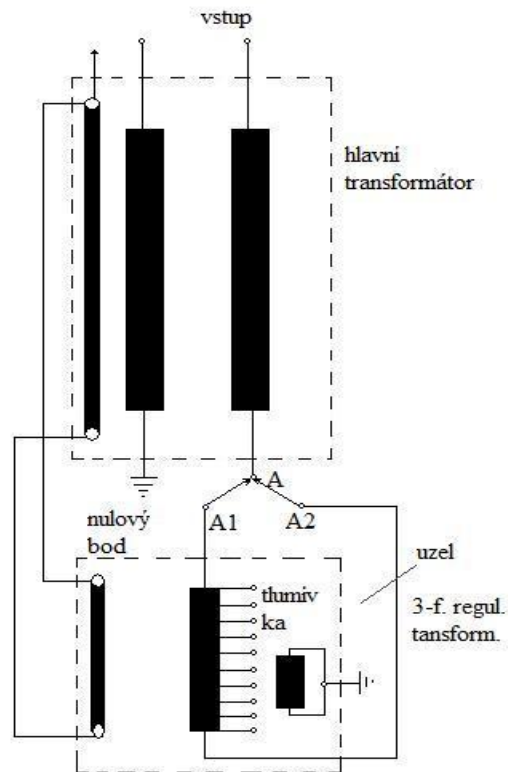
Konstrukčně lze regulaci zařídit přímo na vinutí i trojfázových transformátorů vvn, a to v uzlu vinutí vvn. Dobrým příkladem je 4 MVA transformátor L.Z. v Plzni (Obr. 2.6) na $(35 \pm 8 \times 1,6 \%) / 6,3$ kV s regulací v uzlu, s trojfázovou tlumivkou a mžikovým přepínačem spolu s transformátorem ve společné olejové skříni. [2]



Obr. 2.6: Regulační transformátor s odporovou regulací 4 MVA, $35\pm 8 \times 1,67\%/6,3$ kV (LZ Plzeň). [2]

U jednofázových trojic vvn se regulace dává do zvláštních přídatných (tzv. zadních) regulačních transformátorů, jejichž regulační vinutí je v uzlu a v sérii s vinutím vvn hlavního transformátoru. [2]

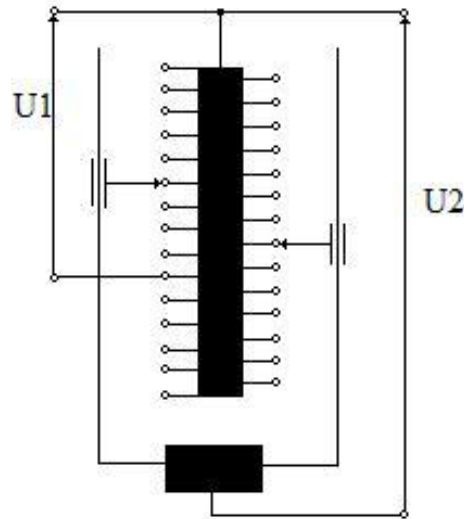
Např. ČKD – Praha vyrobil regulační transformátor 15,8 MVA pro trojici jednofázových transformátorů 3 x 33 MVA s napětími 4/110/220 kV. Regulační transformátor měl na $10,4/\pm 9 \times 3,3$ kV a napájel se z III. vinutí hlavního transformátoru (Obr. 2.7); ztráty naprázdno měl 32 kW a ve vinutí max. 121 kW.



Obr. 2.7: Trojice hlavních jednofázových transformátorů 100/100/63 MVA, 220/110/10,44 kV se zadním regulačním transformátorem 15,8 MVA, 10,44±9 x 3,3 kV (ČKD Praha) [2]

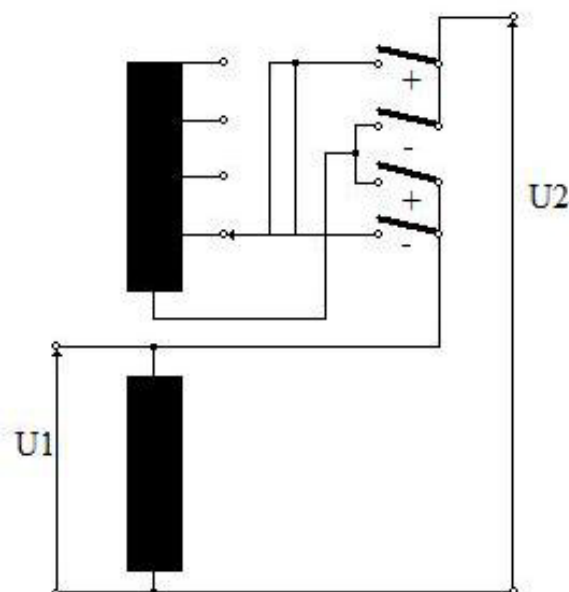
2.6 Regulace pomocí autotransformátorů

Transformátory na nejvyšších hladinách používají k regulaci autotransformátory. V případě dobře navržených regulačních stupňů zajišťují plynulou regulaci napětí pod zatížením. Nevýhodou autotransformátorů je společné vinutí, takže v případě poškození se na výstupní svorky dostane plné napětí.



Obr. 2.8: Regulační autotransformátor [2]

Ke zvyšování a snižování napětí nám dále slouží samočinné jednofázové regulační autotransformátory (booster). Regulační rozsah napětí je $\pm 10\%$. Tento regulační autotransformátor má 2 vinutí. Jedno slouží pro zvyšování napětí, druhé pro snižování. Vždy záleží na nutnosti přepnutí na vyšší nebo nižší napětí a k tomu slouží ruční vypínače. Autotransformátor je i s regulačními vypínači, stykači a napěťovým relé umístěn v olejové skříni a lze provést montáž na stožáry. Autotransformátor mívá až 32 stupňů po kroku asi $0,63\%$.



Obr. 2.9: Jednofázový regulační autotransformátor (booster) [2]

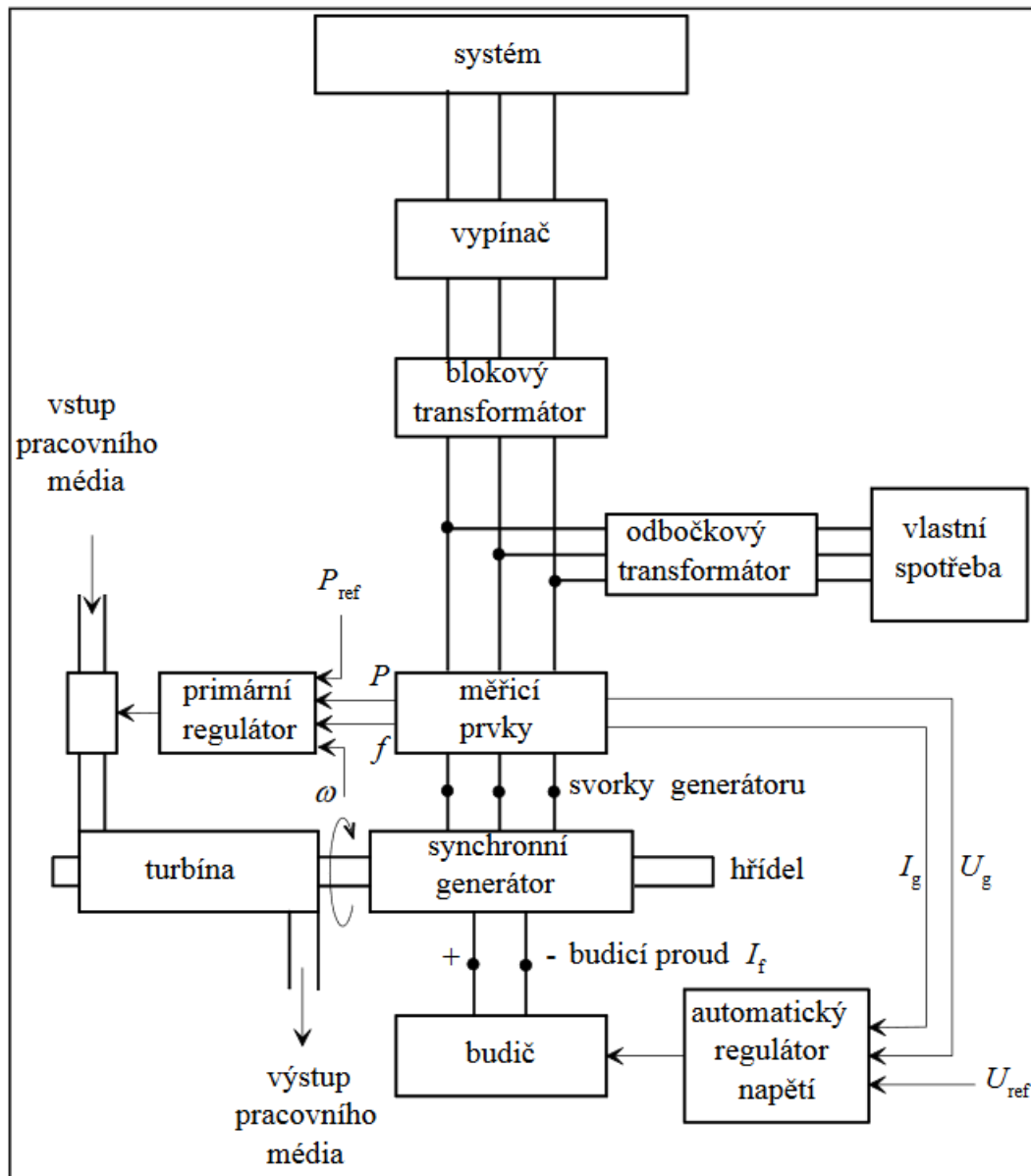
Problémem může být zvýšená citlivost autotransformátorů na zkraty oproti normálním transformátorům, u kterých je zkratová odolnost vyšší. Musí se tedy zvolit takové uspořádání, aby se co nejméně zvyšovaly složky zkratových sil na všech odbočkách. V případě malých regulačních rozsahů se regulační vinutí rozděluje na dvě části do určité výšky kmenového vinutí. Odbočkové cívky se stále prostřídávají. Pokud se jedná o velké regulační rozsahy, používá se samostatné vinutí, které se umístí na stranu kmenového vinutí mimo hlavní rozptylový kanál. Regulační vinutí bývá buď polohové s odbočkami vyvedenými i z části poloh, anebo kotoučové a vytvořené ze dvou paralelně protiběžných částí s vývody postupujícími souměrně od středu výšky vinutí. Při malém počtu závitů a velkých proudech se regulační vinutí provádí jako šroubovice, jejíž závity jednotlivých regulačních poloh jsou rozloženy po celé výšce jádra.

