

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

KATEDRA ELEKTROENERGETIKY A EKOLOGIE

DIPLOMOVÁ PRÁCE

**Hodnocení provozu transformátorů VN/NN s regulací
napětí pod zatížením**

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická

Akademický rok: 2014/2015

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: Bc. Jan STRUSKA
Osobní číslo: E12N0135P
Studijní program: N2612 Elektrotechnika a informatika
Studijní obor: Jaderná elektroenergetika
Název tématu: Hodnocení provozu transformátorů VN/NN s regulací napětí 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 problematiku zajištění odchylek napětí v distribuční síti NN.
2. Popište dostupné typy regulačních transformátorů VN/NN zejména s ohledem na regulační možnosti a principy regulace napětí pod zatížením.
3. Navrhněte parametrizaci regulačního transformátoru VN/NN ve vybrané lokalitě a analyzujte dopad jeho provozu na odchylky napětí, zhodnoťte a porovnejte jednotlivé varianty nastavení.
4. Navrhněte další teoretické možnosti stabilizace napětí v distribuční NN síti a porovnejte jejich dopad na odchylky napětí s variantou regulačního transformátoru VN/NN.

Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**

Rozsah pracovní zprávy: **30 - 40 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. Miloslava Tesařová, Ph.D.

Katedra elektroenergetiky a ekologie

Datum zadání diplomové práce: **15. října 2014**

Termín odevzdání diplomové práce: **11. května 2015**


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




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

V Plzni dne 15. října 2014

Anotace

Předložená diplomová práce je zaměřena na hodnocení provozu transformátoru VN/NN s regulací napětí pod zatížením. Práce se zabývá regulací napětí vyvolanou přítomností obnovitelných zdrojů elektrické energie, kterých v posledních letech přibývá.

Nejdříve je popsána transformátorová koncepce, která zahrnuje možnosti regulace napětí v přenosové a distribuční síti a vysvětlení smyslu odstupňování odboček jednotlivých transformátorů. Následující krok spočívá v popsání provozních pravidel distribučních sítí a koncepce regulace s přítomností a bez přítomnosti obnovitelných zdrojů energie. Vlivem těchto zdrojů dochází k překračování hodnot napětí v síti NN. Dále jsou popsány prostředky pro zamezení překračování mezních hodnot napětí dané normou ČSN EN 50160. Na případové studii je ukázáno použití transformátoru VN/NN s regulací pod zatížením a jsou navrženy a porovnány různé varianty nastavení jeho parametrů regulace.

Klíčová slova

Distribuční soustava, regulace napětí, odchylka napětí, transformátor s regulací pod zatížením, obnovitelné zdroje energie.

Abstract

The diploma thesis is focused on MV/LV transformers with on-line tap changer (so called OLTC transformers) and the evaluation of their operation. The thesis deals with the voltage regulation in networks with distributed renewable energy sources (RES), whose penetration has been increasing in recent years.

Firstly, there is described transformer concept used in the Czech power system. Possibilities of voltage regulation in the transmission and distribution systems as well as purposes of transformer-tap ratio step for transformation points are mentioned. Further, the distribution networks operating rules and the concepts of voltage regulation in networks with and without RES are described. RES installed in LV networks may result in exceeding of voltage variations. Means for exceeding of voltage variations given by the standard EN 50160 are described. The case study demonstrates the use of an OLTC MV/LV transformer and its effect on voltage quality. Different variants of its regulation parameters are adjusted and their effect on voltage quality is compared.

Key words

Distribution system, voltage regulation, voltage variation, OLTC transformer, renewable energy sources.

Prohlášení

Překládám tímto k posouzení a obhajobě diplomovou práci, zpracovanou na závěr studia na fakultě elektrotechnické Západočeské univerzity v Plzni.

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 6.5.2015

Jan Struska

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu diplomové práce doc. Ing. Miloslavě Tesařové, Ph.D. za cenné profesionální rady při konzultaci, připomínky a metodické vedení práce. Také bych chtěl poděkovat konzultantovi Ing. Martinu Kašpírkovi, Ph.D., ze společnosti E.ON Česká republika, za poskytnutý materiál a cenné rady.

Dále bych chtěl poděkovat společnostem ABB, BEZ, Efacec, Schneider Electric a Reinhausen za poskytnutá data k transformátorům s regulací napětí pod zatížením.

V neposlední řadě bych chtěl poděkovat své rodině za podporu při studiu.

Obsah

OBSAH	8
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	10
SEZNAM OBRÁZKŮ A TABULEK	11
ÚVOD	13
1 TRANSFORMÁTOROVÁ KONCEPCE ES ČR	14
1.1 PARAMETRY TRANSFORMÁTORŮ	15
1.1.1 Transformátory ZVN/VVN a VVN/VVN	15
1.1.2 Transformátor VVN/VN	16
1.1.3 Transformátor VN/NN	17
1.2 KONCEPCE REGULACE NAPĚTÍ ODBOČKAMI TRANSFORMÁTORŮ	18
2 PROVOZOVÁNÍ DISTRIBUČNÍCH SÍTÍ	19
2.1 PRAVIDLA PROVOZOVÁNÍ DISTRIBUČNÍ SÍTĚ	19
2.1.1 Provoz napěťových hladin a možné odchytky napětí	20
2.1.2 Kolísání napětí	21
2.2 KONCEPCE REGULACE NAPĚTÍ S TR 110 kV/VN JAKO POSLEDNÍM REGULAČNÍM PRVKEM POD ZATÍŽENÍM	22
2.2.1 Popis odbočkového TR 110 kV/VN s regulací pod zatížením	22
2.2.2 Způsoby udržení napětí v dovolených mezích v distribučních sítích VN	23
2.2.3 Způsoby udržení napětí v dovolených mezích v distribučních sítích NN	24
2.2.4 Situace TR 110 kV/VN jako posledního prvku regulace napětí pod zatížením	25
2.3 SITUACE PROVOZOVÁNÍ DISTRIBUČNÍCH SÍTÍ S DISTRIBUOVANÝMI ZDROJI	26
2.3.1 Připojování distribuovaných zdrojů do sítě VN	27
2.3.2 Připojování distribuovaných zdrojů do sítě NN	27
3 MOŽNÁ OPATŘENÍ V DISTRIBUČNÍCH SÍTÍCH NN	28
3.1 LINKOVÝ KONDICIONÉR	28
3.2 KOMPENZACE ÚČINÍKU	30
3.3 KABELOVÉ VEDENÍ	30
3.4 REGULAČNÍ DISTRIBUČNÍ TRANSFORMÁTORY VN/NN	31
4 PŘEHLED NABÍZENÝCH REGULAČNÍCH DISTRIBUČNÍCH TRANSFORMÁTORŮ VN/NN S REGULACÍ POD ZATÍŽENÍM	31
4.1 REGULAČNÍ TRANSFORMÁTORY OD FIRMY ABB	32
4.2 REGULAČNÍ TRANSFORMÁTORY OD FIRMY BEZ	33
4.3 REGULAČNÍ TRANSFORMÁTORY OD FIRMY EFACEC	33
4.4 REGULAČNÍ TRANSFORMÁTORY OD FIRMY MAGTECH	33
4.5 REGULAČNÍ TRANSFORMÁTORY OD FIRMY REINHAUSEN	34
4.6 REGULAČNÍ TRANSFORMÁTORY OD FIRMY SCHNEIDER ELECTRIC	35
4.7 REGULAČNÍ TRANSFORMÁTORY OD FIRMY SIEMENS	35
5 PŘÍPADOVÁ STUDIE – POUŽITÍ REGULAČNÍHO DISTRIBUČNÍHO TRANSFORMÁTORU VN/NN A NASTAVENÍ JEHO REGULAČNÍCH PARAMETRŮ	36
5.1 POPIS ŘEŠENÉ SÍTĚ	37
5.2 SIMULACE NAPĚŤOVÝCH POMĚRŮ V SÍTI VN A NN	39
5.3 ANALÝZA POSKYTNUTÝCH HODNOT	44

5.4	NASTAVENÍ PARAMETRŮ DISTRIBUČNÍHO TRANSFORMÁTORU VN/NN S REGULACÍ NAPĚTÍ POD ZATÍŽENÍM.....	46
5.4.1	<i>Kritéria návrhu parametrů DRTR 22/0,4 kV</i>	49
5.4.2	<i>Navržené parametry DRTR 22/0,4 kV</i>	49
5.5	HODNOCENÍ PROVOZU DRTR 22/0,4 kV	50
5.5.1	<i>Provoz DTR s pevně nastavenou odbočkou</i>	51
5.5.2	<i>Provoz DRTR - nastavení parametrů regulace podle varianty 1</i>	51
5.5.3	<i>Provoz DRTR - nastavení parametrů regulace podle varianty 2</i>	53
5.5.4	<i>Provoz DRTR - Celkové vyhodnocení nastavených variant</i>	53
	ZÁVĚR	55
	SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ	57
	PŘÍLOHA A POROVNÁNÍ HODNOT REGULAČNÍCH TRANSFORMÁTORŮ PRO VÝKON 630 KVA.	1
	PŘÍLOHA B ZJEDNODUŠENÍ DISTRIBUČNÍ SÍTĚ VN A NN	2
	PŘÍLOHA C TABULKY TRANSFORMÁTOROVÝCH STUPŇŮ	7

Seznam symbolů a zkratek

<i>ČEPS</i>	Provozovatel přenosové soustavy v ČR
<i>ČSN</i>	Česká technická norma
<i>DS</i>	Distribuční soustava
<i>DTR</i>	Distribuční transformátor VN/NN (22/0,4 kV)
<i>DRTR</i>	Distribuční regulační transformátor s přepínáním odboček při zatížení
<i>DZ</i>	Distribuované zdroje
<i>EN</i>	Evropská norma
<i>E.ON</i>	Provozovatel lokální distribuční soustavy
<i>ERÚ</i>	Energetický regulační úřad
<i>ES</i>	Elektrická soustava
<i>FVE</i>	Fotovoltaická elektrárna
<i>HRT</i>	Automatický hladinový regulátor napětí
I_N	Jmenovitá hodnota proudu [A, popř.kA]
<i>NN</i>	Nízké napětí
<i>OZE</i>	Obnovitelné zdroje energie
P_{lt}	Dlouhodobá míra vjemu flikru
<i>PPDS</i>	Pravidla provozování distribuční soustavy
<i>PS</i>	Přenosová soustava
P_{st}	Krátkodobá míra vjemu flikru
<i>TR</i>	Transformátor
U_N	Jmenovitá hodnota napětí [V, popř.kV]
<i>VN</i>	Vysoké napětí
<i>VTE</i>	Větrná elektrárna
<i>VVN</i>	Velmi vysoké napětí
<i>ZVN</i>	Zvlášť vysoké napětí

Seznam obrázků a tabulek

Obrázek 1.1 Transformátorová koncepce ČR+SR. [1]	14
Obrázek 1.2 Velké síťové transformátory 400/220 kV. [1]	16
Obrázek 1.3 Velké síťové transformátory 400(220)/110 kV. [1].....	16
Obrázek 1.4 Síťové transformátory 110/22 kV. [1].....	17
Obrázek 1.5 Transformátory velkých továren, společných vlastních spotřeb elektráren a tepláren. [1]	17
Obrázek 1.6 Transformátory VN/NN (0,4kV): síťové, průmyslové, společných vlastních spotřeb elektráren. [1].....	18
Obrázek 1.7 Velikost napěťových regulačních stupňů transformátorů v soustavě s příslušnými časy jejich regulací. [1]	19
Tabulka 2.1 Odchytky napětí v distribučních sítích. [6]	20
Obrázek 2.2 Velikost a odchytky napětí NN. [6].....	21
Obrázek 2.3 Princip regulace proudové kompaundace. [6]	23
Obrázek 2.4 Regulace na konstantní napětí. [6].....	23
Obrázek 2.5 Regulace napětí na proměnlivé zatížení. [6].....	24
Obrázek 2.6 Možnosti volby odbočky transformátoru VN/NN. [9]	25
Obrázek 2.7 Distribuční síť napájená z přenosové soustavy. [11].....	26
Obrázek 2.8 Napěťové nůžky na hladině VN. [6].....	27
Obrázek 2.9 Napěťové nůžky na hladině NN. [10].....	28
Obrázek 3.1 Principiální schéma linkového kondicionéru. [14].....	29
Obrázek 3.2 Reakce na dynamickou změnu napětí. [14].....	30
Obrázek 4.1 Regulační transformátor ABB. [18]	32
Obrázek 4.2 Regulační transformátor Magtech. [18].....	34
Obrázek 4.3 Regulační transformátor Reinhausen. [18]	34
Obrázek 4.4 Regulační transformátor Schneider Electric. [18]	35
Obrázek 4.5 Regulační transformátor Siemens. [11]	36
Obrázek 5.1 Síť VN - napájení Drahan.....	38

Obrázek 5.2 Síť NN - napájení Drahan.....	38
Obrázek 5.3 Analýza průměrného zatížení DTR za období 2007/2011. [20].....	39
Obrázek 5.4 Zjednodušená síť metodou The WECC equivalencing. [21].....	40
Obrázek 5.5 Příklad zjednodušené sítě metodou The WECC equivalencing. [21].....	41
Obrázek 5.6 Zjednodušená síť VN a NN - napájení Drahan.....	42
Obrázek 5.7 Nasimulované napět'ové nůžky - napájení Drahan.....	43
Obrázek 5.8 Napětí v síti VN ve sledovaném období v září 2014.....	45
Obrázek 5.9 Napětí v síti NN ve sledovaném období v září 2014.....	45
Tabulka 5.10 Manuální nastavení parametrů regulace DRTR. [26]	47
Tabulka 5.11 Přepočítání hranic pro přepínání v procentech. [26].....	48
Obrázek 5.12 Napět'ová chyba v závislosti na procházejícím činném výkonu. [26]	48
Tabulka 5.13 Mnou navržené parametry DRTR 22/0,4 kV	50
Tabulka 5.14 Výsledky hodnocení P_{It} se standardním DTR.	51
Tabulka 5.15 Výsledky hodnocení P_{It} s DRTR varianta 1.	51
Tabulka 5.16 Výsledky hodnocení P_{It} DRTR s variantou 1, rozdíly přepnutí.	52
Obrázek 5.17 Přepnutí snižující odbočky na DRTR, pořizeno z kvalimetru dne 29.3.2015 v 20:50 hodin.	52
Tabulka 5.18 Výsledky hodnocení P_{It} s DRTR varianty 2.....	53
Tabulka 5.19 Závěrečné srovnání P_{It}	54
Tabulka 5.20 Závěrečné srovnání počtu přepnutí odboček.....	54
Tabulka A.1 Porovnání hodnot regulačních transformátorů pro výkon 630 kVA.....	1
Tabulka B.1 Seznam prvků v síti VN (výpis z programu E-vlivy).....	2
Tabulka B.2 Seznam prvků v síti NN (výpis z programu E-vlivy).....	4
Tabulka B.3 Seznam prvků ve zjednodušené síti VN a NN (výpis z programu E-vlivy).	6
Tabulka C.1 Hodnoty pro transformátorový stupeň 3 %.	7
Tabulka C.2 Hodnoty pro transformátorový stupeň 3,5 %.	8
Tabulka C.3 Hodnoty pro transformátorový stupeň 4 %.	9

Úvod

Diplomová práce se zabývá hodnocením provozu regulace napětí distribučním transformátorem VN/NN pod zatížením v síti NN. Toto téma nabývá významu v souvislosti s rostoucím množstvím obnovitelných zdrojů, především fotovoltaických elektráren. Tento růst je spojen se zvýšením pozornosti provozovatele distribučních soustav, kteří musí zajistit dodržení kvality napětí stanovené normou ČSN EN 50160.

V první kapitole jsou popsána používaná zapojení transformátorů v elektrizační soustavě s jejich regulačními rozsahy napětí a regulačními kroky dle jednotlivých napěťových hladin, které mají určité odstupňování.

Druhá kapitola se zabývá pravidly provozování distribučních sítí, ve kterých často dochází k přepětí či nadměrnému kolísání napětí vlivem přítomnosti obnovitelných zdrojů energie. Dále je v této části popsána možnost provozu regulace transformátorů VVN/VN bez přítomnosti a s přítomností vnořených zdrojů v sítích VN a NN.

Třetí kapitola pojednává o možných opatřeních k udržení napětí ve stanovených mezích v distribučních sítích za přítomnosti distribuovaných zdrojů.