3 Význam elektrárenských transformátorů

Práce transformátorů začíná hned na začátku výroby elektrické energie, tedy zdroje. Blokové schéma určuje jakým způsobem je vyveden výkon z elektrárny a jak je zajištěno napájení vlastní spotřeby. Na schématu 3.1 je vidět umístění transformátorů v elektrárně.

Hlavním úkolem elektráren je zajištění dodávky elektrické energie s dostatečnou bezpečností, spolehlivostí a hospodárností. Z tohoto důvodu jsou zavedeny stupně dodávky elektrické energie:

- 1) Ztráta napájení způsobí ohrožení na životech, havárii zařízení nebo velké hospodářské ztráty.
- 2) Ztráta napájení způsobí velké hospodářské ztráty.
- 3) Ztráta napájení způsobí omezení výroby.



Obr. 3.1: Blokové schéma výrobní jednotky s nejdůležitějšími prvky [7]

3.1 Blokový transformátor

Hlavní účel blokového transformátoru je vyvedení vyrobeného výkonu do sítě. Obvyklý stav transformátoru je tedy pod zatížením. V případě, že není zapnutý generátor, musí plnit funkci zdroje vlastní spotřeby. Proto má další vývody na odbočkové transformátory, kde se napětí transformuje na 6,3 kV a přivádí do rozvodny.

Blokové transformátory jsou řešeny jako tři jednofázové jednotky, z důvodu složité konstrukce a náročných parametrů třífázového provedení. Jsou umístěny ve venkovní rozvodně. Na straně vedení jsou vývody napojeny do sítě přes průchodky, které musí mít potřebnou bezpečnou velikost. Např. do vedení 400 kV musí být průchodky dimenzovány na 500 kV. Z opačné strany jsou vývody spojeny do uzlu a trvale uzemněny. Strana vlastní spotřeby je řešena spojením do trojúhelníka, kde dva vývody každé fáze přechází do zapouzdřených vodičů.

Nádoba transformátoru je tzv. zvonového provedení. Horní díl transformátoru je v podobě zvonu. Ten se nasouvá na spodní část, kde je odvod a vinutí. V případě demontáže nebo výměny transformátoru je spodek opatřen koly, která jsou zajištěna v kolejnici. Magnetický obvod je plášťový, složený z orientovaných plechů. K chlazení transformátoru zde slouží olej, jehož cirkulaci zajišťují čerpadla. Olej je chlazen radiátorovými chladiči, kterými proudí vzduch od ventilátoru. Jak už bylo zmíněno v kapitole 1.2, je i zde potřeba dilatační nádoba a kontrolu teploty zajišťuje plynové relé. Nárůst oleje může také vytvořit velký tlak na nádobu oleje a způsobit mechanické poškození. Do určitého tlaku tomu brání pojistné ventily, ovšem pouze v případě pomalého nárůstu tlaku. Když tlak stoupne hodně rychle, ventily nestihnou zapůsobit a dojde k poškození a úniku oleje. Asi 20 % oleje se usadí v záchytné vaně pod transformátorem, zbytek je sveden do havarijní jímky, která slouží pro všechny společné transformátory.



Obr. 3.2: Blokový transformátor

3.1.1 Příklady provedení blokových transformátorů

V bývalé Československé republice byl do roku 1962 největší vyrobený blokový transformátor 110 kV s výkonem 69 MVA, $106\pm 16 \times 2/10,5$ kV v zapojení Yd 5 s odporovou regulací při zatížení. Transformátor byl tehdy vyroben pro polskou elektrárnu Miechowice. Má pětijádrový magnetický obvod z plechů válcovaných za tepla a měděné vinutí. Regulační vinutí je ve zvláštní vrstvě. Ztráty naprázdno jsou 150 kW, nakrátko 312 kW, napětí nakrátko 10,5 %.

Pro vodní elektrárnu Lipno dodal ČKD Praha blokové transformátory 68, eventuálně 75 MVA, $115\pm 5 \%/15$ kV, Yd 1 s izolovaným uzlem na straně vvn. Vinutí je měděné, cívkové, plechy válcované za tepla. Olej se chladí baterií radiátorů. Podobné jsou transformátory 63 MVA s hliníkovým vinutím pro parní elektrárnu Mělník. [2]

ČKD Praha dodal regulační soupravu 50 MVA na mezistátní výměnu energie 110 kV. Velikost transformátoru byla $100/100\pm 8 \times 2 \%$ a skládal se z hlavního a sériového regulačního transformátoru. Bylo zde malé napětí nakrátko, což způsobuje značné osově zkratové síly. Z toho důvodu byly transformátory opatřeny stlačovací svorníky umístěné nad vinutím. Oba transformátory byly trojfázové a regulace byla tlumivková.

První transformátory pro linku 220 kV dodali firmy LZ Plzeň a ČKD Praha. Jednalo se o regulační trojfázové skupiny $220/110/10,5$ kV, 100/100/60 MVA. Regulace zde byli odporová přímo na vstupu vinutí 220 kV.

Blokové transformátory na 220 kV byly nejprve vyráběny pro Korejskou lidově demokratickou republiku. Byli to transformátory 40 MVA, $220\pm 10 \%/10,5$ kV a 50 MVA, $242\pm 5 \%/10,5$ kV na 60 Hz.

LZ dodaly blokové transformátory na 220 kV pro vodní elektrárnu Orlický náhon a blok 100 MW pro parní elektrárnu. Transformátory pro Orlický náhon jsou jednofázové, 200/3 MVA a $242\pm 5 \%/15$ kV, každá trojfázová skupina je napájena ze dvou generátorů 100 MW. Vinutí je měděné, plechy válcované za tepla. Transformátor pro turboblok 100 MW má výkon 125 MVA a převod $242\pm 5 \%/13,8$ kV. Magnetický obvod je pětijádrový, z orientovaných plechů, vinutí je měděné. Oba zmíněné transformátory mají polohové vinutí stíněné proti rázovým přepětím a tvrdou izolaci.

3.1.2 Zahraniční výrobci

V bývalém SSSR byla výroba mezních transformátorů soustředěna v Záporožském transformátorovém závodu, který vyrobil i transformátory pro přenos 400 kV Kujbyšev – Moskva s výkonem trojfázové skupiny 270 MVA. Tyto transformátory jsou chlazeny radiátory na nádobě a jsou opatřeny průchodkovými transformátory proudu. Kromě toho závod vyrobil i několik autotransformátorů na 400 kV a pro soustavu 500 kV jednofázové blokové transformátory 135 MVA, $525/\sqrt{3}/13,8$ kV, napětí nakrátko 13,4 %, ztráty naprázdno 335 kW a nakrátko 513 kW.

Švédská ASEA vyrobila a dodala několik desítek transformátorů na 380 kV, mezi nimi první transformátory na 380 kV na světě. Většinou jsou to transformátory a autotransformátory jednofázové; tato firma však vyrobila též (první na světě) dva trojfázové transformátory 100 MVA, 400/13,8 kV do podzemní elektrárny Ligga ve Švédsku. V roce 1959 vyrobila ASEA skupinu jednofázových transformátorů 3 x 200 MVA a 400/ $\sqrt{3}$ /18/18 kV pro blokové spojení s dvěma hydroalternátory po 300 MVA. Magnetický obvod z orientovaných plechů má dvě jádra s vinutím a dvě bez vinutí. [2]

Belgická firma ACEC vyrábí transformátory mezních výkonů, jako plášťové s orientovanými plechy a vinutím prostřídáním, a to většinou jednofázové. Takové transformátory vyžadují zcela odlišnou výrobu jak magnetického obvodu, tak i vinutí. Výhodou je malé množství oleje a možnost snadné dopravy. Transformátor tohoto typu staví též francouzská firma FACEJ.

Švýcarská firma BBC vyrábí transformátory mezních výkonů s radiálně skládaným jádrem z orientovaných plechů. Pro Švédskou vodní elektrárnu např. dodaly trojfázovou skupinu 130 MVA, $13,85/400/\sqrt{3}$ kV. Vinutí je soustředné, se vstupem vvn uprostřed.

3.2 Odbočkový transformátor

Odbočkový transformátor slouží jako pracovní zdroj vlastní spotřeby. Vyvedení blokových transformátorů na rozvodny vlastní spotřeby se provádí právě přes něj. Slouží tedy jako přímé napájení blokové rozvodny. Také pracuje pod zatížením.

Transformátory jsou třífázové s třemi vinutími. Jedno vinutí je jako primární, další dvě slouží jako sekundární. Obě strany jsou řešeny zapouzdřenými vodiči. Stejně jako blokové transformátory jsou i odbočkové zvonového provedení. Mají plášťový magnetický obvod z orientovaných izolovaných plechů.

Chlazení je zde olejové a cirkulaci média opět provádějí čerpadla. Samotný olej je ofukovaný ventilátorem s radiátorovými chladiči. Absorpční filtr zajišťuje čistotu oleje. Transformátor je opět opatřen dilatačními nádobami, kvůli zvětšení objemu oleje při vysokých teplotách. Plynové relé mezi dilatační nádobou a nádobou transformátoru kontroluje stav hladiny oleje a rychlost průtoku. V případě poklesu hladiny musí dát signál a transformátor se musí vypnout.

Transformátor je chráněn i proti přetlaku oleje pojistným ventilem. Při překročení určitého tlaku zapůsobí a vypíná transformátor.

Mezi další ochrany patří tepelné senzory, které v případě poruchy spustí hašení transformátoru a zároveň ho chladí. Okolí musí být chráněno protipožárními přepážkami.

Regulaci zde zajišťují odporové přepínače odboček, které mají 9 stupňů s krokem $\pm 4 \times 4$ %. Umístění je na primárním vinutí.



Obr. 3.3: Odbočkový transformátor

3.3 Rezervní transformátor

V případě poruchy nebo výpadku odbočkových transformátorů musí být elektrárny vybaveny záložními transformátory, které v takovém případě zaskočí a převezmou napájení blokové rozvodny. Jedná se o rezervní transformátory, které jsou při běžném stavu nezatížené (pracují pod napětím naprázdno). Transformátor se může zatížit skokově nebo postupně.

Transformátor je řešen jako trojvinutový a bývá napájen z venkovní linky, sekundární vinutí jsou pak vyvedené do blokové rozvodny v podobě zapouzdrěných vodičů.

Konstrukce transformátorů, chlazení i ochrany jsou prakticky stejné jako u transformátorů odbočkových, které jsme si probrali v předchozí kapitole.

3.4 Vlastní spotřeba elektráren

Vlastní spotřeba elektřiny v elektrárnách udává spotřebu elektrické energie při výrobě elektřiny, tj. v hlavním výrobním zařízení i v pomocných provozech, včetně ztrát v rozvodu vlastní spotřeby. Zahrnuje zejména spotřebu elektrické energie při výrobě páry v parních generátorech (doprava a úprava paliva, doprava vzduchu a spalín, napájení kotlů, úprava napájecí vody aj.) a spotřebu elektrické energie při výrobě elektřiny ve strojovně (úprava vody, čerpání, chlazení aj.). Počítá se od vstupní strany transformátoru vlastní spotřeby nebo od místa, kde je vlastní spotřeba napojena k jiným elektrickým zařízením (např. odbočky od alternátoru). Do vlastní spotřeby se nezapočítává spotřeba elektrické energie vedlejších provozů a nevýrobních objektů, tyto spotřeby se zahrnují pod odběry elektrárny. [10]

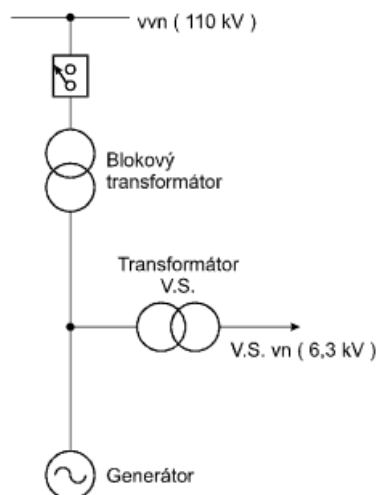
Vlastní spotřeba elektřiny se udává v procentech vyrobené elektrické energie (za den, měsíc, rok). U tepelných elektráren se pohybuje v rozmezí 4 až 11 %. Procentní podíl určuje typ elektrárny a použité palivo:

- Uhelé elektrárenské bloky – 7 až 11 %
 - Při použití parní turbíny k pohonu napájecích čerpadel – 4 až 6 %
- Tepelné elektrárny spalující mazut a plyn – 5 až 6,5 %
 - Při použití parní turbíny k pohonu napájecích čerpadel – 2,5 až 3,5 %
- Teplárny – 14 až 18 %
- Jaderné elektrárny s lehkovodními reaktory – 6 až 7 %
- Vodní elektrárny – do 1 %

Vlastní spotřeba musí být v elektrárnách řešena tak, aby při všech provozních stavech dokázala zajistit optimální provoz. Musí zajistit dostatečný výkon při najíždění, který alternátor ještě není schopný poskytnout. Výkon poskytuje najížděcí transformátor nebo je dodán ze sítě přes blokový transformátor a transformátor vlastní spotřeby. Tyto podmínky pro najíždění jsou skoro stejné jako podmínky při doběhu. I zde musí vlastní spotřeba minimálně zajistit bezpečný a bezporuchový doběh. Při odpojení alternátoru od sítě tedy musíme zajistit napájení všech spotřebičů a to i v případě poruchy, při které by došlo k odbuzování alternátoru.

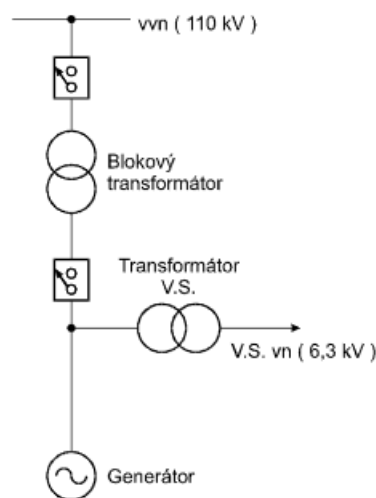
3.4.1 Schéma bloků alternátorového vypínače a vlastní spotřeby

Schéma bloku bez alternátorového vypínače



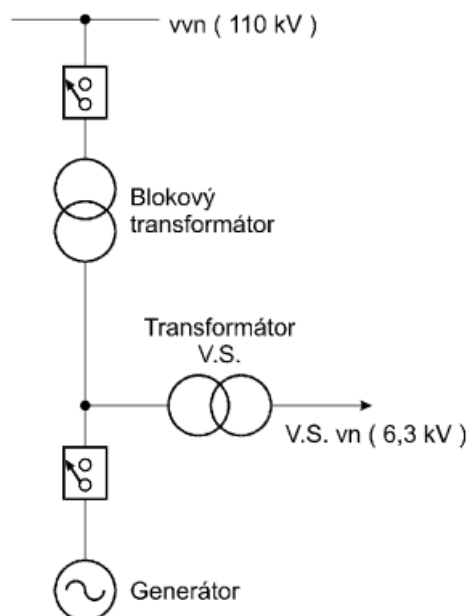
Obr. 3.4: Schéma bloku bez alternátorového vypínače [10]

Na obr. 3.4 vidíme, že vypínač je pouze na straně vvn blokového transformátoru. Je tedy nutné použít najížděcí transformátor, který zároveň napájí vlastní spotřebu bloku při odstavení a různých poruchách alternátoru, blokového transformátoru a transformátoru V.S. Najížděcí transformátor je dimenzován zhruba na výkon V.S. dvou bloků, nejčastěji s převodem 110/6,3 kV. Výhoda je v levných pořizovacích nákladech, přehlednosti a jednoduchosti. Při poruše za vypínačem může alternátor napájet vlastní spotřebu bloku bez přerušení. Používá se pro menší bloky několika desítek MW.

Schéma bloku bez alternátorového vypínače

Obr. 3.5: Schéma bloku s alternátorovým vypínačem [10]

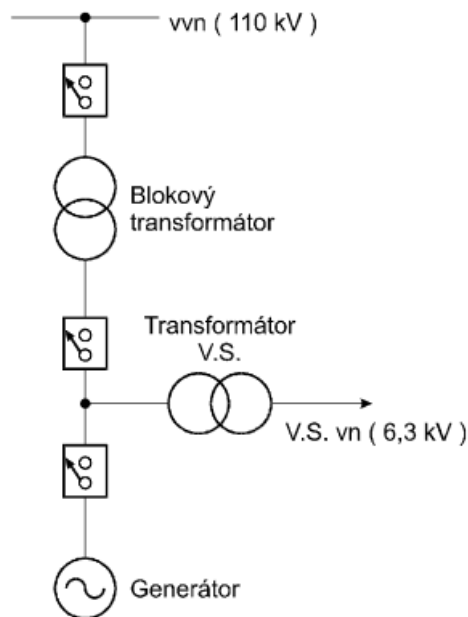
Na obr. 3.5 je druhý vypínač umístěn na straně alternátoru až za odbočkou na transformátor V.S. I zde je tedy nutný najížděcí transformátor. Tento způsob zapojení je zvolen pro odstranění poruch na blokovém transformátoru a na straně vvn. Alternátor zůstává v chodu i po vypnutí a nepřetržitě napájí vlastní spotřebu. Je zde zvýšená stabilita alternátoru i pro případy provozu se sníženým výkonem jen do V.S. Využívá se v jaderných elektrárnách.