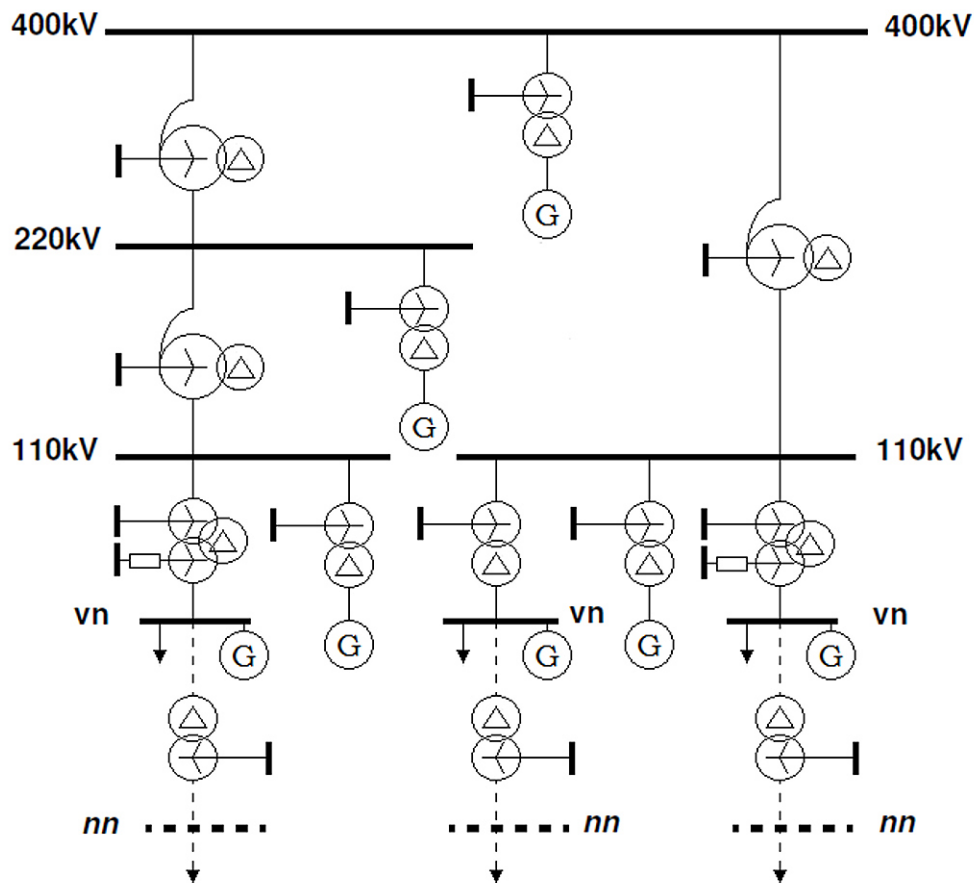
Ve čtvrté kapitole jsou shrnuti výrobci a představeny nabízené distribuční transformátory VN/NN s regulací napětí pod zatížením.

V případové studii je popsána řešená síť, ve které dochází k překračování mezí kvality napětí dle stanovené normy. V řešené síti VN a NN jsou nasimulovány napěťové nůžky, které mohou nastat během dne. Dále navazuje analýza poskytnutých hodnot, která poukazuje na pravdivost řešené simulace a na možné situace, které během dne nastávají za přítomnosti FVE a VTE. Dále jsou dle návodu výrobce představeny důležité parametry pro nastavení DRTR. V dalším kroku jsou využity poznatky ze simulace, analýzy poskytnutých hodnot a návodu výrobce pro návrh sad regulačních parametrů, pomocí kterých jsou následně navrženy varianty pro nastavení na DRTR. Hodnotící kritéria pro jednotlivé varianty DRTR se skládají z počtu přepnutí odboček a kolísání napětí. Popsaná hodnotící kritéria jsou následně aplikována na výsledky zaznamenaných měření jednotlivých variant DRTR a získané výsledky jsou mezi sebou porovnány s ohledem na stav se standardním transformátorem.

Výsledkem případové studie je nalézt vhodné nastavení parametrů regulace na DRTR pro řešenou síť NN a poskytnout výsledky měření pro další zlepšení nastavovaných parametrů.

1 Transformátorová koncepce ES ČR

Původ transformátorové koncepce může sahát až do počátku elektrizace, ale hlavní myšlenka se vyvinula někdy kolem 2. světové války. Na vzdory změně století tato koncepce zůstává stejná. Stále je kladen důraz na výběr vhodného transformátoru do stávající sítě, který zajistí její stabilní provoz.



Obrázek 1.1 Transformátorová koncepce ČR+SR. [1]

Transformátory určují zcela základní uspořádání sítí, které stanovují především jmenovitá napětí jednotlivých síťových hladin, ale také jejich způsob zemnění, hodinové úhly mezi nimi a další vlastnosti. Účelným řazením transformátorů jsou dány možnosti propojování sítí ve velké celky, které se mohou zastupovat navzájem. Tím se tento celek stává stabilní a spolehlivý s minimem ztrát.

Základní vlastnosti elektrizačních soustav (ES):

- stejná jmenovitá napětí,
- stejné zemnění v každé napěťové hladině,

- stejné umístění trojúhelníků transformátorů vůči transformovaným napět'ovým hladinám,
- stejné regulační stupně transformátorů v odpovídající transformaci daných napět'ových hladin,
- stejná napětí nakrátko transformátorů v odpovídající transformaci daných napět'ových hladin,
- stejné hodinové úhly transformátorů v odpovídající transformaci daných napět'ových hladin. [1]

1.1 Parametry transformátorů

1.1.1 Transformátory ZVN/VVN a VVN/VVN

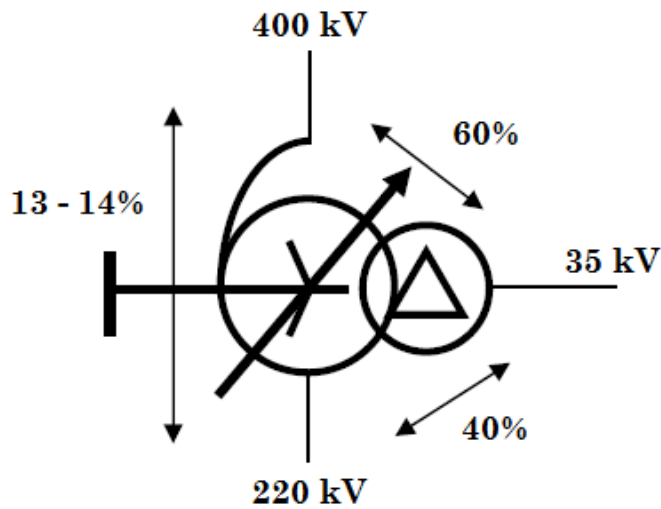
Transformátory ZVN/VVN a VVN/VVN jsou řešeny jako autotransformátory z důvodu stejného provozu sítí ZVN (400 kV) a VVN (220 kV a 110 kV) a relativně malého transformačního poměru (ideálně blízky 1).

Autotransformátor je provozován jako elektrický transformátor pouze s jedním vinutím, tedy primární i sekundární strana sdílí společné vinutí. Oproti běžnému transformátoru jsou autotransformátory menší, lehčí, ale hlavně levnější a úspornější.

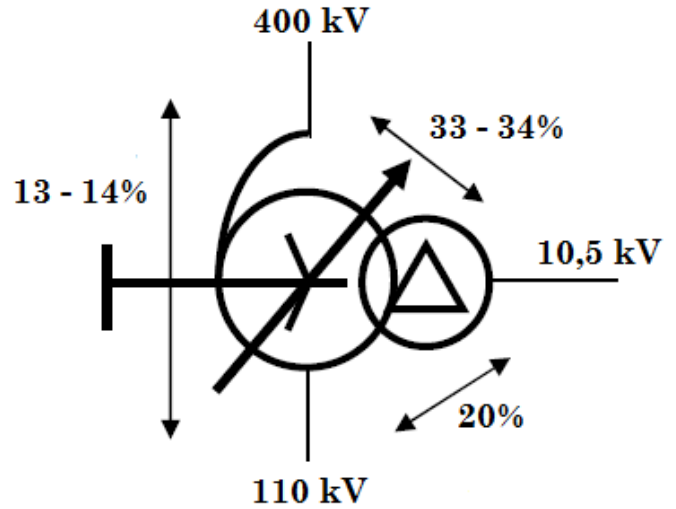
Naopak nevýhoda autotransformátoru je galvanické spojení vstupní a výstupní strany, což znamená, že při náhodném přerušení vinutí se na výstupní stranu dostane plné vstupní napětí. Proto se nemůže rovnocenně využít jako normální transformátor pro napět'ové hladiny VN/NN, který obě strany galvanicky oddělí. [2]

Terciární vinutí zapojené do trojúhelníka je zde použito hned z několika potenciálních důvodů, především slouží jako vyrovnávací vinutí, které potlačuje vliv nesymetrického zatížení či poruch.

Terciární vinutí je navrženo pro hladinu napětí 10-36 kV s možností dodávky elektrické energie do sítě, napájení vlastní spotřeby nebo i pro připojení rotačního kompenzátoru či kompenzační tlumivky, kterou je taktéž možné připojit přímo k síti. Úkolem kompenzační tlumivky je kompenzace nadbytečného kapacitního výkonu. Zpravidla se terciární vinutí dimenzuje na třetinový výkon autotransformátoru, což odpovídá maximálnímu proudu pro jednopólový zkrat.



Obrázek 1.2 Velké síťové transformátory 400/220 kV. [1]



Obrázek 1.3 Velké síťové transformátory 400(220)/110 kV. [1]

Poměrná napětí nakrátko u autotransformátoru 400/220 kV jsou skoro dvojnásobné oproti transformátorům 400/110 kV. Toto rozložení je z důvodu omezení zkratových proudů.

Autotransformátory se používají k plynulé regulaci napětí pod zatížením, ale nutností je obstarávat takové autotransformátory s koncepčně dobře postavenými regulačními stupni.

U transformátorů (TR) 400/220 kV je regulace na nižší straně (220 kV) u uzlu vinutí, regulační rozsah transformátoru je 23 odboček po kroku přibližně 1,14 % nebo 21 odboček po kroku přibližně 0,87 %. U těchto transformátorů je regulace jemnější než u transformátorů ZVN(VVN)/110 kV (kde se pohybuje kolem 1,45 %), protože jde o vyšší provozní hladinu napětí, kde se nehodí poměrná změna napětí, ale spíše absolutní změna napětí.

TR 400(220)/110 kV mají regulaci i zde na nižší straně (110 kV) u uzlu vinutí, regulační rozsah transformátoru je 19 odboček po kroku přibližně 1,45 %. [1]

Používané výkony TR 400/220 kV jsou 400 MVA, TR 400/110 kV jsou 250 a 350 MVA a TR 220/110 kV je 200 MVA. [27]

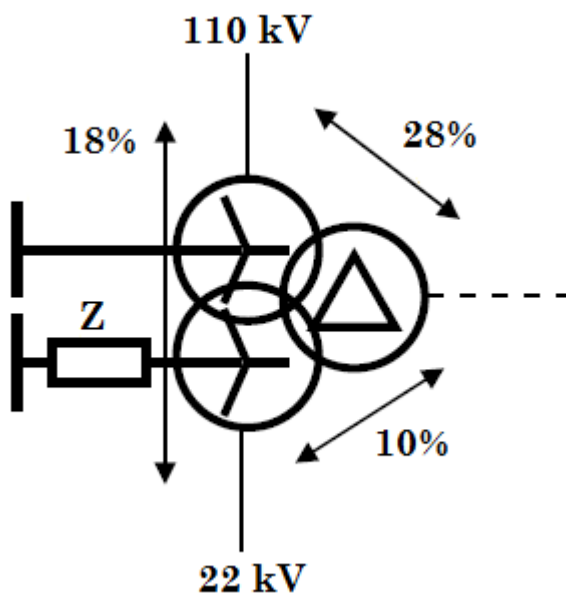
1.1.2 Transformátor VVN/VN

Konstrukce transformátorů VVN/VN je odlišná z důvodů provozování sítě VN jako izolované sítě, kde vinutí do trojúhelníku je zapojené na sekundární straně (Obrázek 1.5), nebo jako neúčinně uzemněné sítě, kde uzel sekundárního vinutí je uzemněn přes tlumivku či odpor (Obrázek 1.4).

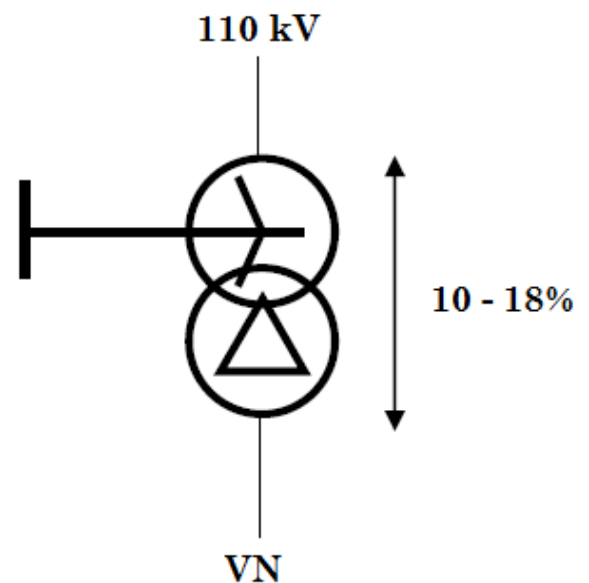
Výhodnost zapojení trojúhelníku a funkce terciárního vinutí je stejná jako u transformátorů ZVN/VVN.

U transformátorů VVN/VN lze provádět regulaci napětí při zatížení, regulace se nachází na vyšší straně (110 kV), regulační rozsah je 17 odboček po kroku 2 %. Transformátory jsou vybaveny automatickými hladinovými regulátory napětí, který z důvodu nároků na přepínač odboček nemá přesáhnout 25 přepnutí denně. Možnosti provozování těchto transformátorů budou ukázány v kapitole 2.2.1. [1]

Řada používaných výkonů transformátorů 110 kV/VN je 10, 16, 25, 40, 63 MVA. [28]



Obrázek 1.4 Síťové transformátory 110/22 kV. [1]

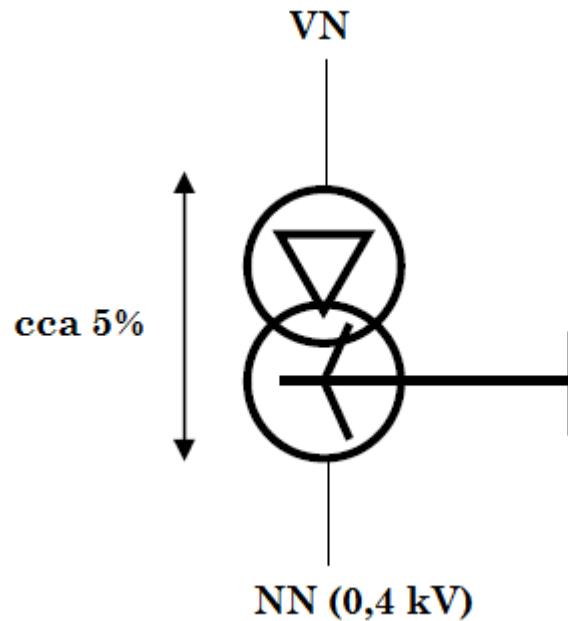


Obrázek 1.5 Transformátory velkých továren, společných vlastních spotřeb elektráren a tepláren. [1]

1.1.3 Transformátor VN/NN

Transformátory VN/NN (Obrázek 1.6) mají regulaci napětí bez zatížení, regulace se nachází na vyšší straně (22 kV) u uzlu vinutí. U dříve vyráběných transformátorů je převod napětí 22/0,4 kV se 3 odbočkami po kroku 5 %, novější stroje mají regulační rozsah 5 odboček po kroku 2,5 %. Možnosti provozování těchto transformátorů budou ukázány v kapitole 2.2.3. [3]

Výkonová řada transformátoru VN/NN je 160, 250, 400, 630, 1000, 1250, 1600 a 2500 kVA. [28]



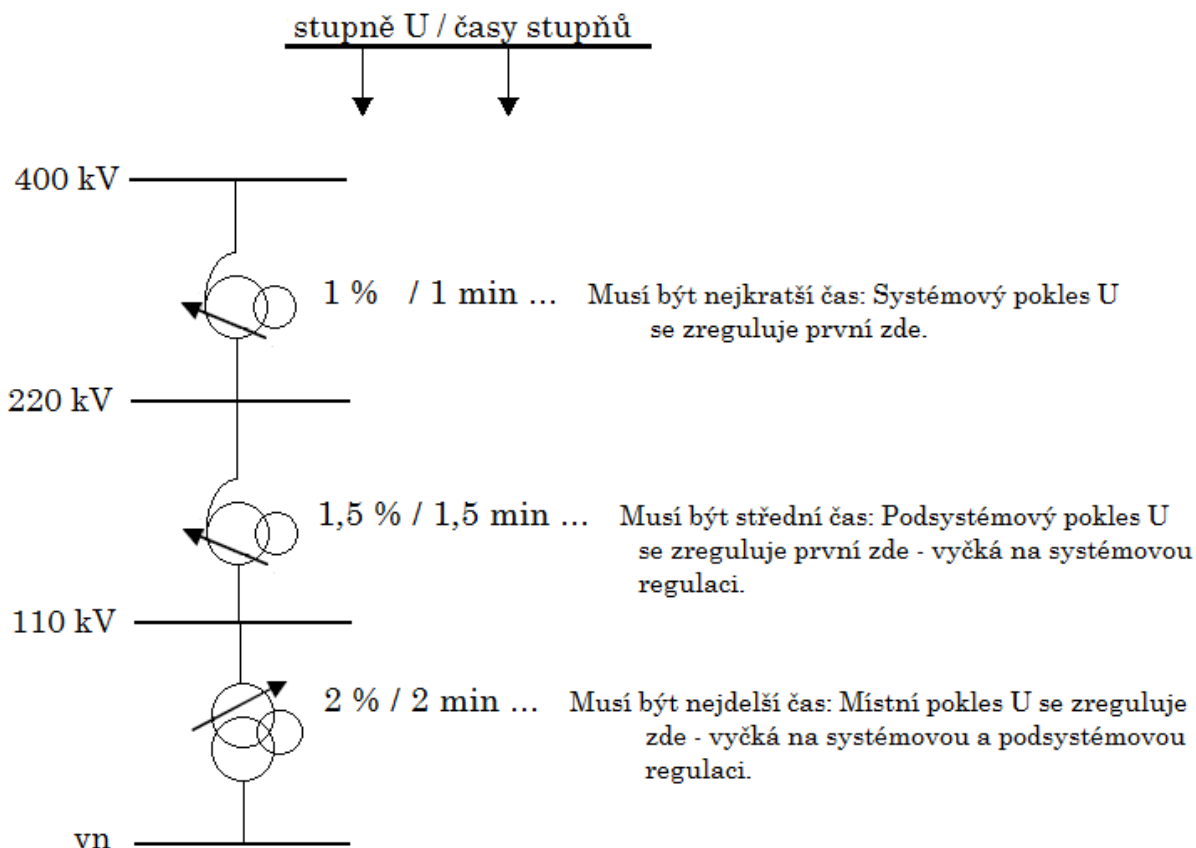
Obrázek 1.6 Transformátory VN/NN (0,4kV): síťové, průmyslové, společných vlastních spotřeb elektráren. [1]

1.2 Koncepce regulace napětí odbočkami transformátorů

V této kapitole bude ukázán smysl odstupňování velikostí odboček jednotlivých transformátorů, které byly zmíněny v kapitole 1.1.