Schéma bloku s alternátorovým vypínačem na svorkách alternátoru

Obr. 3.6: Schéma bloku s alternátorovým vypínačem na svorkách alternátoru [10]

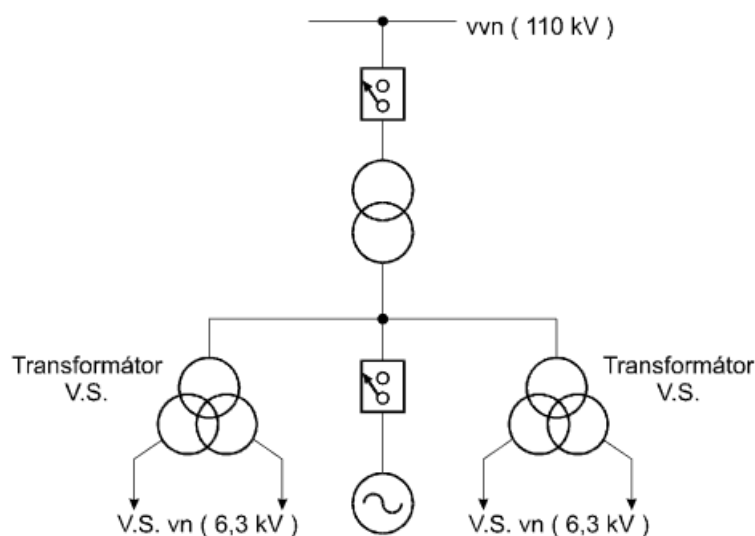
Na obr. 3.6 je vypínač umístěn přímo na svorkách alternátoru. Zapojení využívá blokovaný transformátor pro najíždění bloku přes transformátor V.S. v případě, že alternátor stojí. V případě poruchy blokovaného transformátoru je třeba použít jiný síťový transformátor, který funguje jako rezerva. Využití pro bloky velkých výkonů.

Schéma bloku se dvěma alternátorovými vypínači



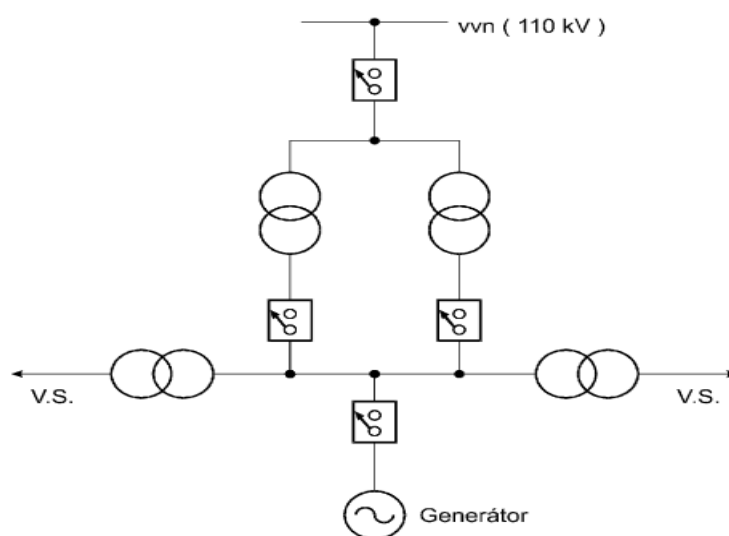
Obr. 3.7: Schéma bloku se dvěma alternátorovými vypínači [10]

Na obr. 3.7 je vidět, že za alternátorem jsou dva vypínače, jeden přímo na svorkách a další za odbočkou transformátoru V.S. Je zde zajištěno odstranění poruchových stavů na blokovaném transformátoru. V případě poruchy je zajištěno napájení vlastní spotřeby, ať už ze sítě nebo z alternátoru, který sníží svůj výkon na výkon vlastní spotřeby. Kvůli dalšímu vypínači jsou zde vyšší pořizovací náklady.

Schéma bloku se dvěma transformátory V.S.

Obr. 3.8: Schéma bloku jaderné elektrárny [10]

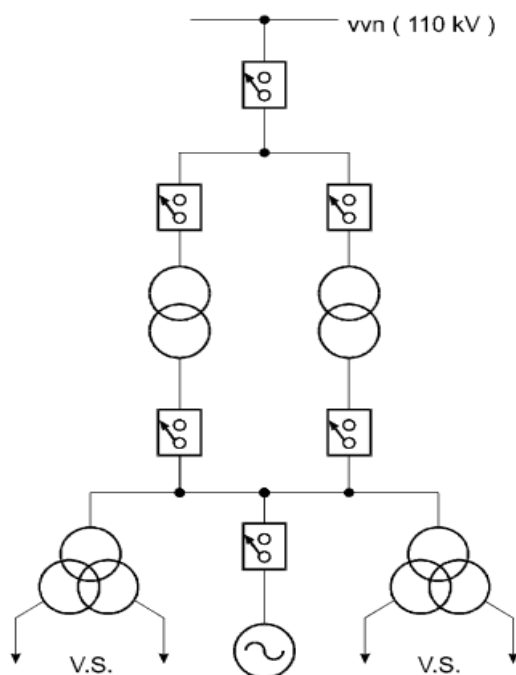
Schéma z obr. 3.8 je typické pro jaderné elektrárny. U jaderných elektráren a bloků vysokých výkonů přesahujících 1000 MW jsou nároky na vlastní spotřebu vyšší než u klasických tepelných elektráren. Jsou zde voleny dva transformátory V.S. v trojvintuřovém provedení. Jeden vypínač je zde umístěn na straně vvn a druhý je za alternátorem před odbočením na V.S. Z obrázku je patrné že v případě poruchy na blokovém transformátoru je třeba napájet vlastní spotřebu z jiného síťového transformátoru, popř. ze sousedních bloků.

Schéma bloku se dvěma transformátory blokovými i transformátory V.S.

Obr. 3.9: Schéma bloku JE se dvěma blokovými transformátory [10]

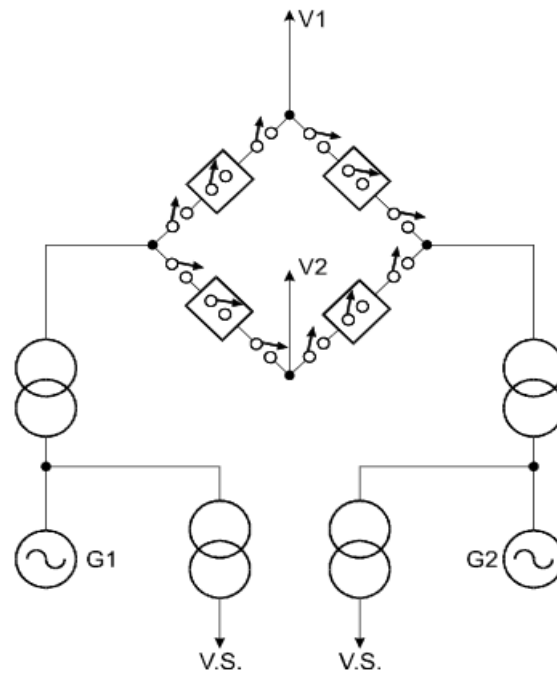
Obr. 3.9 uvádí schéma bloku s velkým jednotkovým výkonem JE, kde jsou dva blokové transformátory. Není zde umožněna manipulace pod zatížením, aby byla ve všech možných případech zajištěna dodávka vlastní spotřeby bez přerušení. Na straně vn vlastní spotřeby musí být řešení pomocí zapínacích rezerv. Blokové transformátory se používají pro najíždění, na poruchové stavy je třeba rezervní zdroj.

Schéma bloku se dvěma B.T. i transformátory V.S. bez nutného havarijního transformátoru



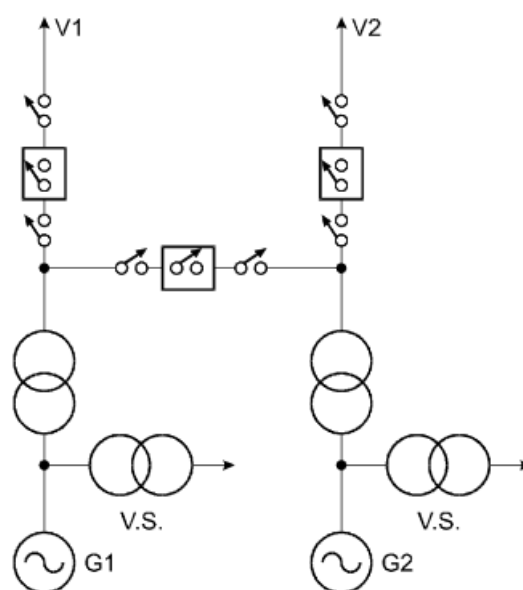
Obr. 3.10: Schéma bloku JE bez havarijního transformátoru [10]

Schéma podle obr. 3.10 odstraňuje určité nevýhody. Vypínače jsou instalovány tak, aby zajistily odpojení jen příslušné poškozené části. Řešení je vhodné při krátkém blokovém vedení. Vlastní spotřeba je zajištěna při všech možných provozních i poruchových stavech. Není třeba rezervní transformátor, který by zajišťoval najíždění.

Čtyřúhelníkové schéma

Obr. 3.11: Čtyřúhelníkové schéma vývodu dvou bloků [10]

Čtyřúhelníkové schéma na straně vvn se dvěma vypínači na vývod i na alternátor umožňuje pomocí manipulací a vypínači, tedy pod zatížením, přecházet na provoz libovolného vývodu (V1 nebo V2). Zvyšuje se tím provozní spolehlivost bloků při možných poruchách na vedení vvn. Nevýhodou je ovšem menší přehlednost.

Schéma typu „H“

Obr. 3.12: Schéma typu H pro dva bloky [10]

Schéma typu „H“ je další speciální případ zapojení. Pro vývody elektrárenských bloků se používá jen zřídka. Využití např. u vodních elektráren, kde jsme limitováni prostorem, a není možné budovat další rozvodny. Schéma vyžaduje pouze tři vypínače pro dva vývody a umožňuje přechod z jednoho vývodu na druhý pod zatížením.

4 Phase Shifting Transformers (PST)

Phase shifting transformers (PST) neboli transformátory s regulací fáze je zařízení sloužící ke změně činných nebo jalových toků v elektrických soustavách. Uplatnění PST je především při přerozdělení toků (proudů) na paralelních vedeních a při regulaci výkonových toků mezi vzájemně propojenými přenosovými soustavami. Funkce PST vychází z přenosu výkonu po vedení.

4.1 Přenos výkonu po vedení

Vedení je definováno impedancí a přenos výkonu závisí na velikosti a fázi napětí na začátku a konci. Reaktance vedení je zde dominantní složkou a můžeme tedy zanedbat rezistenci vedení. Impedance vedení a fázový posun je:

$$Z = R + jX, R \ll X \quad (1)$$

$$\varphi_Z = \arctan\left(\frac{X}{R}\right) \quad (2)$$

Napětí v každém uzlu se skládá z amplitudy a fáze. Pro další výpočty je výhodné popsat napěťový fázor pomocí Eulerova vzorce a funkcí sin a cos. Napětí na začátku vedení označíme U_S (source – zdroj) a na konci U_L (load – odběr).

$$U_S = U_S(\cos(\delta_S) + j\sin(\delta_S)) \quad (3)$$

$$U_L = U_L(\cos(\delta_L) + j\sin(\delta_L)) \quad (4)$$

Proud protékající vedením je dán rozdílem napětí na začátku a konci vedení a je nepřímo úměrný impedanci vedení.

$$I = \frac{U_S \cos(\delta_S) - U_L \cos(\delta_L) + j(U_S \sin(\delta_S) - U_L \sin(\delta_L))}{Z} \quad (5)$$

Po zanedbání rezistence můžeme rovnici upravit:

$$I = \frac{U_S \sin(\delta_S) - U_L \sin(\delta_L) - j(U_S \cos(\delta_S) - U_L \cos(\delta_L))}{X} \quad (6)$$

Předpokládáme bezeztrátové vedení, proto výkon na konci vedení spočítáme jako násobek v koncovém uzlu a komplexně sdružené hodnoty proudu.

$$S_L = U_L I^* = \frac{U_L U_S}{X} \sin(\delta_S - \delta_L) - j \frac{U_L^2}{X} + j \frac{U_L U_S}{X} \cos(\delta_S - \delta_L) \quad (7)$$

Činný výkon je dán jako reálná část zdánlivého výkonu:

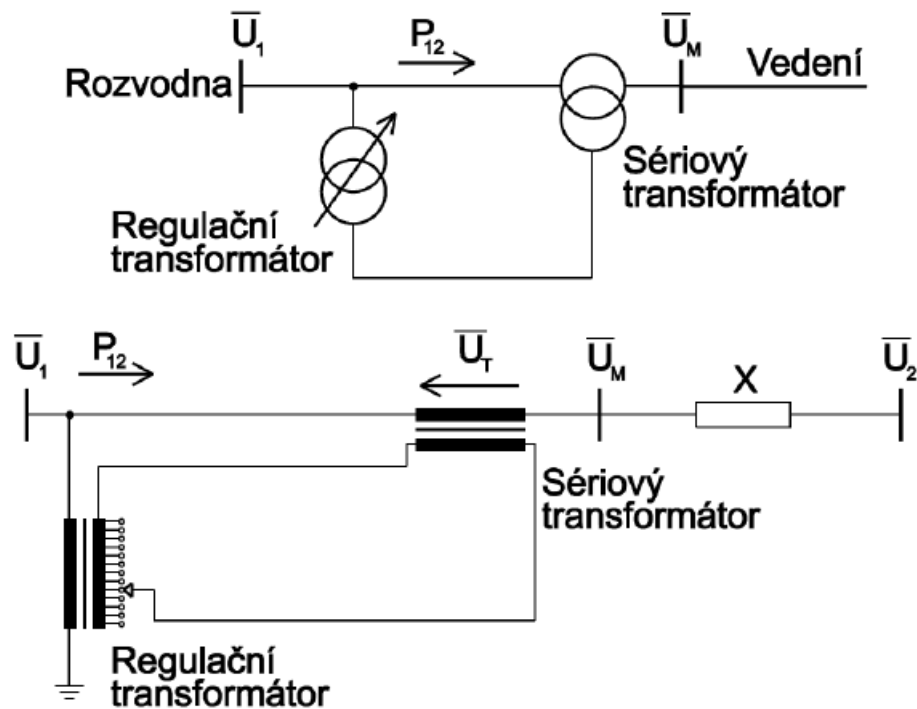
$$P_L = P_S = \frac{U_S U_L}{X} \sin(\delta_S - \delta_L) \quad (8)$$

Jalový výkon je dán imaginární částí zdánlivého výkonu:

$$Q_L = \frac{U_S U_L}{X} \cos(\delta_S - \delta_L) - \frac{U_L^2}{X} \quad (9)$$

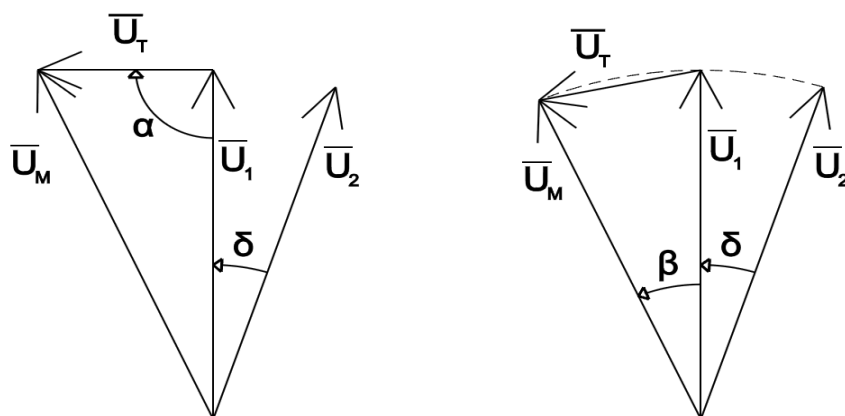
4.2 Transformátor s regulací fáze

Na začátku kapitoly jsme si řekli, že transformátor s regulací fáze řídí toky činných a jalových výkonů v síti. Výkony měníme změnou fázového posunu napětí na začátku a konci vedení. Pomocí PST dokážeme řídit velikost i směr výkonových toků. Samotné PST je složeno ze dvou transformátorů. Jeden transformátor je regulační a je připojen paralelně k přenosovému vedení. Jeho úkolem je získávat fázové napětí. Druhý transformátor je přídatný a je umístěn v sérii s přenosovým vedením. Požadovaný fázový posun vzniká „vstřikováním“ regulačního napětí \bar{U}_T do sériového transformátoru. Získané regulační napětí je přidáváno do té fáze, aby bylo dosaženo posuvu výsledného napětí \bar{U}_M .



Obr. 4.1: Obecné schéma zařízení PST [12]

Je-li vstříkované napětí ve fázi s fázovým napětím sítě, nastane změna amplitudy napětí, čímž lze řídit tok jalového výkonu a napětí. Pro požadované řízení toku činného výkonu je zapotřebí změnit fázi napětí. Pokud je vstříkované regulační napětí kolmé na fázové napětí, dojde také ke změně amplitudy napětí. Tento typ transformátoru se nazývá Quadrature booster transformer (QBT). Komplikovanějším a složitějším případem transformátoru PST je tzv. Phase angle regulátor (PAR), který je schopen dodat takové regulační napětí, při kterém nedojde ke změně amplitudy napětí.



Obr. 4.2: Fázorový diagram QBT a PAR [13]

U QBT dochází k vstřikování regulačního napětí, které je kolmé $\alpha = 90^\circ$ k fázovému napětí sítě (např. k napětí na fázi U_a je přidáno napětí odpovídající napětí U_{bc}).

U PAR se změnou regulačního úhlu β mění pouze fázový posun mezi napětími a amplitudy zůstávají stejné $|U_1| = |U_M| = |U|$. Dostaneme výkonové rovnice.

$$P = \frac{U^2}{X} \sin(\delta + \beta) \quad (10)$$

$$Q = \frac{U^2}{X} (\cos(\delta + \beta) - 1) \quad (11)$$

Některá zařízení PST jsou schopny tyto regulace kombinovat a po krocích měnit (až $\pm 40^\circ$). Regulační úhel je obvykle skokově měněn pomocí přepínače odboček. Vhodnější využití je však použít plynulou regulaci pomocí tyristorově řízené jednotky.