Velikost stupně napětí se zmenšuje směrem k vyšším hladinám napětí po velikosti kroku přibližně 0,5 %. Tato velikost je stanovena proto, aby se regulace horní hladiny napětí usadila mezi stupně hladiny dolní a tím nedošlo ke zpětné regulaci dolní hladiny, na kterou by opět reagovala hladina horní – nedošlo ke kmitání regulace.

Časy regulace stupně se zmenšují směrem k vyšším napěťovým hladinám. Tato regulace se provádí proto, aby rozsáhlejší (tj. systémovější) celky pokles zregulovaly nejprve systémovější (vyšší) transformátory a nedocházelo tak ke kmitání celku regulace. [1]



Obrázek 1.7 Velikost napěťových regulačních stupňů transformátorů v soustavě s příslušnými časy jejich regulací. [1]

2 Provozování distribučních sítí

Provozování distribučních sítí (DS) je věcí, která se dotýká nás všech, protože všechny spotřebiče, které nás obklopují v domácnostech nebo v kancelářích, pracují především na úrovni nízkého napětí. Vždy když se něco provozuje, musí se stanovit jasná pravidla, která musí provozovatelé distribučních sítí dodržovat, aby provoz byl pro spotřebitele bezproblémový.

2.1 Pravidla provozování distribuční sítě

Část pravidel provozování distribučních soustav (PPDS) mají původ z Energetického zákona 458/2000 Sb. a z vyhlášky Energetického regulačního úřadu (ERÚ) č.540/2005 Sb., která definuje kvalitu dodávek elektrické energie se stanovenými parametry napětí a podmínkami jejich dodržování. Cílem PPDS je jasná definice kvality napětí, která vychází ze standardů kvality dodávek a s nimi souvisejících služeb v elektroenergetice. Tato definice stanovuje parametry závazné nebo doporučené pro uživatele DS, dále stanovuje zjišťování

a způsob uplatňování jednotlivých parametrů kvality uvedených ve smlouvách o distribuci elektřiny. [4]

Kvalita elektrické energie je udávána provozními hodnotami, které musí být garantovány provozovatelem sítě za normálního stavu distribuční soustavy. V sítích se vyhodnocují tyto kvalitativní parametry:

1) Průběžné jevy

- kmitočet sítě,
- velikost napájecího napětí,
- odchylky napájecího napětí,
- rychlé změny napětí,
- nesymetrie napájecího napětí,
- harmonická napětí,
- meziharmonická napětí,
- úroveň napětí signálů v napájecím napětí.

2) Napěťové jevy

- přerušení napájecího napětí,
- poklesy/dočasné zvýšení napájecího napětí,
- dočasná zvýšení napětí.

Pro jednoduchost budou vybrána základní a nejdůležitější kritéria, kterými jsou odchylky napětí od jmenovité hodnoty a kolísání napětí. [5]

2.1.1 Provoz napěťových hladin a možné odchylky napětí

Napěťové hladiny provozující se v DS jsou:

- VVN (110 kV),
- VN (22 kV, popř. 35 či 10 kV),
- NN (0,4 kV).

Za normálních provozních podmínek, tj. doba bez přerušení dodávky, jsou odchylky naznačené v následující Tabulce 2.1.

Tabulka 2.1 Odchylky napětí v distribučních sítích. [6]

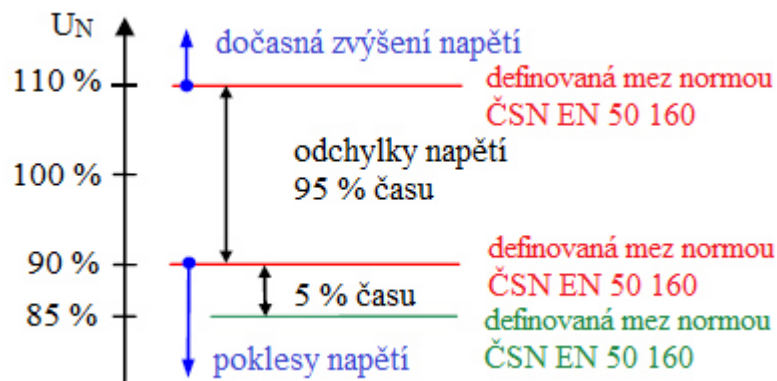
označení napětí	NN	VN		VVN
jmenovité napětí [kV]	0,4	22	35	110
dovolené odchylky [%]	±10	±10	±10	±10

Tento stav nemusí zcela platit u hladin NN a VN, není-li elektrické napájení v sítích připojené k přenosové soustavě (PS) nebo pro speciálně dálkově ovládané uživatele. Potom odchylky napájecího napětí nemají přesáhnout meze $+10\%$ a -15% jmenovitého napětí (U_N). Odchylky jsou vyhodnocovány minimálně týdenním měřením, kde se zjišťuje průměrná efektivní hodnota napětí v intervalu 10 minut. Tyto situace podrobně probírá norma ČSN EN 50 160, která říká, že :

- Na hladině NN musí být během každého týdne 95 % naměřených hodnot v intervalu $\pm 10\% U_N$. Zbýlých 5 % může být mimo interval, např. z důvodu napájení dlouhých vedení NN nebo časovým zpožděním regulačního transformátoru.

- Na hladině VN musí být během každého týdne 99 % naměřených hodnot v intervalu $\pm 10\% U_N$. Zbýlé 1 % může být mimo interval z podobného důvodu jako na hladinách NN.

- Na hladině VVN není udán žádný limit mimo interval, takže platí 100 % naměřených hodnot musí být v intervalu $\pm 10\% U_N$. [5], [6]



Obrázek 2.2 Velikost a odchylky napětí NN. [6]

2.1.2 Kolísání napětí

Kolísání je způsobeno velikostí rychlých změn napájecího napětí, které jsou především dány změnami zátěže či spínáním v síti a v neposlední řadě i možnou poruchou v síti. Kolísání napětí je zřejmě především u citlivých spotřebičů, například změnou světelného toku neboli problikávání žárovky. Tento jev má zásadní vliv na narušování lidského vnímání, kterým lze ovlivnit pracovní nasazení.

Kolísání napětí je hodnoceno mírou vjemu flikru P, která se dále dělí na krátkodobou P_{st} , kdy se je jedna hodnota získává po dobu každých 10 minut, a dlouhodobou P_{lt} , kdy se jedna hodnota získává po dobu každých 2 hodin. Flikr jako parametr kvality se vyjadřuje pomocí P_{st} a nebo P_{lt} , které se odvozuje ze dvanácti po sobě jdoucích skupin hodnot P_{st} .

Míra vjemu flikru musí být za normálních podmínek 95 % času hodnocena jako dlouhodobá míra vjemu flikru vždy menší nebo v krajním případě rovna 1.

S ohledem na citlivá zařízení při rychlých změnách napětí je potřeba udržovat provozovatelem DS tyto velikosti změn. Rychlé změny napětí se považují za změny efektivní, kdy hodnoty napětí základního síťového kmitočtu trvají několik period. [5], [7]

2.2 Koncepce regulace napětí s TR 110 kV/VN jako posledním regulačním prvkem pod zatížením

Při výstavbě DS se zcela jednoznačně uvažoval směr toku elektrické energie z vyšších hladin, kam jsou připojené velké zdroje, do nižších hladin, kde se elektrická energie spotřebovává. Možností poslední regulace se změnou odbočky pod zatížením je TR 110 kV/VN. V následujících podkapitolách budou ukázány možné způsoby provozu sítí. [6]

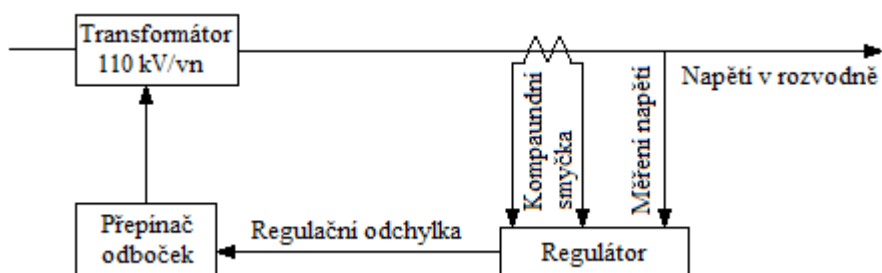
2.2.1 Popis odbočkového TR 110 kV/VN s regulací pod zatížením

U těchto transformátorů se dle dodržení transformátorové koncepce jedná o regulační rozsah $110 \text{ kV} \pm 8 \times 2 \% / \text{VN}$ nebo $\pm 8 \times 1,7 \% / \text{VN}$.

Tento transformátor lze provozovat podle způsobu regulace na konstantní napětí či s proudovou kompaundací, kde navíc kompaundní smyčka dává informaci o protékajícím proudu (zatížení). Oba dva způsoby hlídají měřené napětí v určitých mezích pomocí automatického hladinového regulátoru napětí (HRT), který udržuje stabilitu systému pomocí časového zpoždění regulace a necitlivostí regulátoru. Regulace na konstantní napětí stejně jako regulace s proudovou kompaundací umožňuje zvýšit napětí na sekundární straně transformátoru při vyšším zatížení. Tím se eliminuje zvýšení úbytků v síti VN, a tím i na konci delších vedení se dosáhne potřebného rozmezí napětí.

Hlavní parametry TR 110 kV/VN:

- hladina napětí U_Z [%] 105 % regulace na konstantní napětí
97 % regulace s kompaundací
- proudová kompaundace Δ [%] 0 % - regulace na konstantní napětí
11 % - regulace s kompaundací
- necitlivost regulátoru N [%] cca 2,5 % U_N (větší než regulační krok)
- časové zpoždění regulace T [s] cca 5 minut \rightarrow 25 přepnutí denně



Obrázek 2.3 Princip regulace proudové kompaundace. [6]

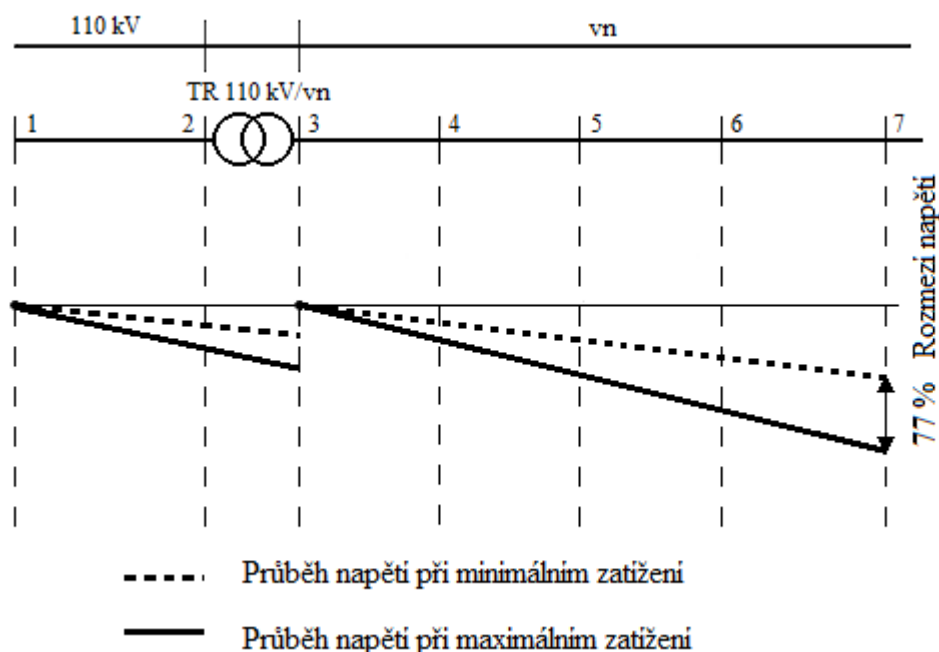
Necitlivost regulátoru musí být větší než regulační krok, čímž se zabrání zbytečnému několikanásobnému přepnutí, které vyvolá jen krátkodobá změna. [6], [8]

2.2.2 Způsoby udržení napětí v dovolených mezích v distribučních sítích VN

Pro další úvahy bude uvažováno konstantní napětí na výstupu z TR 400(220)/110 kV, které je považováno za předávací místo pro distributory v České republice.

REGULACE NAPĚTÍ TR 110 kV/VN NA STÁLÉ NAPĚTÍ

Konstantní napětí se uvažuje na začátku sítě v bodě 3, který je vstupní bod do sítě VN, což je vývod z TR 110 kV/VN.

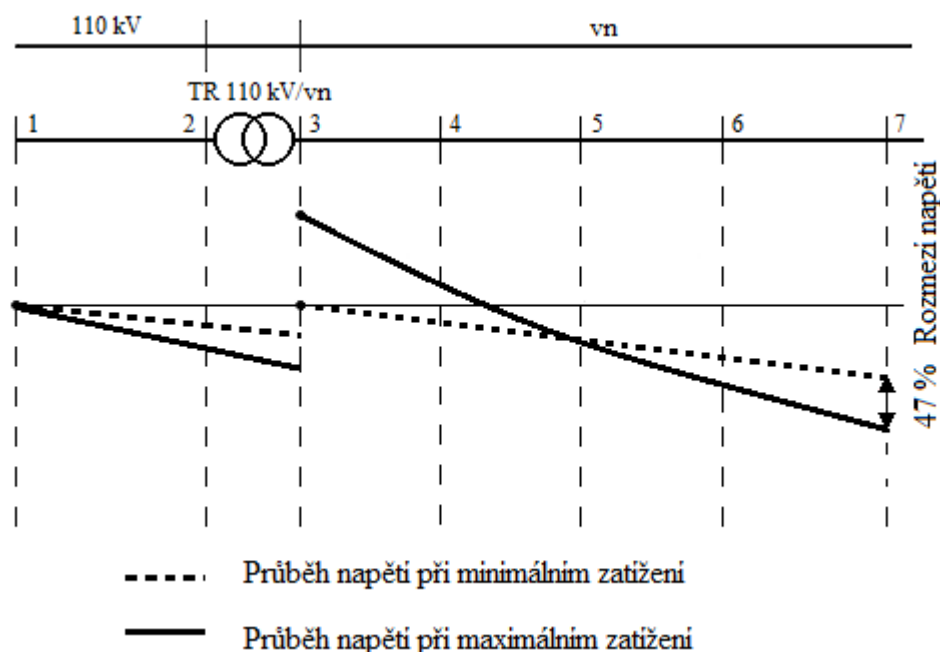


Obrázek 2.4 Regulace na konstantní napětí. [6]

Regulací TR 110 kV/VN se reguluje na dorovnání úbytku napětí v síti VVN a úbytku na transformátoru. [6]

REGULACE NAPĚTÍ TR 110 kV/VN NA PROMĚNLIVÉ NAPĚTÍ

Při použití kompaundní regulace je snaha o udržení stálého napětí například v bodě 5, který je fiktivní bod v polovině sítě VN, což zaručí nejmenší kolísání napětí z možných případů. [6]



Obrázek 2.5 Regulace napětí na proměnlivé zatížení. [6]

2.2.3 Způsoby udržení napětí v dovolených mezích v distribučních sítích NN

Pro další úvahy bude uvažována regulace na konstantní napětí, která se ve velké míře užívá distributory v České republice.