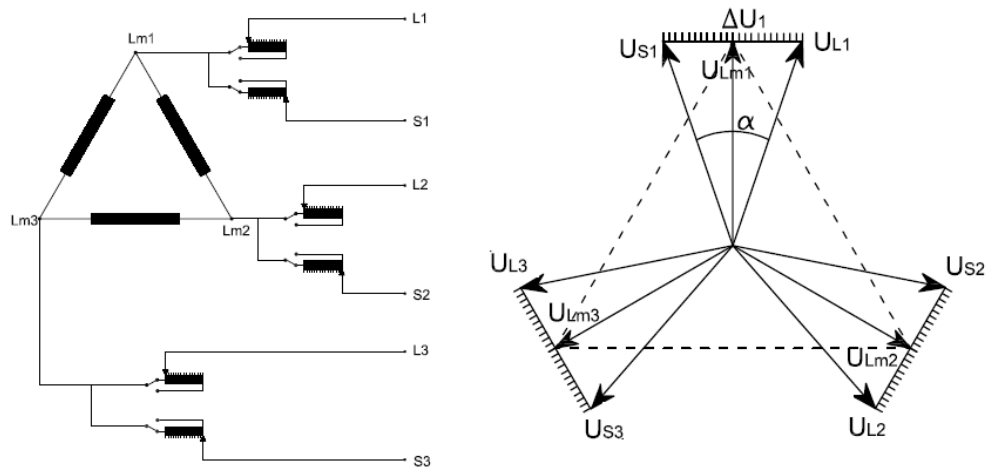
4.3 Konstrukce PST

Všechny PST mají v podstatě stejný funkční princip. Základem je budící vinutí, na kterém je napětí z napájecí sítě a ze sériového vinutí, které zajišťuje vstřikování regulujícího napětí do vedení. Rozdíly mezi transformátory PST jsou především v konstrukci, podle které se určuje využití konkrétního PST. Využití se týká především napěťové úrovně, velikost proudů a požadovaný rozsah fázové regulace.

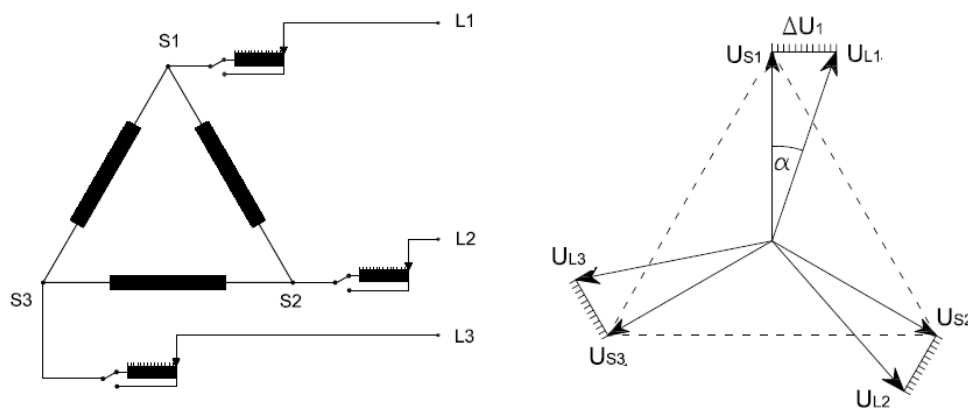
4.3.1 Jednojádrová konstrukce

Použití konstrukce s jedním jádrem je vhodná pro napěťové hladiny vn a menší regulační úhel α . Regulace fázového úhlu je dosaženo připojením budícího vinutí na střed sériového vinutí. Díky tomuto uspořádání se regulací mění jen úhel a nemění se napětí. Jedná se o symetrickou regulaci (obr. 4.3). Proud protéká budícím vinutím, které je zapojeno do trojúhelníku, tím dochází k posunu o 30° (např. mezi fázemi 2 a 3). Tento proud vytvoří magnetické pole, které indukuje napětí v sériovém vinutí, v tomto případě vinutí fáze 1. Proti napětí této fáze je regulační napětí celkově posunuto o 90° .

Můžeme zde použít jen jeden přepínač odboček na fázi (obr. 4.4), ale v tomto případě se bude se změnou úhlu měnit i amplituda napětí za transformátorem a rozsah úhlové regulace bude menší.

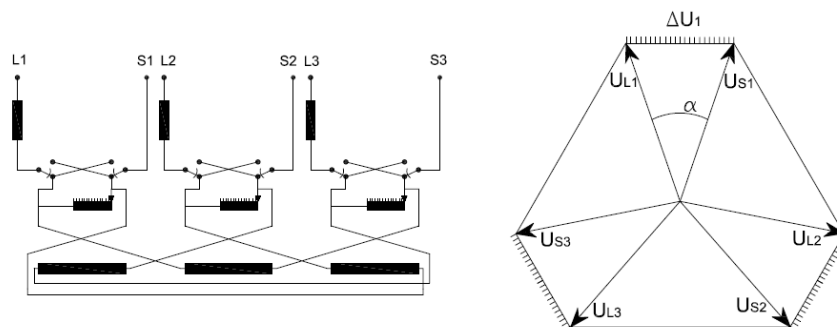


Obr. 4.3: Symetrický PST s jedním jádrem [14]



Obr. 4.4: Nesymetrický PST s jedním jádrem [14]

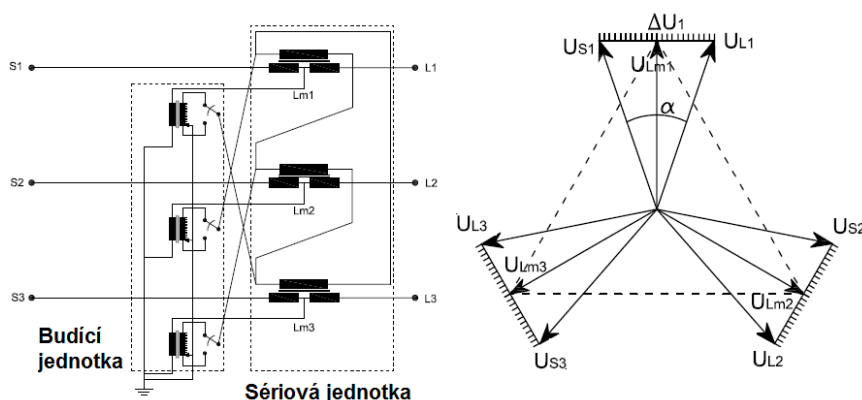
V tomto případě jsou odbočky připojené přímo na síť a jsou tedy vystaveny velkému namáhání v případě přepětí, zkratů atd. Jelikož je při nulovém regulačním úhlu reaktance nulová, nebyl by zkratový proud nijak omezen. Z toho důvodu je vhodné připojit na výstupní stranu PST další impedanci. Výhodou je naopak jednoduchost a ekonomičnost konstrukce. Mezi další konstrukční zapojení s jedním jádrem patří např. delta-hexagonální zapojení. Obsahuje jeden přepínač odboček a budící a sériové vinutí je zapojené na jednom sloupku jádra.



Obr. 4.5: Delta-hexagonální zapojení [14]

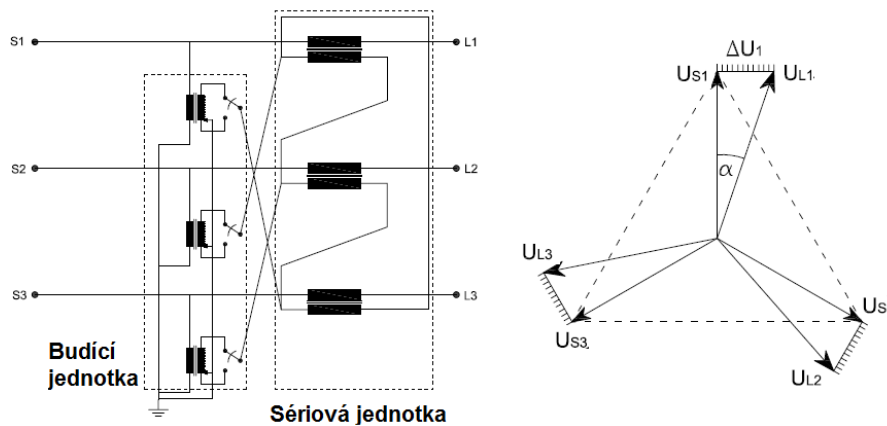
4.3.2 Dvoujádrová konstrukce

Dvoujádrový transformátor se skládá ze dvou jednotek, které mohou být v závislosti na výkonu transformátoru uloženy do jednoho nebo dvou tanků. Primární vinutí budící jednotky obsahuje síťové napětí, které je transformováno na sekundární stranu. Na sekundární straně je obvykle umístěn přepínač odboček. Sekundární vinutí budící jednotky je spojeno s primárním vinutím sériového transformátoru jiné fáze, opět tedy dochází k fázovému posuvu o 90° proti napětí dané fáze. Regulační napětí se poté indukuje na sekundární stranu sériového vinutí, které je připojeno přímo na vedení. Obecně platí, že jedno z vinutí musí být zapojeno do trojúhelníka (obvykle primární nebo sekundární budícího na primární sériového), zbývající je zapojena do hvězdy. V případě transformátoru se symetrickou regulací je regulační napětí kolmé k napětí na budícím vinutí, které je mezi napětími na zdrojové U_S a odběrové U_L straně. Změnou úhlu α neovlivníme velikost ani jednoho z napětí.