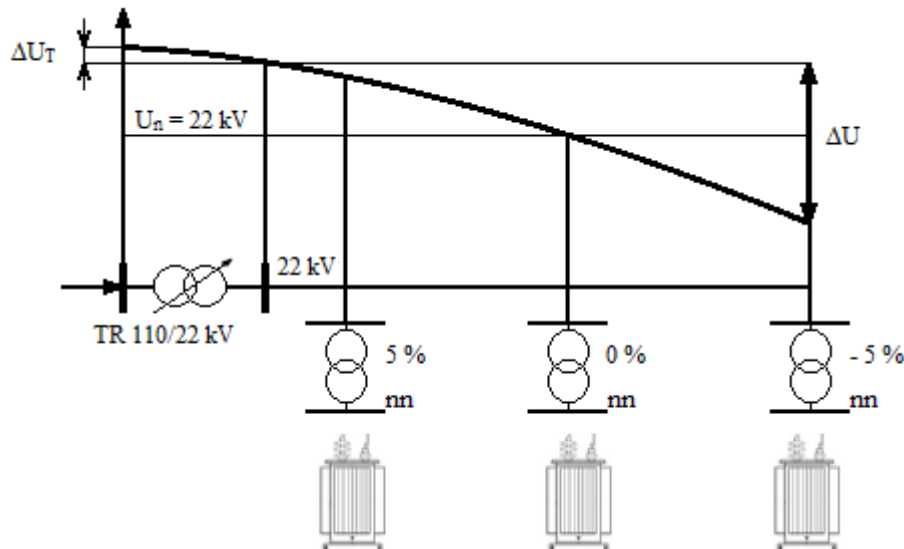
POPIS DISTRIBUČNÍHO TR VN/NN REGULOVATELNÉHO BEZ ZATÍŽENÍ

Distribuční transformátory VN/NN (DTR) jsou konstruované jako regulovatelné transformátory bez zatížení, je tedy nutné při přepínání odbočky odepnout zátěž a pevně přenastavit odbočku. Regulační rozsah těchto transformátorů je $VN \pm 2 \times 2,5 \% / NN$ nebo u starších transformátorů je možné se setkat s $VN \pm 5 \% / NN$. Nastavená odbočka se mění několikrát ročně, například změna zimní–letní období, kdy se v zimním období počítá nárůst spotřeby elektrické energie. Stanovená odbočka musí vydržet napětí v mezích, jakmile neodpovídá, musí být ručně přepnuta. Distributoři se v elektrických sítích bez vnořených obnovitelných zdrojů energie (OZE) setkávají častěji s podpětím, proto se začaly používat

transformátory VN/NN s jmenovitým převodem VN/0,42 kV místo starších VN/0,4 kV, čímž se zvýšilo napětí na koncích vývodů. [6]

MOŽNOSTI NASTAVENÍ DTR VN/NN DLE UMÍSTĚNÍ OD TRANSFORMOVNY

DTR se nastavuje pevně dle vzdálenosti (úbytku napětí) od transformovny 110 kV/VN, kde tato odbočka musí vyhovovat jak minimálnímu, tak i maximálnímu zatížení.

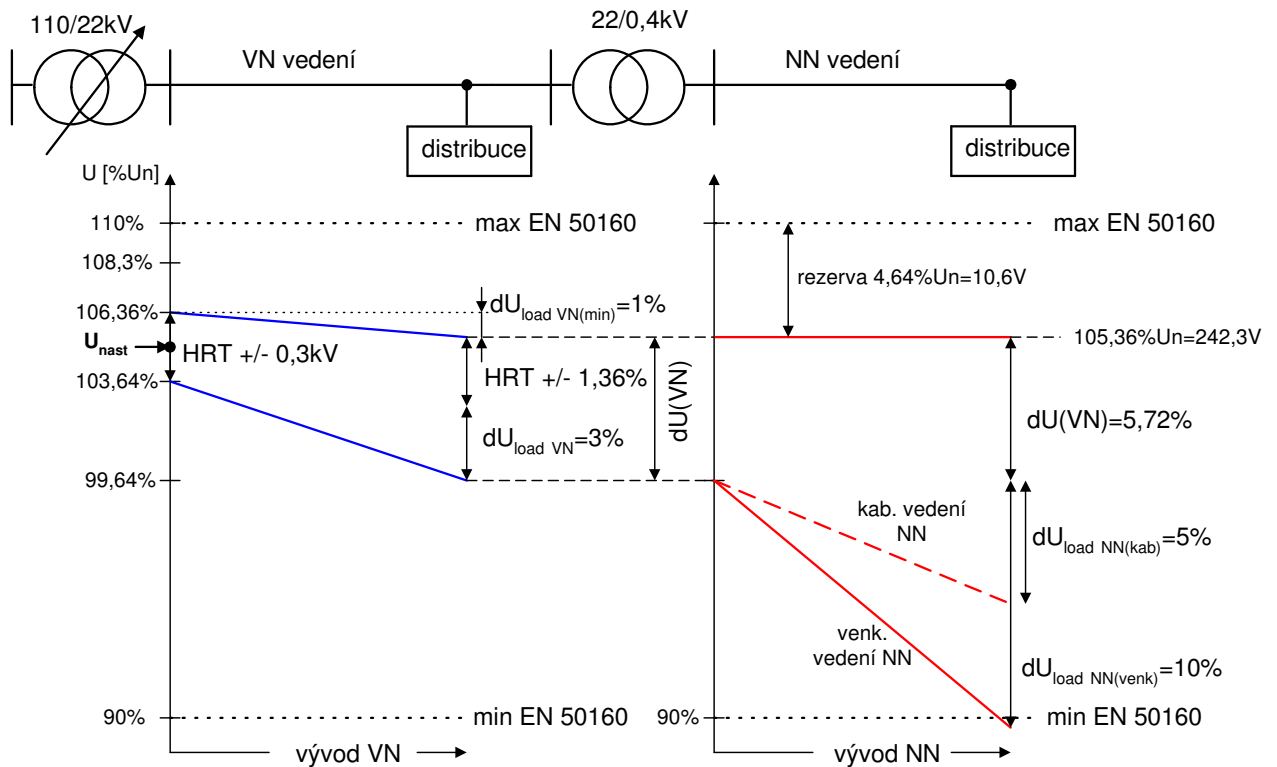


Obrázek 2.6 Možnosti volby odbočky transformátoru VN/NN. [9]

Na Obrázku 2.6 je vidět, že odbočka na DTR 5 % se používá ve stanicích blízko TR 110 kV/VN, čímž snižuje potřebné napětí na vývodu NN. Naopak odbočka -5 % je hojně využívána na koncích vývodů VN, kde je překročen úbytek napětí a tímto DTR se zvýší napětí v síti NN a tudíž nedojde k podpětí v síti NN. Transformátorová odbočka 0 % je využívána pro optimální úbytek napětí v síti VN, kde není potřeba zvyšovat ani snižovat napětí do sítě NN (střed vývodu). [6]

2.2.4 Situace TR 110 kV/VN jako posledního prvku regulace napětí pod zatížením

Bude ukázána charakteristika (Obrázek 2.7), která je obvyklá pro distribuční síť, do kterých je dodávána elektrická energie z PS. TR 110/22 kV je regulován na konstantní napětí 23,1 kV (105 % U_N) z důvodu předpokládaného úbytku napětí. Na DTR je pevně nastavená odbočka 0 %, která z důvodu podpětí nevyhovuje pro venkovní síť NN. Rezerva k horní mezi je 10,6V.



Obrázek 2.7 Distribuční síť napájená z přenosové soustavy. [11]

Úbytek na DTR je pro jednoduchost zanedbán.

Po přeprnutí zvyšující odbočky -2,5 % se napěťová rezerva zmenší na hodnotu 4,9V.

V případě regulace TR 110/22 kV na konstantní napětí 22,8 kV (103,64 % U_N) tato rezerva k hornímu pásnu při odbočce 0 % je 14,1V a po přeprnutí odbočky -2,5 % je 8,4V.

[6], [11]

2.3 Situace provozování distribučních sítí s distribuovanými zdroji

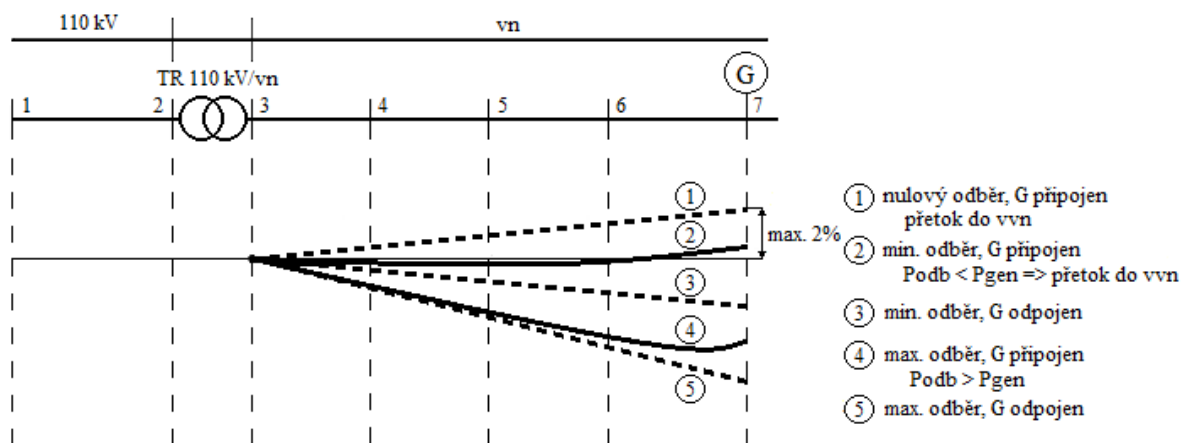
V předchozí kapitole bylo názorně ukázané chování napětí v DS, které jsou napájené především z PS.

V této kapitole bude ukázán stoupající trend posledních let v připojování OZE do DS, což se podepisuje nepříznivým vlivem na síť NN. Tyto síť pod vlivem těchto trendů překračují jednotlivé limity kvality napětí stanovené normou ČSN EN 50160. Zejména se mluví o výskytu přepětí či nadměrném kolísání napětí, které se stanovuje pomocí činitelů míry flikru. S tímto problémem se však nepotýká pouze distributor elektřiny, ale i spotřebitelé, kteří tyto výkyvy mohou sami způsobovat nežádoucím rušením. Rušení se mění připojením či odpojením zdrojů nebo spotřebičů do/z DS. Problémy s přepětím poškozují i samotné výrobce elektřiny, kterým tento jev způsobuje vypínání přepěťových ochran, čímž pro ně vzniká ztráta zisku omezením výroby.

Větším množstvím připojené rozptýlené výroby v sítích VN a NN dochází k přímému dopadu na stávající poměry DS, kde se snižuje celková spotřeba a v nejednom případě i otáčení směru toku činného výkonu v době největší výroby s přetokem do vyšších napěťových hladin, což se děje zejména u větrných (VTE) a fotovoltaických (FVE) elektráren. Změna toku činného výkonu je příčinou napěťových rozmezí, které se dotýkají povolených pásem napětí, jež je definováno již zmíněnou normou. Proto se dělají jistá opatření, která budou více prozkoumány v kapitole 3. [10], [11], [12]

2.3.1 Připojování distribuovaných zdrojů do sítě VN

Do sítě VN je možné z důvodu stability sítě připojit distribuované zdroje (DZ) o takovém výkonu, aby nedošlo ke zvýšení napětí o 2 % U_N . Na následujícím Obrázku 2.8 jsou zjednodušeně ukázány možné způsoby zatížení sítě.



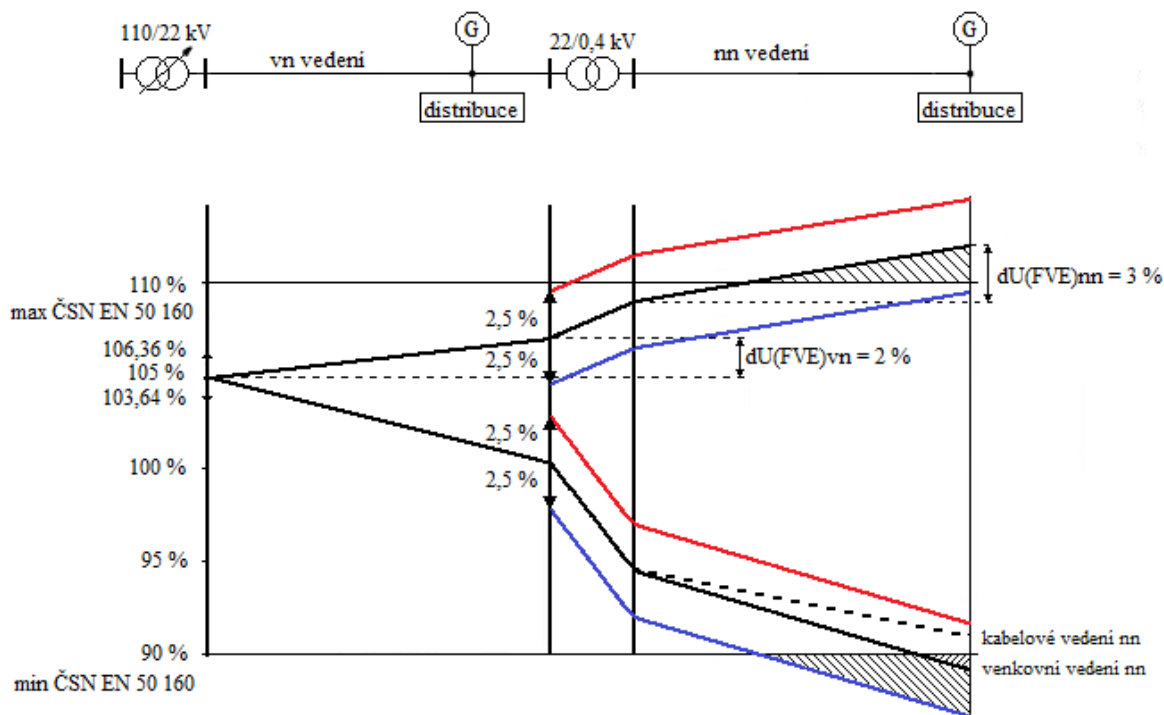
Obrázek 2.8 Napěťové nůžky na hladině VN. [6]

Dále se budou uvažovat oba krajní extrémní režimy a to maximálního odběru elektrické energie při nulové výrobě naznačeného generátoru, dále nazýváno maximální odběr (spodní křivka) a opačného režimu při maximální dodávce elektrické energie generátoru do sítě při zanedbatelném odběru v síti VN, dále nazýváno maximální dodávka (horní křivka). [6], [13]

2.3.2 Připojování distribuovaných zdrojů do sítě NN

Tento případ je stejný jako v kapitole předchozí, jen s tím rozdílem, že v sítích NN je možné připojit výkon DZ se zvýšením jmenovitého napětí o 3 %. V následujícím Obrázku 2.9

je vidět, že při nedodržení připojovaných stanovených výkonů na hladinách VN a NN jde napětí v síti NN mimo stanovenou odchylku $\pm 10\% U_N$.



Obrázek 2.9 Napěťové nůžky na hladině NN. [10]

Na Obrázku 2.9 jsou černou barvou naznačené regulační možnosti při udržení nulové odbočky distribučního transformátoru 22/0,4 kV, která nevyhovuje ani při maximálním odběru ani i při maximální dodávce generátorů, tato situace může nastat u FVE během dne. Jinak je tomu při přepnutí odbočky distribučního transformátoru, které nevyhovují požadavku $\pm 10\% U_N$ jen v jediném případě ze dvou, což je dlouhodobě neudržitelný stav. [6], [13]

3 Možná opatření v distribučních sítích NN

V následující kapitole budou ukázána možná opatření k udržení napětí ve stanovených mezích $\pm 10\% U_N$ i při připojení distribuovaných zdrojů.

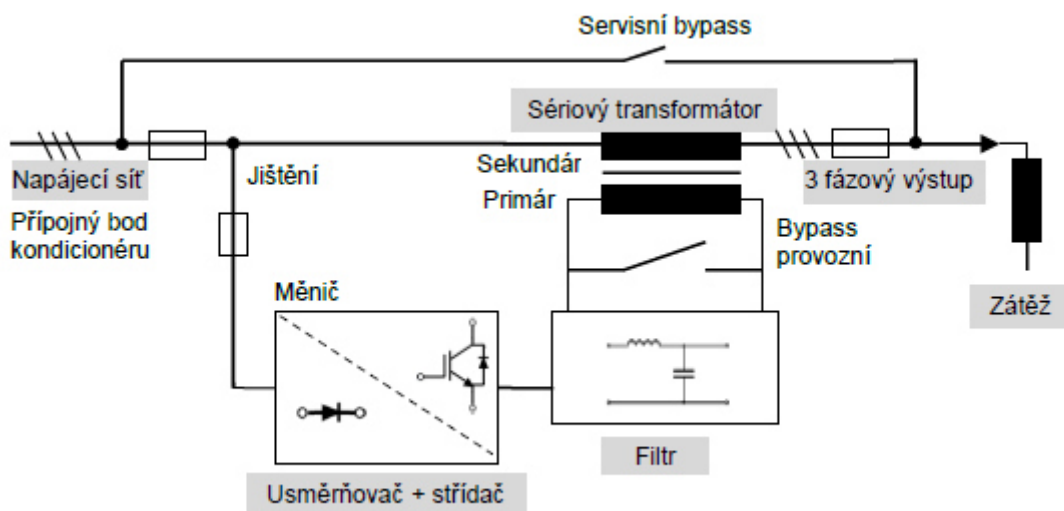
3.1 Linkový kondicionér

Linkový kondicionér (LK) (viz. Obrázek 3.1) pracuje na principu sériové kompenzace změn síťového napětí. Jedná se o výkonový stabilizátor napětí pro rozvod elektrické energie v širokém rozsahu pracující s II. Kirchhoffovým zákonem. Principiálně jde o sériové zapojení transformátoru, který se snaží svým napětím působit proti vzniklému úbytku napětí na vedení. Tento transformátor je napájený přes měnič a filtrační obvod.