Obr. 4.6: Zapojení symetrické regulace [14]

Pokud se jedná o nesymetrickou regulaci, tak je budící vinutí zapojeno přímo na zdrojovou stranu. Napětí indukované do sériového vinutí je tedy posunuto o 90° přímo vzhledem ke zdrojovému napětí U_S , regulace tak nebude souměrná a bude se měnit i amplituda napětí U_L .

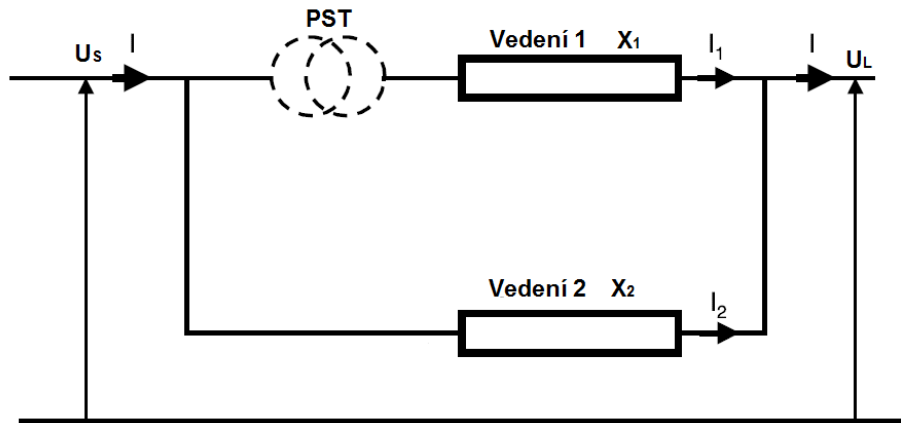


Obr. 4.7: Zapojení nesymetrické regulace [14]

Konstrukce PST se dvěma jádry je využívána pro velké výkony a velké regulační úhly. Odbočky jsou umístěny na sekundárním vinutí, což nám dává výhodu nižší ceny, protože sekundární strana je vystavena nižšímu napětí. Impedance sériové části je konstantní a nezávislá na regulačním úhlu. PST s dvoujádrovou konstrukcí je tedy lépe chráněna proti zkratům než konstrukce s jedním jádrem.

4.4 Využití PST

Fázově řízené transformátory se využívají v soustavách, kde je třeba regulovat výkonové toky na nerovnoměrně zatížených vedeních. Je možné, že jednomu vedení hrozí přetížení (popř. už je přetížené) a další vedení jsou zatížena minimálně. Kdybychom tuto situaci neřešili, mohlo by dojít k odpojení vedení od zbytku sítě a následnému přetížení ostatních částí sítě.



Obr. 4.8: Zapojení PST pro paralelní vedení [15]

Situaci můžeme zjednodušit na příkladu dvou paralelních vedení. Uzel s napětím předpokládá, že zatímco je velikost a fáze zdrojového napětí pevně daná, velikost a fáze napětí na konci vedení se budou měnit v závislosti na výkonu tekoucím na konci vedení, který si tak můžeme představit jako odběr. Proudy a tedy i výkony se rozdělí přímo úměrně impedanci (nebo reaktanci při zanedbání rezistence) vedení.

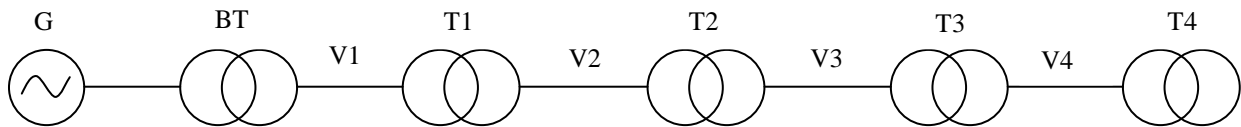
$$I_1 = I \frac{X_2}{X_1 + X_2} \quad (12)$$

$$I_2 = I \frac{X_1}{X_1 + X_2} \quad (13)$$

Instalujeme-li PST na přetěžované vedení, zvýší se jeho impedance o impedanci transformátoru a dojde k poklesu výkonu na tomto vedení a naopak ke zvýšení na vedení bez PST. Pomocí úhlové regulace PST je možné toky na obou linkách úplně vyrovnat, případně dále regulovat pro větší zatížení druhého vedení.

5 Využití regulačních transformátorů v síti

Pro ukázkou významu transformátorových přepínačů odboček je zde ukázána jednoduchá síť, na které si ukážeme regulaci napětí na různých napěťových hladinách.



Obr. 5.1: Navržená síť

Parametry transformátorů:

BT – 24/420 kV

3x400 MVA

T1 - 400/110 kV

$\Delta P_0 = 180 \text{ kW}$

$S_n = 330 \text{ MVA}$

$\Delta P_k = 1000 \text{ kW}$

$u_k = 12,6 \%$

$\cos\varphi = 0,89$

T2 - 110/22 kV

$\Delta P_0 = 38 \text{ kW}$

$S_n = 16 \text{ MVA}$

$\Delta P_k = 120 \text{ kW}$

$u_k = 11 \%$

$\cos\varphi = 0,92$

T3 - 22/6 kV

$\Delta P_0 = 18 \text{ kW}$

$S_n = 6,3 \text{ MVA}$

$\Delta P_k = 50 \text{ kW}$

$u_k = 7 \%$

$\cos\varphi = 0,95$

T4 - 6/0,4 kV

$\Delta P_0 = 0,9 \text{ kW}$

$S_n = 250 \text{ kVA}$

$\Delta P_k = 3,8 \text{ kW}$

$u_k = 4,5 \%$

$\cos\varphi = 0,97$

Parametry vedení:

Odpor a reaktance vedení dostaneme ze vztahu:

$$R_V = R_k * l \quad (14)$$

$$X_V = X_k * l \quad (15)$$

V1 - $l = 36$ km

$$R_k = 0,068 \text{ } \Omega/\text{km} \quad \rightarrow \quad R_V = 2,448 \text{ } \Omega$$

$$X_k = 0,396 \text{ } \Omega/\text{km} \quad \rightarrow \quad X_V = 14,256 \text{ } \Omega$$

V2 - $l = 30$ km

$$R_k = 0,085 \text{ } \Omega/\text{km} \quad \rightarrow \quad R_V = 2,55 \text{ } \Omega$$

$$X_k = 0,41 \text{ } \Omega/\text{km} \quad \rightarrow \quad X_V = 12,3 \text{ } \Omega$$

V3 - $l = 15$ km

$$R_k = 0,25 \text{ } \Omega/\text{km} \quad \rightarrow \quad R_V = 3,75 \text{ } \Omega$$

$$X_k = 0,38 \text{ } \Omega/\text{km} \quad \rightarrow \quad X_V = 5,7 \text{ } \Omega$$

V4 - $l = 6$ km

$$R_k = 0,62 \text{ } \Omega/\text{km} \quad \rightarrow \quad R_V = 3,72 \text{ } \Omega$$

$$X_k = 0,13 \text{ } \Omega/\text{km} \quad \rightarrow \quad X_V = 0,78 \text{ } \Omega$$

Odpor a reaktance transformátoru se dá vypočítat ze štítkových hodnot stroje.

Pro T1:

$$\Delta P_{k\%} = \frac{\Delta P_k}{S_n} * 100 = \frac{1000 * 10^3}{330 * 10^6} * 100 = 0,303 \text{ } \% \quad (16)$$

$$R = \frac{\Delta P_{k\%}}{100} * \frac{U_n^2}{S_n} = \frac{0,303}{100} * \frac{400^2}{330} = 1,47 \text{ } \Omega \quad (17)$$

$$Z = \frac{u_{k\%}}{100} * \frac{U_n^2}{S_n} = \frac{12,6}{100} * \frac{400^2}{330} = 61,09 \text{ } \Omega \quad (18)$$

$$X = \sqrt{Z^2 - R^2} = \sqrt{61,09^2 - 1,47^2} = 61,1 \text{ } \Omega \quad (19)$$

Výpočet úbytku na vedení a transformátoru:

Kromě poruchových stavů sítě jsou dalším problémem udržování spolehlivosti a vyváženosti sítě hlavně úbytky napětí na transformátorech a vedení. Požadavky na transformátory při kolísání napětí jsou především udržování konstantního výstupního napětí. To mají za úkol přepínače odboček, které vyrovnávají procentní odchylky od předepsaných hodnot. Velikost úbytků napětí ovlivňují parametry vedení (odpor a reaktance) a také zatížení transformátorů. Transformátory nesmějí být příliš zatěžovány z důvodu efektivnosti a spolehlivosti, vzhledem k jejich ztrátám.

Transformátor T1 uvažuji při 75 % zatížení. Při výpočtu úbytku napětí přepočítám odpory a reaktance na sekundární stranu.

$$R_T = R * \frac{1}{p^2} = 1,47 * \left(\frac{110}{400}\right)^2 = 0,11 \Omega \quad (20)$$

$$X_T = X * \frac{1}{p^2} = 61,1 * \left(\frac{110}{400}\right)^2 = 4,62 \Omega \quad (21)$$

Proud protékající transformátorem dostaneme ze vztahu:

$$I = \frac{S}{\sqrt{3} * U_n} = \frac{330 * 10^6}{\sqrt{3} * 110 * 10^3} = 1732,05 \text{ A} \quad (22)$$

Při uvažovaném 75 % zatížení transformátoru tedy dostaneme proud $I = 1299,04 \text{ A}$.

Úbytek napětí na výstupu transformátoru tedy bude:

$$\begin{aligned} \Delta u_f &= (R_V + R_T) * I * \cos\varphi + (X_V + X_T) * I * \sin\varphi = \\ &0,296 * 1299,04 * 0,89 + 5,7 * 1299,04 * 0,456 = 3718,68 \text{ A} \end{aligned} \quad (23)$$

Procentní úbytek sdruženého napětí pak získáme dosazením do vzorce:

$$\Delta u_{\%} = \frac{\sqrt{3} * \Delta u_f}{U_n} * 100 = \frac{\sqrt{3} * 3718,68}{110000} * 100 = 5,86 \% \quad (24)$$

Na transformátoru T1, kde jsme uvažovali 75 % zatížení, se nám objevil úbytek napětí 5,86 %. Jak již bylo zmíněno v kapitole 1.3, transformátory 400/110 kV mají regulaci na nižší straně napětí. Odbočkové přepínače jsou zde řešeny s regulačním rozsahem 19 odboček po kroku asi 1,45 %. Při zvýšení o 4 odbočky se výstupní napětí zvýší o 5,8 %, což téměř vyrovná procentní úbytek napětí na vedení a transformátoru.

Transformátor T2 má převod 110/22 kV a je uvažován s 50 % zatížením. Odpor transformátoru vypočtený na vyšší stranu napětí je 5,67 Ω a reaktance je 82,99 Ω . Proud transformátoru nám při 50 % zatížení vyšel 209,95 A. Příchozí vedení je dlouhé 30 km, jehož odpor je 2,55 Ω a reaktance 12,3 Ω . Po dosazení vyšel fázový úbytek napětí na výstupu transformátoru 377,28 V, což odpovídá procentní hodnotě 2,97 %.

Transformátory v sítích vn jsou řešeny jako izolované nebo neúčinně uzemněné. Regulace napětí je na vyšší straně napětí s regulačním rozsahem 17 odboček po kroku 2 %. Zde by bylo možné snížit napětí na primárním vinutí o jednu odbočku, abychom snížili úbytek na výstupní straně na přijatelnější hodnoty.

Transformátor T3 má převod 22/6 kV a uvažován je se 40 % zatížením. Odpor transformátoru je 0,61 Ω a reaktance je 5,34 Ω . Proud transformátoru má hodnotu při daném zatížení 242,49 A. Příchozí vedení je dlouhé 15 km s odporem 3,75 Ω a reaktancí 5,7 Ω . Fázový úbytek se zde pohybuje na hodnotě 136,75 V, tedy 3,94 % jmenovité hodnoty. Transformátor má možnost změny o 2 odbočky, což odpovídá 4 % jmenovité hodnoty.

Transformátor T4 má převod 6/0,4 kV a je zde uvažováno 30 % zatížení. Při hodnotách odporu 2,19 Ω reaktance 6,1 Ω nám protéká proud 108,25 A. Příchozí vedení je dlouhé 6 km s odporem vedení 3,72 Ω a reaktancí 0,78 Ω . Výsledný fázový úbytek napětí vychází 3,55 V, to odpovídá 1,54 % jmenovité hodnoty sdruženého napětí. Transformátory na hladinách nn se dají regulovat pouze v odpojeném stavu bez zatížení. Regulační rozsah u novějších transformátorů bývá 5 odboček po kroku 2,5 % a vyšší straně napětí. Přepínání odboček se většinou provádí pouze několikrát do roka, kdy se očekává zvýšené zatížení sítě, např. v zimních měsících, kdy roste spotřeba elektrické energie.

Závěr

Práce popisuje především výkonové transformátory a jejich regulaci napětí v síti. V první kapitole jsou stručně vysvětleny různé typy transformátorů a transformátorová koncepce České republiky. Je zde popis používaných napěťových úrovní a možnosti regulace transformátorů příslušných napětí. U transformátorů zapojených v síti jsou především důležité požadavky na bezpečnost a spolehlivost dodávky elektrické energie. Jelikož v sítích vznikají úbytky napětí a kolísání způsobené proměnnými změnami zatížení, či poruchovými stavy je důležité zajistit vyrovnání těchto rozdílů. Transformátory jsou vybaveny regulačními mechanismy známými jako přepínače odboček. Při návrhu těchto přepínačů musí být správně odstupňované vinutí potřebné pro plynulé změny výstupního napětí na požadované hodnoty. Laicky řečeno musíme zajistit snížení nebo zvýšení výstupního napětí abychom výstupní velikost udržovali co nejbližší jmenovité hodnotě. Důležité je, aby přepínání těchto odboček bylo možné při provozních stavech transformátorů, tedy při zatíženém stavu. Jak je známo, i u krátkých výpadků velkých transformátorů může dojít k ohrožení životů a velkým hospodářským ztrátám.

Konkrétní typy přepínačů a jejich princip je popsán ve druhé kapitole. Většina přepínačů pracuje prakticky na podobném principu. Rozdíl je především v použití přístrojů, které se používají jako výkonové spínače a také v součástkách, které omezují proud vznikající při přepínání. Zmínka je zde i o přepínačích, které slouží pouze pro regulaci transformátorů bez zatížení. Změna napětí u těchto transformátorů je možná pouze, jsou-li odpojené obě strany vinutí.

Třetí kapitola je věnovaná elektrárenskému bloku a provozu místních transformátorů. Důležité je zde hlavně chránění alternátorů a blokových transformátorů pro zajištění vlastní spotřeby. Do výbavy elektráren patří i rezervní transformátory, které musejí zajistit napájení vlastní spotřeby při poruchách blokových transformátorů. Je zde popis různých možností zapojení, které se liší podle typu elektráren.

Čtvrtá kapitola ukazuje význam transformátorů s řízeným posuvem fáze. Využití má především v přenosových soustavách. Jsou zde uvedeny dva základní typy používaných PST. Umístění PST na paralelní vedení je velmi výhodné pro přerozdělení výkonů, čímž můžeme odlehčit více zatížené vedení tím ho vyrovnat. Snížíme tak i ztráty na vedení. Regulace toků pomocí PST se používá i na mezistátních vedeních.

Regulace v energetické soustavě je důležitá pro splnění požadavků na bezpečnost a spolehlivost sítí daných normou. Ať už se jedná o vyrovnání napěťových úbytků pomocí přepínačů odboček nebo odlehčení přetěžovaných sítí pomocí PST ať už se jedná o vnitrostátní regulaci nebo mezistátní regulaci.

Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] LIBRA, Jiří. Elektrická zařízení 3, *Transformátory*. Dostupné z: <http://web.sstzr.cz/download/cat1/elektrotechnika/ez3-transformatory.pdf>
- [2] LIST, Vladimír a Kolektiv. Elektrotechnika III, *Elektrické stroje 2. část*. Praha 1963: Státní nakladatelství technické literatury.
- [3] NOHÁČOVÁ, Lucie. Přednáška z předmětu Elektrické stanice a vedení, *Transformátory 2016*, Západočeská univerzita v Plzni.
- [4] HORA, Oldřich, NAVRÁTIL, Stanislav a Kolektiv. Regulace elektrických strojů, Nakladatelství technické literatury, Praha 1976.
- [5] BERMANN, Jiří. Transformátorová koncepce ČR+SR, *Stále aktuální a potřebná*. Konference ČK CIRED: ABB s.r.o., 2014.
- [6] VÁPENÍK, René. Elektrověue, *Regulace napětí v distribuční soustavě vn a nn*. 2011 Dostupné z <http://www.elektrověue.cz/cz/clanky/energetika--vykonova-elektronika--elektrotechnologie/0/regulace-napeti-v-distribucni-soustave-vn-a-nn/>
- [7] DOLEŽEL, Ivo. Přednáška Hlavní prvky elektrizační soustavy. Dostupné z http://www.powerwiki.cz/attach/PRE/PRE_Dolezel_1.pdf
- [8] NOHÁČ, Karel. Přednáška z předmětu Elektrárny 2.
- [9] TICHÁ, Gabriela. Učební texty pro přípravu personálu JE, ČEZ a.s. 2007
- [10] BERAN, Miloš. Elektrická zařízení tepelných elektráren. Ediční středisko VŠSE, Plzeň 1988.
- [11] GRÜNBAUM, R., NOROOZIAN, M., THORVALDSOSON, B.: FACTS – Powerful Systems for Flexible Power Transmission. *ABB Review*, May 1999.
- [12] PTÁČEK, J.: Regulace toků výkonů v propojených elektrizačních soustavách. Brno, 2004. *FEKT VUT v Brně*. Disertační práce
- [13] ŠVEC, J.: Řízení výkonových toků v elektrizačních soustavách s využitím systémů FACTS. Praha, duben 2009. *ČVUT v Praze*. Disertační práce
- [14] VERBOOMEN, J., a kol.: Phase Shifting Transformers: Principles and Applications, TU Delft, KU Leuven.
- [15] HARLOW, J.H.: Electric power transformer engineering, USA, CRC Press, 2012, ISBN 978-1-4398-5629-1.
- [16] KARSAI, K., KERÉNYI, D., KISS, I., Large Power Transformers, Akadémiai kiadó, Budapešť, 1987
- [17] KAŠPÍREK, Martin, JIŘIČKA, Jan, ŠTĚPKA, Vratislav, VRZAL, Jan, VACULÍK, Petr. *Nasazení a provoz transformátorů vn/nn s regulací pod zatížením*. Konference ČK CIRED: E:ON Česká republika s.r.o. 2013.