Úkolem LK není překlenout krátkodobé výpadky napětí, ale vykompenzovat krátkodobé i dlouhodobé poklesy napětí dané impedancí sítě v místě připojení. Při již zmiňovaném poklesu napětí v síti si linkový kondicionér svou činností zvýší napětí na výstupu, čímž prohloubí pokles napětí v přípojném místě. Tento princip nefunguje bez omezení, LK lze trvale vykompenzovat třífázový pokles napětí o 20 % a jednofázový pokles o 30 % při zachování výstupního napětí jako jmenovité hodnoty. Poklesy nad tyto hodnoty vedou ke zhroutilí systému.

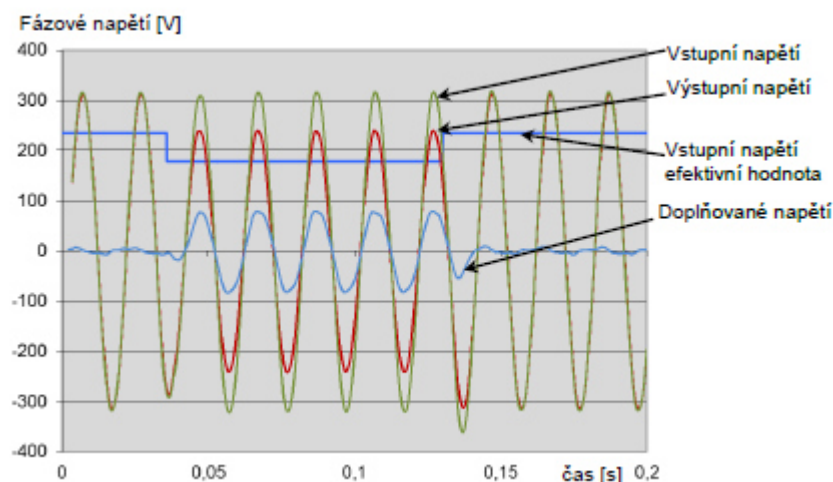
Přestože hlavním účelem LK je zvyšování napětí, tak dnešní doba vyžaduje i možnost snižování napětí. Obecně lze jednoduše říci, že LK může libovolně regulovat, tedy zvyšovat i snižovat poměr vstupního na výstupní napětí. Prakticky už toto nefunguje, protože snižováním dochází k opačnému toku, kdy výkon teče ze sériového transformátoru do měniče a zpět do sítě. Pokud není výkon ve střídači rekuperovaný, dochází k přepětí ve stejnosměrném obvodu střídače. Potom tento problém při snižování napětí lze řešit:

- nejčastěji se při malém proudu ve všech třech fázích výkon zmaří jako ztrátový ve střídači,
- při zvýšeném napětí jen v jedné fázi se výkon v meziobvodu střídače rozloží do ostatních fází,
- při velkém proudu ve všech třech fázích je nutnost použití rekuperačního usměrňovače.



Obrázek 3.1 Principiální schéma linkového kondicionéru. [14]

LK měří efektivní hodnotu napětí každou půlperiodu nezávisle ve všech třech fázích, podle nichž následně vyhodnocuje regulaci. Při odchylce od nastavené výstupní hodnoty napětí dojde nejpozději do 10ms k vyregulování odchylky (Obrázek 3.2).



Obrázek 3.2 Reakce na dynamickou změnu napětí. [14]

LK může ovlivňovat pouze parametry napětí směrem ze sítě ke spotřebičům, kde může mít jistý podíl i na kompenzaci flikru. Výhodnost užití tohoto zařízení může být též pro napájení citlivých zařízení. [14]

3.2 Kompenzace účinníku

Úkolem kompenzace účinníku je snížení ztrát přenosem a rozvodem elektrické energie.

Při paralelní kompenzaci účinníku je zapojen kondenzátor paralelně s kompenzovaným zatížením, čímž se docílí snížení ztrát při přenosu a rozvodu elektrické energie tím, že se jalový výkon vyrobí co nejbližší k místu spotřeby. Jalový výkon je potřebný pro vinutím vytvoření magnetického pole, proto se kompenzace vyskytuje nejčastěji v průmyslových závodech, kde se úspora nejvíce projeví. Nespornou výhodou má kompenzace i na snížení úbytků napětí, dále zlepšit zkratové poměry v sítích a v neposlední řadě odlehčí vedením, transformátorům a také generátorům, které jalovou energii musí vyrobit.

Paralelní kompenzaci lze nejlépe provozovat na napěťových hladinách VN a NN z důvodu dimenzování. Lze ji rozdělit na individuální, skupinovou a centrální podle místa připojení a počtu spotřebičů, pro které je kompenzace určena. [15], [16]

3.3 Kabelové vedení

Kabelovým vedením se rozumí rozvody provedené kabely pro uložení do země. Ukládání se provádí do výkopů, které se pro ochranu kabelu ještě vystele pískovým ložem nebo jinou mechanickou ochranou. Těchto sítí je hojně užíváno tam, kde nelze realizovat venkovní vedení nebo se venkovní vedení jeví ekonomicky nevýhodné. Toto je případ především

v hustých zástavbách měst a obcí, kde se tyto sítě provozují jako okružní vedení. Nové kabelové sítě se také plánují při současné pokládce kabelů VN a NN.

Výhodnost kabelového vedení se ukazuje také menším úbytkem napětí než u venkovního vedení. Kabelové vedení se používá na dlouhých linkách, kde se úbytek napětí blíží k dolní hranici $-10\% U_N$, což je naznačeno na Obrázku 2.9. [17]

3.4 Regulační distribuční transformátory VN/NN

Nejefektivnějším regulačním řešením se jeví regulační distribuční transformátory 22/0,4 kV s přepínáním odboček při zatížení (DRTR). Tento princip se používá ve vyšších napěťových hladinách, které jsou odstupňované časově i velikostí kroků (Obrázek 1.8).

DRTR s přepínáním odboček při zatížení má vinutí vyvedené odbočkami s různým krokem od 2 % do 5 % a v počtu 3 až 17 v závislosti na vlastním způsobu přepínání.

Přepínání odboček může být realizované přepínačem s elektrickým pohonem, který je relativně pomalý, ale na druhou stranu umožňuje velký regulační rozsah. Rychlejší a spolehlivější se jeví přepínání pomocí tyristorů, které jsou ale dražší a i přesto je regulační rozsah omezený. Možnosti, které v dnešní době nabízejí výrobci těchto transformátorů, jsou ukázány v kapitole 4. [6], [11]

4 Přehled nabízených regulačních distribučních transformátorů VN/NN s regulací pod zatížením

Při nasazení DRTR vyplývá, že regulace napětí na sekundární straně transformátoru ovlivňuje stejně všechny větve napájené z tohoto transformátoru a dochází k posunu napěťového profilu v celé síti úměrně se změnou sekundárního napětí. V případě, že v některé lince nastane přepětí způsobené OZE, přepnutím odbočky může dojít k podpětí v lince bez OZE. Kromě toho, skoková změna sekundárního napětí přispívá v závislosti na kroku odboček ke zvýšení úrovně flikru. V případě, že distribuční transformátor napájí víc linek přitom jen v některých jsou připojeny OZE, je pro regulaci vhodnější regulátor, případně pro lepší vlastnosti kombinace regulačního transformátoru s jiným regulátorem. To platí v případě, že úbytky napětí na lince (kladné i záporné) dosahují příliš vysokých hodnot, čímž výrazně snižují rezervu v tolerančním pásmu $\pm 10\% U_N$. V tomto případě je centrální regulace nevhodná a je nutné jí doplnit případně nahradit regulací distribuovanou pro optimální napěťový profil.

[11], [12]

Ačkoli je tento problém velmi mladý, výrobci už začali nabízet regulační transformátory, které budou v této kapitole představeny. Srovnání DRTR od jednotlivých výrobců je uvedeno v příloze.

Bohužel výčet DRTR není zcela aktuální, protože všichni poptávaní výrobci nebyli vstřícní při poskytování požadovaných informací. V tomto seznamu není uvedena společnost Končar, dále informace od společností Siemens a Magtech jsou částečně převzaté ze staršího srovnání, neboť mi výrobci poskytli minimum informací ke srovnání.

4.1 Regulační transformátory od firmy ABB

Společnost ABB nabízí regulační transformátory o jmenovitém výkonu od 250 kVA do 800 kVA s možností regulačních rozsahů 5, 7, 9 odboček s krokem 2,5 % (pro 9 odboček v rozsahu $\pm 4 \times 2,5$ %). Zapojené vinutí je do Dy. Přepínač odboček je proveden bezkontaktním spínáním kontaktů ve spojení s vakuovou technikou, což zaručí minimální údržbu během provozu. Komunikace probíhá s externím systémem SCADA, který umožňuje 3 režimy: automatický, dálkový i manuální přepnutí. Pro dálkovou komunikaci se používá rozhraní síť ethernet. [18]



Obrázek 4.1 Regulační transformátor ABB. [18]

4.2 Regulační transformátory od firmy BEZ

Slovenská společnost BEZ nabízející transformátory o jmenovitém výkonu 630 kVA a 1000 kVA s možností regulace napětí pod zatížením v rozsahu $\pm 6 \times 3,3 \%$ nebo $\pm 8 \times 2,5 \%$. Zapojené vinutí je do Dyn1. K přepínání odboček využívá mechanický přepínač odboček vyrobený firmou MR Reinhausen. Přepínač odboček je konstruován jako výkonový volič válcového tvaru. Pro přepalování oleje přepínáním je nutné mít oddělenou komoru od ostatního oleje, který slouží transformátoru k chlazení. Pohon pro přepnutí odbočky pod zatížením je možný ručně natažením pružiny, která obstará samotné přepnutí nebo motorovým pohonem, který v blízké době bude pracovat s dálkovou komunikací, kterou si obstará provozovatel. [18]

4.3 Regulační transformátory od firmy Efacec

Společnost Efacec nabízí transformátory o jmenovitém výkonu 630 kVA, 1000 kVA a 1600 kVA s možností regulace napětí pod zatížením v rozsahu $\pm 4 \times 2,5 \%$. Vinutí je zapojené Yyn0(d1), kde písmeno d značí zapojení jako terciární. Pro samotné změny odboček slouží mechanický přepínač odboček MR Reinhausen, který je konstruovaný obdobně jako u předchozí společnosti BEZ. Motorový pohon slouží i zde pro dálkové přepínání odboček. Dálkovou komunikaci si zde zařizuje provozovatel transformátoru. Transformátory jsou určeny zásadně pro vnitřní stání. [11], [12], [18]

4.4 Regulační transformátory od firmy Magtech

Společnost Magtech nabízí samoregulační transformátor, který má dva NN výstupy – regulovaný a neregulovaný. Na regulovaný výstup se předpokládá připojení zdrojů s běžnou zátěží a na neregulovaný výstup pouze běžnou zátěž. Tato společnost nabízí transformátory o výkonu 400 kVA a 630 kVA s možností změny odboček bez zatížení $\pm 2 \times 2,5 \%$ a při zatížení pouze snižuje napětí až o 6% U_N vzhledem k proporcionálně měřenému zpětnému toku činného výkonu. Regulace napětí zde probíhá plynule řízeným pomocným magnetickým polem. Transformátory jsou určeny pro venkovní stání. [11], [12], [18]



Obrázek 4.2 Regulační transformátor Magtech. [18]

4.5 Regulační transformátory od firmy Reinhausen

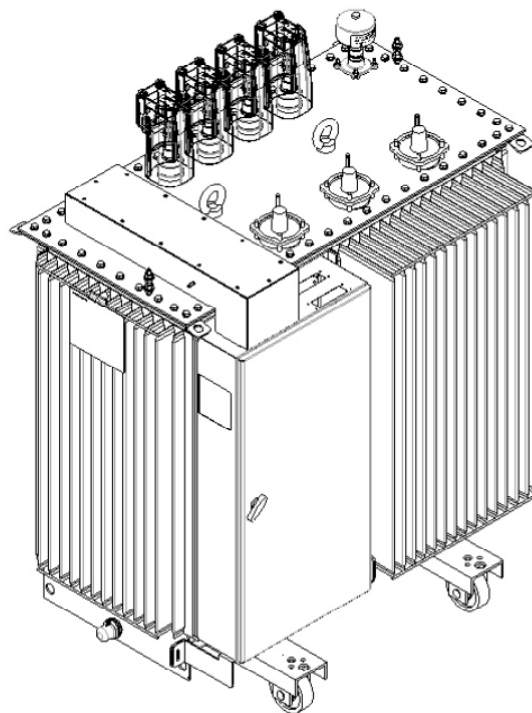
Německá společnost Reinhausen nabízí regulační transformátory při zatížení o jmenovitém výkonu 250 kVA, 400 kVA, 630 kVA a 800 kVA v zapojení Dyn5. Regulační rozsahy mohou být 5, 7, 9 odboček s krokem 1,5 %, 2 % nebo 2,5 %. I zde je použit přepínač odboček MR Reinhausen, který je hybridního provedení, využívá kombinace vakuové techniky a elektroniky. Využitím této kombinace se neklade nárok na zvláštní komoru pro přepínač a nedochází ke kontaminaci oleje přepínáním. Pro dálkovou komunikaci se používá rozhraní sítě ethernet. Transformátory jsou zásadně určeny pro vnitřní stání. [11], [12], [18]



Obrázek 4.3 Regulační transformátor Reinhausen. [18]

4.6 Regulační transformátory od firmy Schneider Electric

Od společnosti Schneider Electric jsou nabízené transformátory regulované pod zatížením se jmenovitou řadou výkonů 160 kVA, 250 kVA, 400 kVA, 630 kVA, 800 kVA a 1000 kVA, v zapojení Dyn5 nebo Dyn11. Možnost regulace napětí pod zatížením se pohybuje v rozsahu $\pm 4 \times 2,5$ %, k přepínání odboček při zatížení transformátoru se využívá přepínač na principu výkonové elektroniky. Ke komunikaci na dálku může být transformátor připojen k ADMS dohledu s kombinací kontrolního systému společnosti Schneider Electric. Tyto transformátory jsou k vnitřnímu stání. [18]



Obrázek 4.4 Regulační transformátor Schneider Electric. [18]

4.7 Regulační transformátory od firmy Siemens

Společnost Siemens nabízí transformátory o jmenovitém výkonu 400 kVA a 630 kVA s možnostmi regulace napětí pod zatížením v rozsahu $\pm 4,43$ % pro výkon 630 kVA nebo $\pm 3,57$ % pro výkon 400 kVA. Vinutí je v každém případě zapojené do Dyn. Pro přepínání odboček při zatížení slouží přepínač pracující na principu výkonové elektroniky, obdobný jako u společnosti Schneider Electric. K dálkové komunikaci se používá rozhraní sítě ethernet. Transformátory jsou určeny pro venkovní stání. [11], [12], [18]



Obrázek 4.5 Regulační transformátor Siemens. [11]

Srovnání všech nabízených DRTR je uvedeno v příloze A, kde je provedeno srovnání parametrů regulačních transformátorů o výkonu 630 kVA. V krátkosti lze z přílohy A vyhodnotit, že nejtěžší a nejrozměrnější DRTR je od společnosti Efacec (3900 kg) a transformátor s největším regulačním rozsahem nabízí společnost BEZ ($\pm 8 \times 2,5 \%$ nebo $\pm 6 \times 3,3 \%$).

5 Případová studie – použití regulačního distribučního transformátoru VN/NN a nastavení jeho regulačních parametrů

Cílem případové studie je nalézt vhodné nastavení parametrů regulace DRTR pro řešenou síť NN a poskytnout výsledky měření pro další zlepšení nastavovaných parametrů. Návrh parametrů regulace na DRTR bude proveden na základě simulace mezních stavů zatížení pro zjištění maximálního rozevření napěťových nůžek, dále na základě analýzy poskytnutých hodnot ke zjištění rozevření nůžek během měřeného období se standardním DTR. Při návrhu parametrů regulace budou dodrženy postupy v návodu výrobce transformátoru. Vyhodnocení jednotlivých nastavení DRTR vychází z kritérií, kterými jsou počet přepnutí odboček a kolísání napětí, které se hodnotí pomocí dlouhodobé míry vjemu flikru. Hodnocení sad zvolených regulačních parametrů spočívá ve srovnání jednotlivých variant mezi sebou s ohledem na stav se standardním transformátorem.

Tato síť NN byla zvolena z důvodu podezření na překračování dovolené meze $\pm 10 \% U_N$ stanovené normou ČSN EN 50160. Měření na DRTR bude probíhat na vrchovině Drahaný, na níž leží městy Drahaný, v němž je umístěna FVE způsobující překračování zmíněných mezí.

Z nabídky transformátorů s regulací napětí pod zatížením (kapitola 4) si provozovatel distribuční sítě E.ON, v jejichž spádové oblasti bude měření probíhat, vybral transformátor od výrobce Siemens, který se hodí pro venkovní provoz a nejvhodněji nahradí standardní DTR (rozměry, hmotnost). Měřený DRTR je novější než prezentovaný DTR v kapitole 4.7.

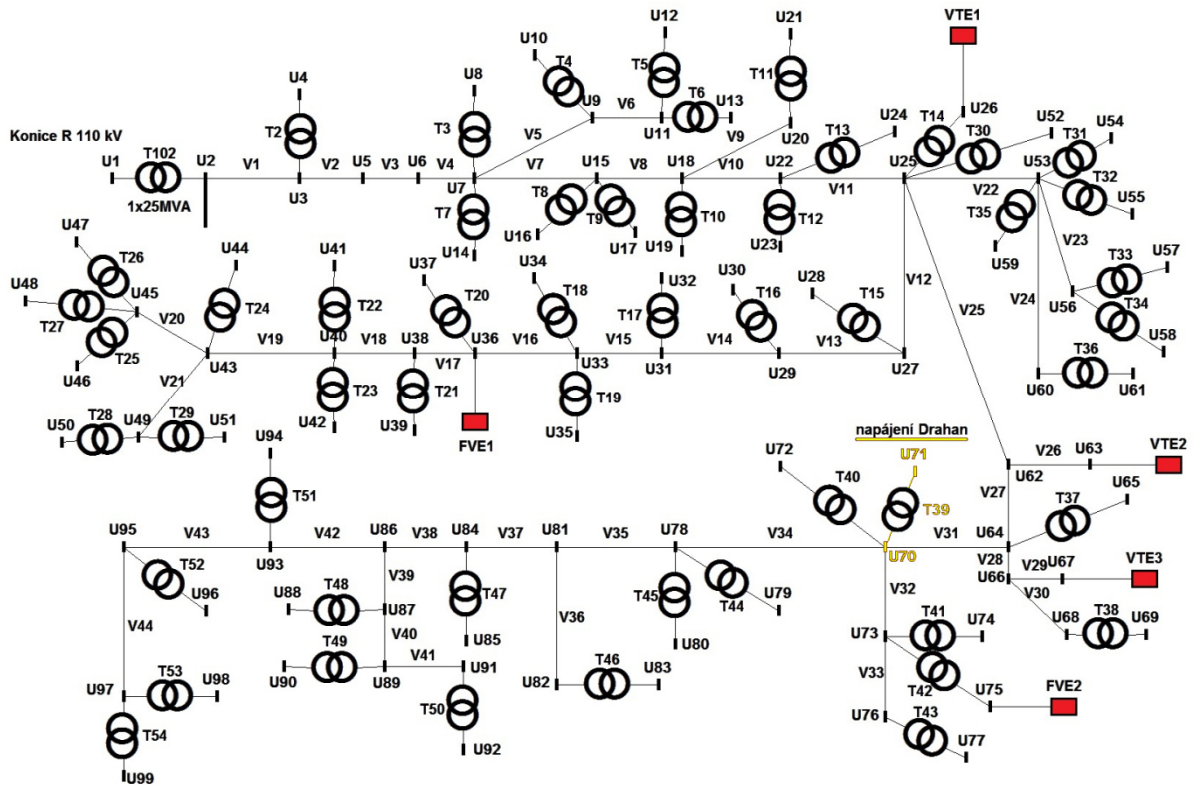
5.1 Popis řešené sítě

Obec Drahaný se nachází v západní části prostějovského regionu v Olomouckém kraji. Nadmožská výška se zde pohybuje okolo 625 metrů. [19]

Drahaný jsou napájené vývodem VN780 z nedalekých Konic (viz. Obrázek 5.1), kde se nachází transformovna 110/22 kV.

Z vývodu VN780 je napájeno 53 distribučních trafostanic VN/NN (8x160 kVA, 25x250 kVA, 13x400 kVA, 6x630 kVA a 1x1000 kVA). Dále jsou do vývodu připojeny distribuované zdroje, kterými jsou větrné elektrárny VTE1 (0,1 MW), VTE2 (3 MW), VTE3 (1,9 MW) o celkovém instalovaném výkonu 5 MW a fotovoltaické elektrárny FVE1 (1,6 MW), FVE2 (0,164 MW) o celkovém instalovaném výkonu 1,764 MW.

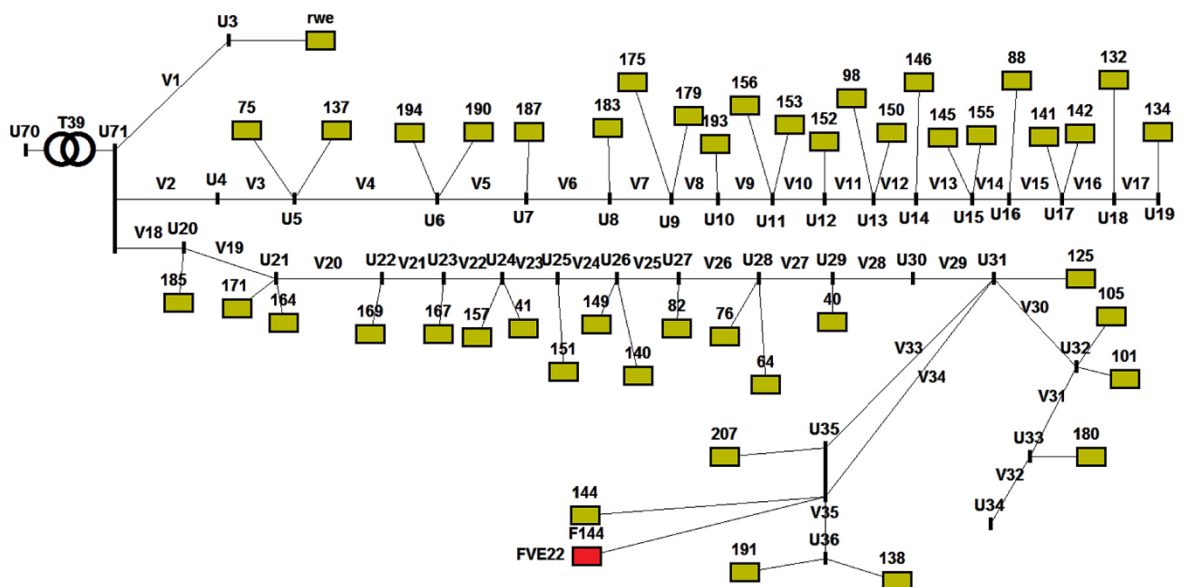
Jak je vidět na Obrázku 5.1 jsou Drahaný napájeny z uzlu U70 přes transformátor T39.



Obrázek 5.1 Síť VN - napájení Drahan.

Parametry vedení, instalované výkony DTR a instalované výkony FVE a VTE jsou souhrnně uvedeny v příloze B, Tabulka B.1.

Obec Drahan je napájena z uzlu U70 přes transformátor T39 o jmenovitém výkonu 160 kVA. V síti NN je umístěno 28 odběrů (3x20A, 1x16A, 2x50A, 1x63A, 1x32A a 20x25A) a do uzlu U35 je připojena FVE o instalovaném výkonu 22 kW (viz. Obrázek 5.2).



Obrázek 5.2 Síť NN - napájení Drahan.

Parametry vedení, instalované odběry a instalovaný výkon FVE v síti NN jsou souhrnně uvedeny v příloze B, Tabulka B.2.

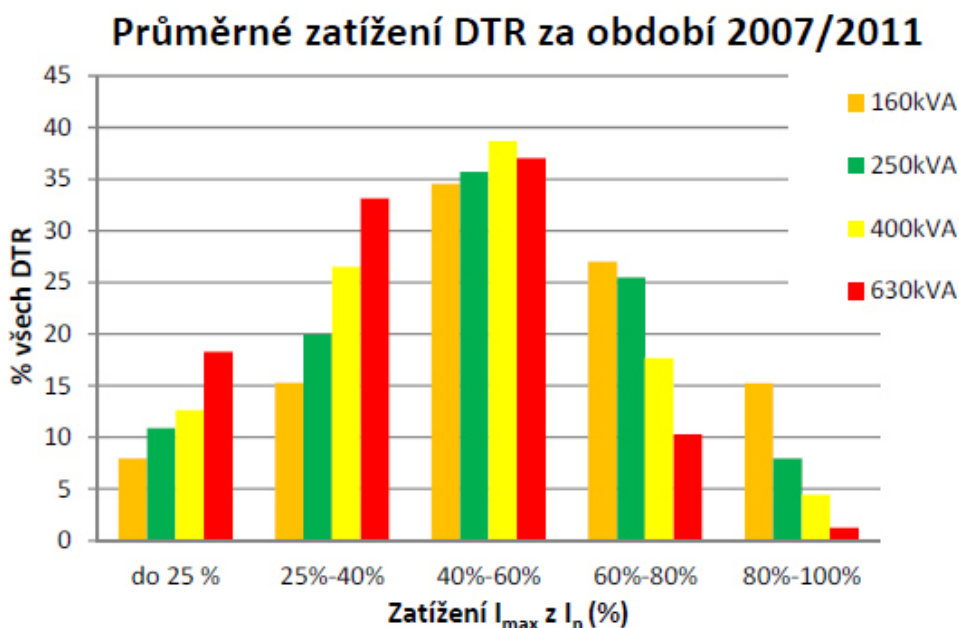
5.2 Simulace napěťových poměrů v síti VN a NN

Simulace je provedena pro zjištění maximálního rozevření napěťových nůžek v řešené DS, ze kterých bude následně jasněji vidět nutné použití DRTR při situacích, které mohou nastat během každého dne. Simulace napěťových poměrů v DS dále poslouží k porovnání pohledů teoretického (vypočteného a simulovaného) a praktického stavu (zjištěného během sledované doby).

Při simulaci poměrů v síti jsem vycházel z následujících předpokladů:

- všechny DTR mají stejný profil zatížení,
- procentní zatížení všech DTR je stejné.

Při určení procentního zatížení DTR jsem vycházel z výsledků studie Analýzy průměrného zatížení DTR za období 2007/2011 (viz. Obrázek 5.3). V dalších výpočtech jsem bral v úvahu, že DTR jsou zatíženy na 53,6 % svého jmenovitého výkonu.



Obrázek 5.3 Analýza průměrného zatížení DTR za období 2007/2011. [20]

V síti NN jsem volil okamžité rovnoměrné zatížení 9% instalovaného výkonu jednotlivých odběrů, které zaručí zatížení přibližně 55 % jmenovitého výkonu vstupního DTR, jehož instalovaný výkon je 160 kVA.

Simulaci jsem prováděl v programu E-vlivy, k dispozici jsem měl verzi poskytnutou ZČU v Plzni pro výukové účely, limitovanou pro řešení sítí do rozsahu 50 uzlů. Z tohoto

důvodu jsem musel provést zjednodušení sítě VN, která měla 99 uzlů. Při zjednodušení sítě jsem vycházel z metody s názvem "The WECC equivalencing".

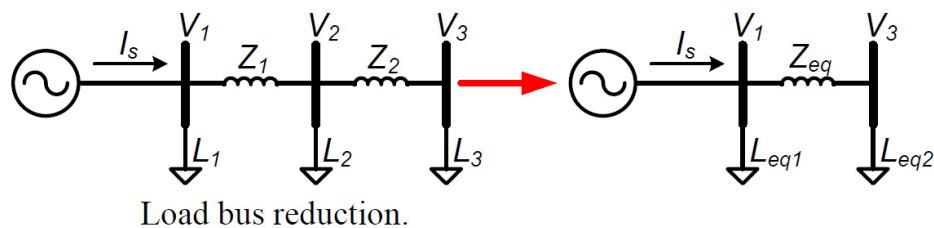
Princip metody "The WECC equivalencing" je ukázán na Obrázku 5.4. Jednoduchou síť tvoří dva úseky o impedancích Z_1 a Z_2 se zatížením L_1 , L_2 , L_3 připojených do jednotlivých uzlů. Při redukci uzlu V_2 dojde k převedení zatížení L_2 do uzlů V_1 a V_3 , čímž se zatížení změní na hodnotu L_{eq1} a L_{eq2} . Po redukci zůstane zachována velikost napětí v uzlech V_1 a V_3 a také velikost proudu tekoucího vývodem I_s . Parametry nového náhradního schéma se vypočítají podle následujících rovnic:

$$Z_{eq} = Z_1 + Z_2 \quad (1)$$

$$L_{eq1} + L_{eq2} = L_1 + L_2 + L_3 \quad (2)$$

$$L_{eq1} = L_1 + \frac{Z_2}{Z_1 + Z_2} L_2 \quad (3)$$

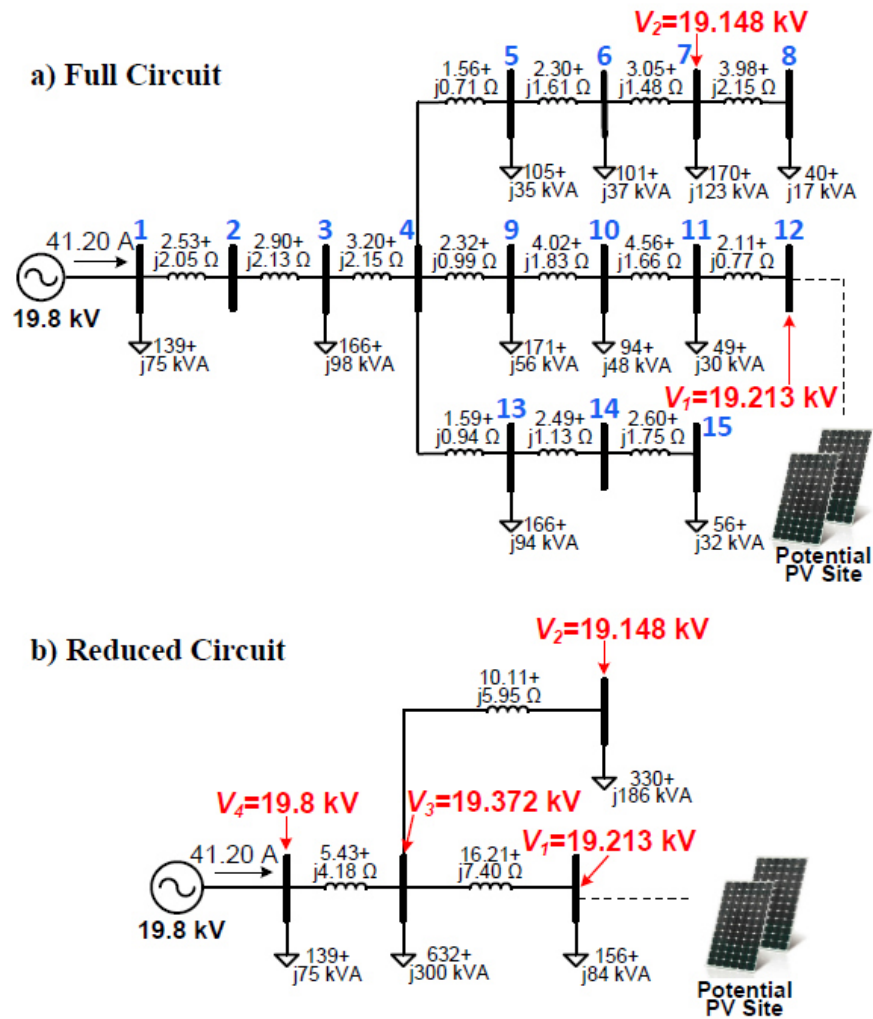
$$L_{eq2} = L_3 + \frac{Z_1}{Z_1 + Z_2} L_2 \quad (4)$$



Obrázek 5.4 Zjednodušená síť metodou The WECC equivalencing. [21]

Příklad zjednodušené sítě, na níž byla použita výše uvedená metoda, je na Obrázku 5.5.

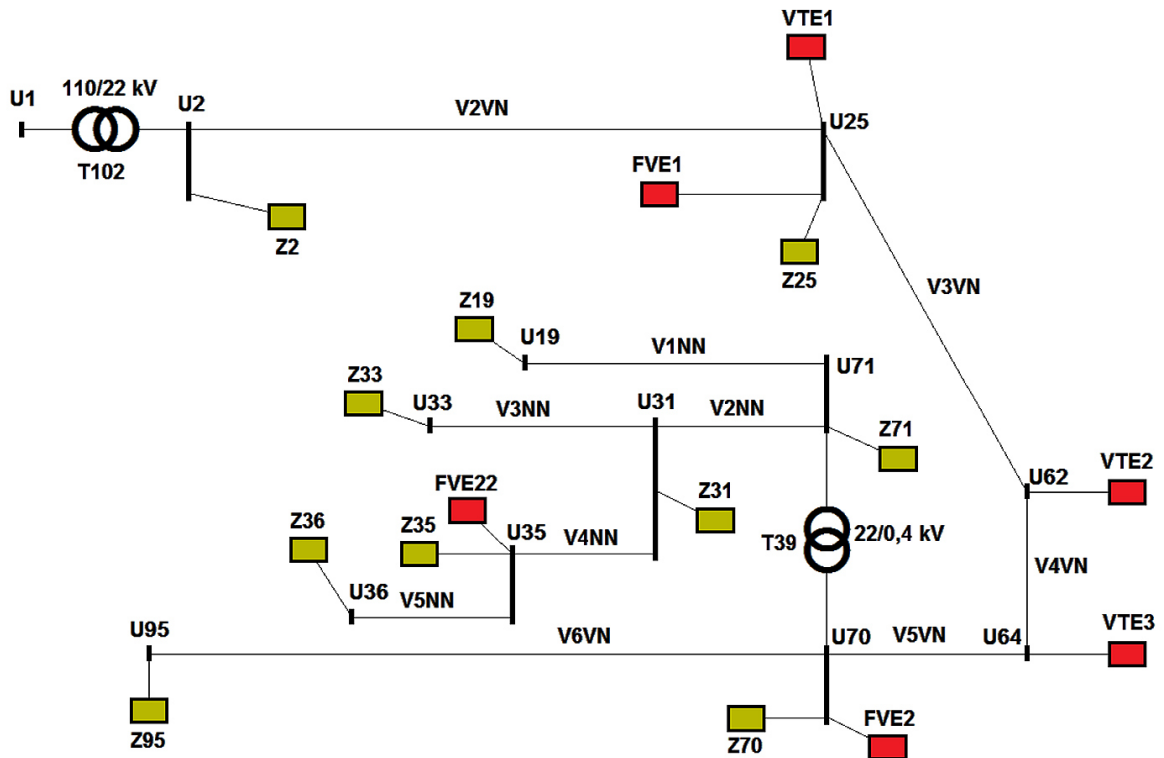
[21]



Full feeder reduction. a) original 15-bus feeder, b) final, simplified circuit.

Obrázek 5.5 Příklad zjednodušené sítě metodou The WECC equivalencing. [21]

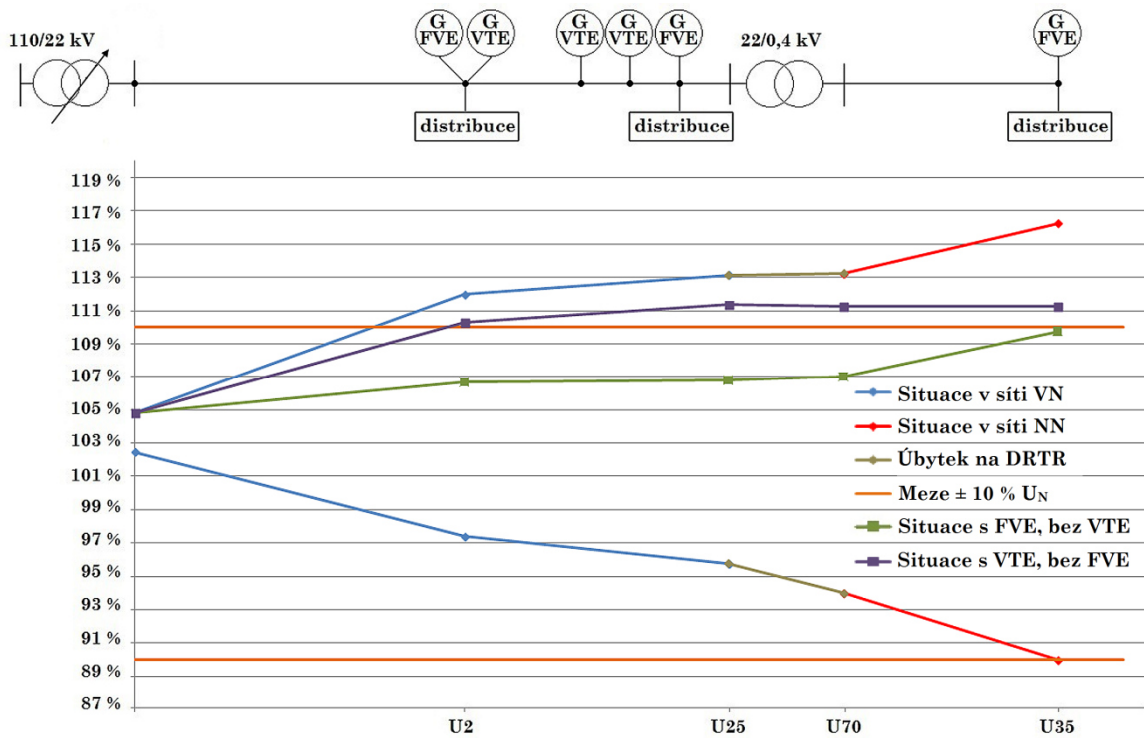
Výše popsaná metoda byla aplikována na síť VN a NN, kde v síti VN došlo k redukci počtu uzlů na 6 z původních 99 a v síti NN došlo k redukci počtu uzlů na 6 z původních 36 (viz. Obrázek 5.6).



Obrázek 5.6 Zjednodušená síť VN a NN - napájení Drahan.

Parametry vedení a instalované velikosti odběrů po zjednodušení sítě VN a NN jsou vypsány v příloze B Tabulce B.3.

Výpočet zjednodušené sítě jsem prováděl pomocí tabulek v Excelu. Po vypočtení zatížení v několika uzlech byl tento případ nasimulován. Výsledkem byly nasimulované napěťové nůžky (Obrázek 5.7), kdy horní mez značí maximální dodávku do sítě distribuovanými zdroji OZE při zanedbání odběrů a dolní mez značí maximální odběr bez dodávky OZE do DS.



Obrázek 5.7 Nasimulované napětové nůžky - napájení Drahan.

Na Obrázku 5.7 je patrné, že v případě připojených distribuovaných zdrojů dochází k výraznému překročení horní dovolené odchylky napětí. Pro tento případ byly uvažovány všechny zdroje pracující na plný instalovaný výkon, což není vždy reálné.

Pro názornost jsem do grafu vložil ještě dva případy (zelená a fialová křivka), které představují situaci, kdy jeden z typů zdrojů je odstaven (není v provozu). Odběry jsou pro oba tyto případy zanedbány.

Zelená křivka je pro případ maximální dodávky FVE (bez výroby VTE) do sítě VN a NN. Uvažuji soudobost vzdáleností blízkých FVE 0,9, což znamená, že FVE s instalovaným jednotkovým výkonem 1 MW má výkon 0,9 MW. Vysokých hodnot soudobosti lze dosáhnout za jasného slunného dne na celém území České republiky a nebo za proměnlivého slunečného dne, kde soudobost bude v častém krátkodobém rozjasnění oblohy. Nejvyšší hodnoty budou dosaženy při rozjasněné obloze a nižších teplotách, než za zcela jasného dne. Tento scénář může nastat v době poledne, kdy FVE mají maximální dodávku do sítě. [22]

Křivka označená fialově značí situaci maximální výroby VTE bez provozu FVE. Tento scénář může nastat kdykoliv. Při dlouhodobém sledování dodávaného výkonu jsou spíše rozhodující roky popř. měsíce, kdy bylo či nebylo větrno. Z výkonové statistiky vychází, že více jak 50 % času v roce vyrábí VTE méně než 20 % svého instalovaného výkonu. Naopak 5-10 % času v roce vyrábí VTE více jak 90 % instalovaného výkonu. [23], [24]

Při překračování mezních hodnot $\pm 10 \% U_N$ je nutné provést omezovací plán neřiditelných FVE a VTE, aby nebyl ohrožen bezpečný provoz ES. Omezovací plán je zpracován dispečinkem ČEPS ve spolupráci s dispečinkem DS. Do omezovacího plánu jsou zařazeny v území E.ON pouze FVE s instalovaným výkonem nad 250 kW, které jsou zařazeny do regulačních stupňů po 75 MW. Omezování zdrojů OZE není zpoplatněno a omezovací plán oznamuje dispečink ČEPS nebo lokální provozovatel DS. [25]

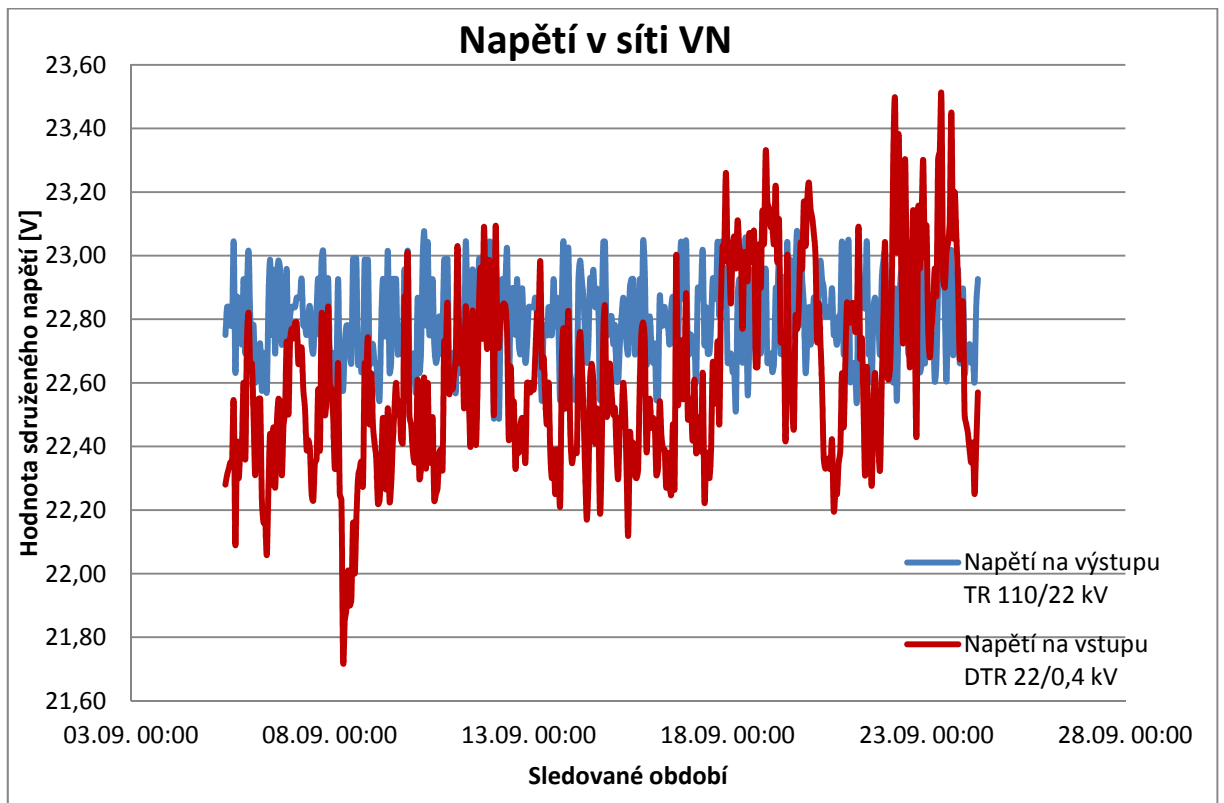
Dolní mez přesahuje hranici dovolené odchylky 90 % U_N . Nasimulovaný pokles napětí odpovídající okamžitému rovnoměrnému zatížení 9 % instalovaného výkonu jednotlivých odběrů bude srovnán s naměřenými hodnotami v kapitole 5.3.

5.3 Analýza poskytnutých hodnot

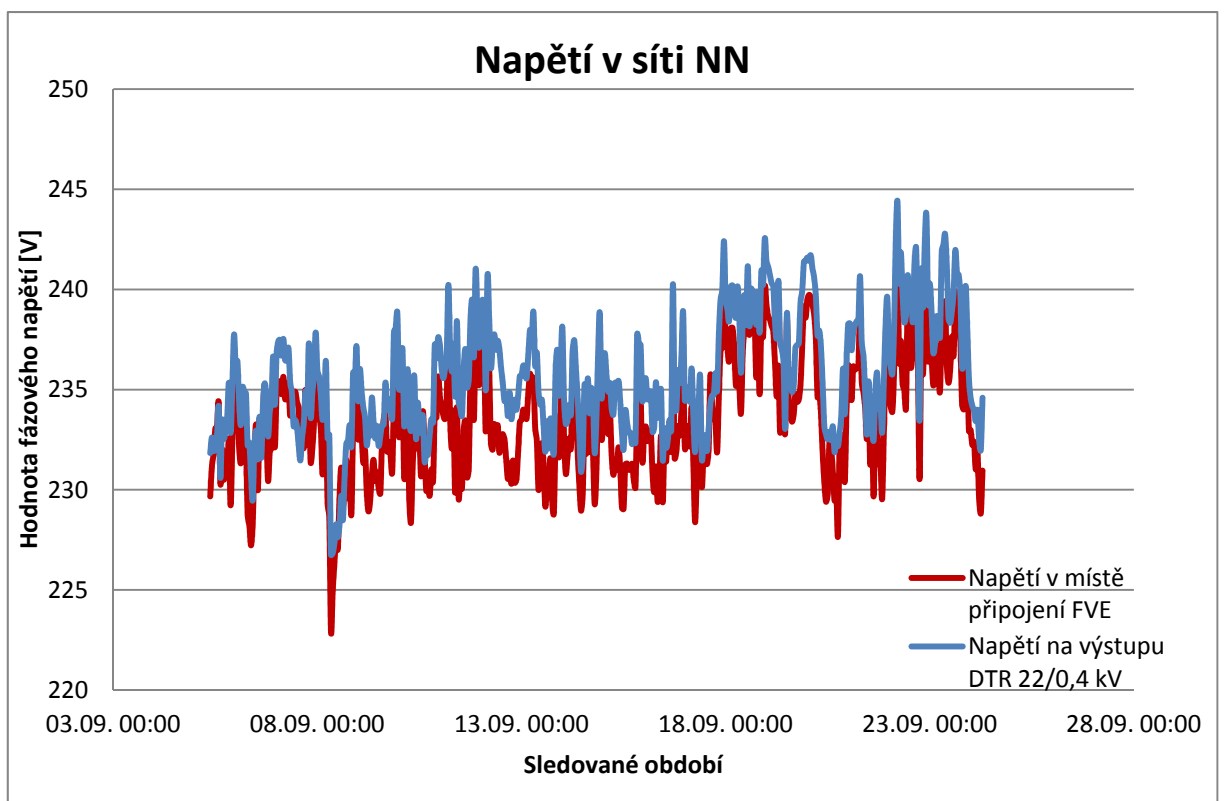
Naměřené hodnoty v analýze poskytnutých hodnot poslouží ke srovnání napěťových poměrů ze simulace, tj. na kolik byla předchozí simulace reálná a jaké rozmezí napětí lze skutečně očekávat. Dále tyto hodnoty poslouží jako základní kámen pro můj návrh regulačních parametrů pro nastavení DRTR.

Od konzultanta, Ing. Martina Kašpírka, Ph.D., ze společnosti E.ON Česká republika, mi byla poskytnuta data z měření na výstupu z TR 110/22 kV, vstupu a výstupu na DTR 22/0,4 kV a v místě připojení FVE, která je téměř na konci vývodu sítě NN. Naměřená data jsou průměrné efektivní hodnoty za 10 minut. K dispozici jsem měl hodnoty odečtené v každé hodině v období od 5. 9. 2014 od 9 hodin do 24. 9. 2014 do 7 hodin. Tyto hodnoty jsou zaznamenány s použitím "starým" transformátorem s regulací bez zatížení, protože "nový" regulační transformátor pod zatížením byl namontován 24. 9. 2014 v dopoledních hodinách. Při navrhování parametrů DRTR jsem neměl k dispozici žádná předchozí měření.

Napětí zaznamenaná v síti VN a v síti NN jsou zobrazena na následujících grafech (Obrázek 5.8 a 5.9).



Obrázek 5.8 Napětí v síti VN ve sledovaném období v září 2014.



Obrázek 5.9 Napětí v síti NN ve sledovaném období v září 2014.

Napětí v síti NN (Obrázek 5.9) odpovídá předpokladu, že napětí na sekundární straně DTR je větší než napětí v místě připojení FVE (výkon FVE je nižší nežli zatížení paprsku sítě NN, do něhož je FVE připojena). Tento předpoklad však neplatí v síti VN (Obrázek 5.8), kde je viditelné značné kolísání napětí na primární straně DTR oproti relativně stabilnímu napětí na sekundární straně TR 110/22 kV. Tento vliv lze jednoznačně přisoudit přítomnosti VTE, která způsobila zvýšení napětí trvajících několik dnů.

Bližší analýzou napětí v síti NN lze sledované období (tj. 5.-24. 9. 2014) rozdělit na dva úseky, v nichž je průměrné napětí rozdílné. První úsek považuji za úsek před zvýšením napětí (tj. od 9:00 hodin 5. 9. 2014 do 19:00 hodin 17. 9. 2014), který má průměrnou hodnotu fázového napětí 234,5 V. V druhém úseku je zvýšené napětí (tj. od 20:00 hodin 17. 9. 2014 do 7:00 hodin 24. 9. 2014), kdy průměrná hodnota fázového napětí dosahuje hodnoty 237,9 V. Z toho plyne, že průměrná hodnota fázového napětí celého sledovaného úseku je 235,7 V.

Při srovnání dolní meze napětí ze simulace (viz. kapitola 5.2) a skutečné zaznamenané hodnoty z měření ve sledovaném období, která odpovídá rovnoměrnému okamžitému zatížení 5 % instalovaného výkonu jednotlivých odběrů je patrné, že pokles dolní křivky z Obrázku 5.6 bude téměř poloviční. Nasimulovaný stav ovšem může být platný v zimních měsících, kdy dochází k navýšení odběru (např. elektrickým vytápěním).

5.4 Nastavení parametrů distribučního transformátoru VN/NN s regulací napětí pod zatížením

Při návrhu nastavení regulačních parametrů DRTR jsem vycházel z návodu výrobce Siemens, kde je možnost zvolit několik parametrů (viz. Tabulka 5.10). DRTR od tohoto výrobce má regulační rozsah 3 odbočky po zvoleném regulačním kroku v %.

Tabulka 5.10 Manuální nastavení parametrů regulace DRTR. [26]

Parameter	Einstellung	Beispiel
Strangspannung (auf die geregelt werden soll)	"DB_Set".Voltage_Setpoint.Normal_Voltage	230.0 (230,0V)
Obere Trafostufe in Prozent	"DB_Set".Transformer_Taps.Upper_Tap	3.50 (3,50%)
Grenzwertverhältnis zur oberen Trafostufe für verzögertes Umschalten	"DB_Set".Transformer_Taps.Upper_Tap_ratio_lim_slow	60.0 (60,0%)
Grenzwertverhältnis zur oberen Trafostufe für schnelles Umschalten	"DB_Set".Transformer_Taps.Upper_Tap_ratio_lim_fast	90.0 (90,0%)
Untere Trafostufe in Prozent	"DB_Set".Transformer_Taps.Lower_Tap	-3.50 (-3,50%)
Grenzwertverhältnis zur unteren Trafostufe für verzögertes Umschalten	"DB_Set".Transformer_Taps.Upper_Tap_ratio_lim_slow	60.0 (60,0%)
Grenzwertverhältnis zur unteren Trafostufe für schnelles Umschalten	"DB_Set".Transformer_Taps.Upper_Tap_ratio_lim_fast	90.0 (90,0%)
Lange Verzögerungszeit Runterschalten der Spannung	"DB_Set".Timer_settings.Delay_Timer_10	S5T#10m (10 Minuten)
Kurze Verzögerungszeit für Runterschalten der Spannung	"DB_Set".Timer_settings.Delay_Timer_11	S5T#1s (1 Sekunde)
Lange Verzögerungszeit für das Hochschalten der Spannung	"DB_Set".Timer_settings.Delay_Timer_20	S5T#10m (10 Minuten)
Kurze Verzögerungszeit für das Hochschalten der Spannung	"DB_Set".Timer_settings.Delay_Timer_21	S5T#1s (1 Sekunde)

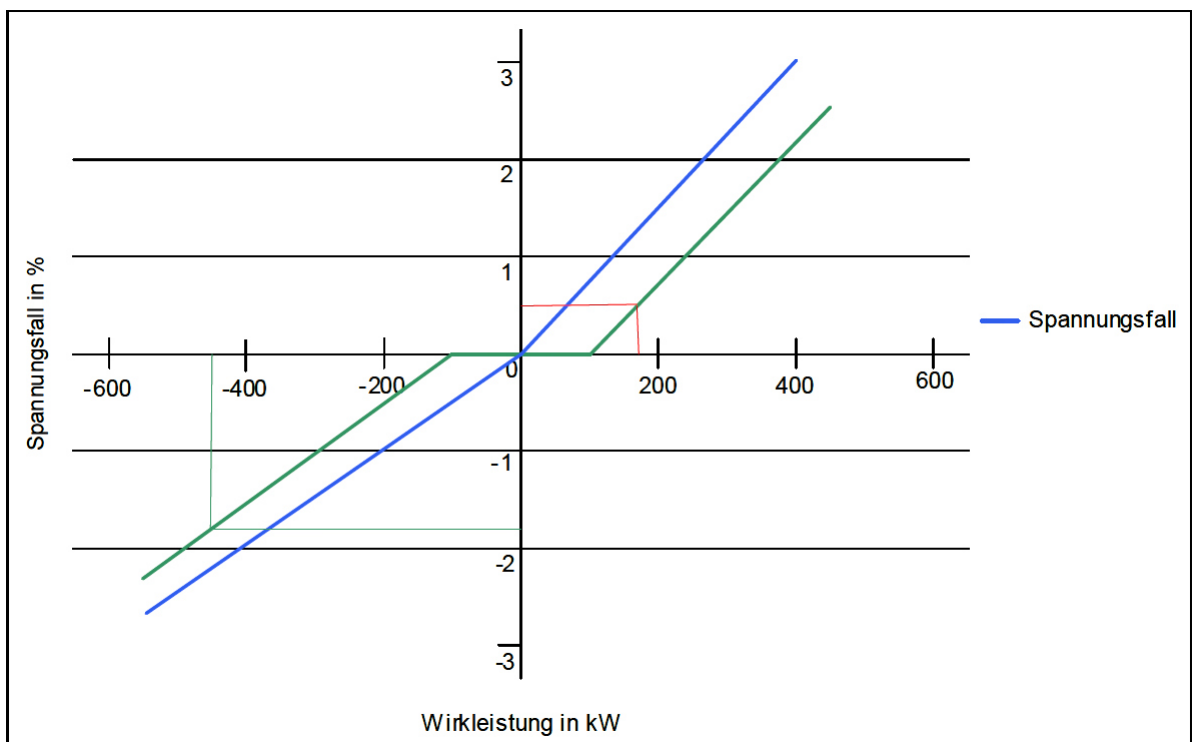
Nastavovanými parametry regulace napětí (viz. předchozí Tabulka 5.10) jsou především: hodnota fázového napětí, kterou lze libovolně zvolit dle požadavků (pro volbu této hodnoty použijí zjištěných hodnot napětí z Analýzy poskytnutých hodnot), dále velikost horního a dolního transformátorového stupně, což je regulační rozsah DRTR, a procentní hodnota transformátorového stupně (regulační krok), která se vztahuje k fázové hodnotě napětí. V posledních řádcích tabulky je návrh časového zpoždění pro rychlé a pomalé přepnutí jednotlivých transformátorových stupňů. Časové zpoždění určuje dobu, po kterou bude překročena nastavená hranice a transformátor vyhodnotí přepnutí odbočky.

Hranice pro rychlé a pomalé přepnutí transformátorového stupně je zadána v procentech a je potřeba tyto hodnoty přepočítat na napětí (Tabulka 5.11)

Tabulka 5.11 Přepočítání hranic pro přepínání v procentech. [26]

Parameter	Einstellung	Beispiel
Grenzwert für verzögertes Hochschalten	"DB_Set".Calculated_Limits.Limit_switch_UP_slow	Trafostufe: 3,50% von 230V = 8,05V Verhältniszahl: 60% von 8,05V = 4,83V → Grenzwert: 230V - 4,83V = <u>225,17V</u>
Grenzwert für schnelles Hochschalten	"DB_Set".Calculated_Limits.Limit_switch_UP_fast	Trafostufe: 3,50% von 230V = 8,05V Verhältniszahl: 90% von 8,05V = 7,25V → Grenzwert: 230V - 7,25V = <u>222,75V</u>
Grenzwert für verzögertes Runterschalten	"DB_Set".Calculated_Limits.Limit_switch_DOWN_slow	Trafostufe: 3,50% von 230V = 8,05V Verhältniszahl: 60% von 8,05V = 4,83V → Grenzwert: 230V + 4,83V = <u>234,83V</u>
Grenzwert für schnelles Runterschalten	"DB_Set".Calculated_Limits.Limit_switch_DOWN_fast	Trafostufe: 3,50% von 230V = 8,05V Verhältniszahl: 90% von 8,05V = 7,25V → Grenzwert: 230V + 7,25V = <u>237,25V</u>

V předchozí Tabulce 5.11 není zohledněna chyba vznikající průchodem činného výkonu, který má jistý vliv při přepnutí transformátorového stupně. Napěťová chyba v závislosti na procházejícím činném výkonu je znázorněna na Obrázku 5.12.



Obrázek 5.12 Napěťová chyba v závislosti na procházejícím činném výkonu. [26]

V mém případě je instalovaný výkon DRTR 160 kVA, během sledovaného období v září roku 2014 byl zjištěn průchodí maximální činný výkon 36,5 kW, což je dle Obrázku 5.12 zanedbatelná hodnota. Napěťovou chybu v závislosti na procházejícím činném výkonu považuji za zanedbatelnou.

5.4.1 Kritéria návrhu parametrů DRTR 22/0,4 kV

Mým úkolem bylo navrhnout, podle již zmíněných předpokladů a pravidel, parametry regulace pro nastavení DRTR. Následně jsem navrhl 2 sady regulačních parametrů, které budou zadány na DRTR po dobu přibližně 14ti dnů a poté vyhodnoceny podle stanovených kritérií.

Pro návrh parametrů vycházím z hodnot fázového napětí zjištěných v kapitole 5.2 (234,5 V a 237,9 V). Pro zvolení velikosti transformátorového stupně jsem vycházel z možné maximální dodávky (+3 % U_N , což je hodnota maximálního zvýšení napětí DZ v síti NN) a maximálního odběru (-4,25 % U_N , což je hodnota poklesu napětí zjištěná při simulaci) v síti NN. Z důvodu hodnot maximální dodávky a maximálního odběru jsem nevolil transformátorové stupně menší než 3 %, z důvodu omezení odstupňování regulačních stupňů a z důvodu efektivnosti změny napětí odbočkou. Z Obrázku 5.9 je vidět, že většina měřených dat se pohybuje v rozmezí 230 V až 240 V, kam spadá přesně 400 z celkových 455 změřených hodnot, což je 88 % zaznamenaných dat. Protože většina změřených hodnot se pohybuje ve stanoveném rozmezí, pokusil jsem se toto rozmezí dodržet beze změny stavu odbočky.

Rozdíl napětí mezi mezemi pomalého a rychlého přepnutí je v ukázkovém případě přibližně 2,4 V. Pokusil jsem se daný rozdíl přepnutí udržet alespoň na hodnotě 2 V, aby při malých změnách napětí překročením meze pomalého sepnutí nedocházelo ihned k rychlému přepnutí odbočky.

5.4.2 Navržené parametry DRTR 22/0,4 kV

Podle ukázkového přepočtu výrobce (Tabulka 5.11) jsem nahrál do Excelu přepočet hodnot z procent na napětí jednotlivých velikosti transformátorových stupňů pro pomalé a rychlé přepnutí transformátorového stupně.

Po tomto kroku už jsem se soustředil na velikosti transformátorových stupňů a velikosti mezních hranic v hodnotách napětí. Pozornost jsem věnoval především udržení rozmezí 230-240 V (v němž bylo zaznamenáno 88 % hodnot) bez změny odbočky a udržení hodnoty minimálně 2 V mezi stupni rychlého a pomalého přepnutí transformátorového stupně. Podle těchto požadavků jsem kombinoval transformátorové stupně a hranice pomalého a rychlého přepnutí. Výsledkem této práce jsou dle mé úvahy nejvhodnější parametry pro nastavení DRTR naznačené v Tabulce 5.12. Tabulky, ze kterých jsem vycházel jsou v kompletní podobě ve formátu MS Excel k dispozici v příloze C.

Tabulka 5.13 Mnou navržené parametry regulace DRTR 22/0,4 kV

Parametr	Varianta 1	Varianta 2
Fázové napětí	237,0V	234,0 V
Horní transformátorový stupeň v procentech	3,00 %	3,50 %
Hranice horního transformátorového stupně pro pomalé přepnutí	65,0 % (241,62 V)	70,0 % (239,73 V)
Hranice horního transformátorového stupně pro rychlé přepnutí	95,0 % (243,75 V)	95,0 % (241,78 V)
Dolní transformátorový stupeň v procentech	-3,50 %	-3,50 %
Hranice dolního transformátorového stupně pro pomalé přepnutí	70,0 % (231,2 V)	65,0 % (228,68 V)
Hranice dolního transformátorového stupně pro rychlé přepnutí	95,0 % (229,12 V)	90,0 % (226,63 V)
Doba pro pomalé přepnutí dolního transformátorového stupně	10 minut	10 minut
Doba pro rychlé přepnutí dolního transformátorového stupně	1 sekunda	1 sekunda
Doba pro pomalé přepnutí horního transformátorového stupně	10 minut	10 minut
Doba pro rychlé přepnutí horního transformátorového stupně	1 sekunda	1 sekunda

Rozdíl mezi hodnotami napětí pomalého a rychlého přepnutí je v nejhorším případě 2 V, což by mělo zajistit dostatečnou rezervu při malém kolísání napětí nad hranici pomalého přepnutí.

5.5 Hodnocení provozu DRTR 22/0,4 kV

V této kapitole jsou vyhodnoceny navržené parametry regulace nastavené na DRTR, který byl nainstalován místo standardního transformátoru s pevně nastavenou odbočkou.

Hodnocenými parametry regulace je počet přepnutí odboček a kolísání napětí pomocí dlouhodobé míry vjemu flikru na sekundární straně DRTR a v místě připojení FVE oproti stavu se standardním transformátorem.

Kolísání napětí se vyhodnocuje pomocí dlouhodobé míry vjemu flikru P_{It} , což je hodnota získávána každé dvě hodiny. Ve spádové oblasti E.ON nespĺňuje kritérium $P_{It} \leq 1$ dle ČSN EN 50160 přibližně 30 % v sítích NN.

Při hodnocení dlouhodobé míry vjemu flikru P_{It} dle ČSN EN 50160 se počítá s tzv. 95 % percentilem, kterým se vyloučí 5 % nejnejpříznivějších (nejvyšších) naměřených hodnot, které se poté porovnávají s již zmíněným kritériem $P_{It} \leq 1$. Hodnocení každé fáze probíhá zvlášť a za výslednou hodnotu se bere nejvyšší (nejnejpříznivější) hodnota ze všech fází.

5.5.1 Provoz DTR s pevně nastavenou odbočkou

Se standardním transformátorem s regulací napětí bez zatížení během sledované doby v září roku 2014 došlo k vyhodnocení dlouhodobé míry vjemu flikru (P_{It}) na sekundární straně DTR k nejvyšší hodnotě 0,54, která je menší než 1, čímž splňuje stanovenou normu.

Vyhodnocením P_{It} v místě připojení FVE bylo dosaženo nejvyšší hodnoty 1,36, která je větší než 1. Hodnota dlouhodobé míry vjemu flikru v místě připojení FVE překračuje stanovenou normu. Tato síť patří mezi 30 % sítí NN, které nevyhovují velikosti dlouhodobé míry vjemu flikru, neboli kolísání napětí.

Výsledky vyhodnocení P_{It} je vyjádřeno v Tabulce 5.14.

Tabulka 5.14 Výsledky hodnocení P_{It} se standardním DTR.

Na sekundární straně DTR			V místě připojení FVE		
P_{It} fáze 1	P_{It} fáze 2	P_{It} fáze 3	P_{It} fáze 1	P_{It} fáze 2	P_{It} fáze 3
0,5372	0,4858	0,5115	0,7521	0,7893	1,3621

5.5.2 Provoz DRTR - nastavení parametrů regulace podle varianty 1

Varianta 1 má dle Tabulky 5.12 nastavené fázové napětí na hodnotě 237 V, což odpovídá zvýšenému napětí v Analýze poskytnutých hodnot. Tato varianta byla na DRTR nastavená v období od 14:00 hodin 19. 3. 2015 do 9:00 hodin 30. 3. 2015.

Ve sledovaném období hodnocení P_{It} vyšla na sekundární straně DRTR hodnota 0,57, která je nepatrně větší než hodnota se standardním DTR, což splňuje kritériu $P_{It} \leq 1$.

Hodnota P_{It} v místě připojení FVE vyšla 1,45, čímž se oproti hodnotě se standardním DTR mírně zvýšila.

Výsledky vyhodnocení P_{It} je vyjádřeno v Tabulce 5.15.

Tabulka 5.15 Výsledky hodnocení P_{It} s DRTR varianta 1.

Na sekundární straně DRTR			V místě připojení FVE		
P_{It} fáze 1	P_{It} fáze 2	P_{It} fáze 3	P_{It} fáze 1	P_{It} fáze 2	P_{It} fáze 3
0,5696	0,55	0,54	1,454	0,718	0,7646

Během doby nastavení varianty 1 došlo k 5 přepnutím. Všechna přepnutí proběhla v době ke konci sledovaného období (tj. od 10:00 hodin 27. 3. 2015 do 22:00 hodin 29. 3. 2015), kde na sekundární straně DRTR vyhodnocením vyšla nejvyšší hodnota $P_{It} = 0,63$. Hodnota

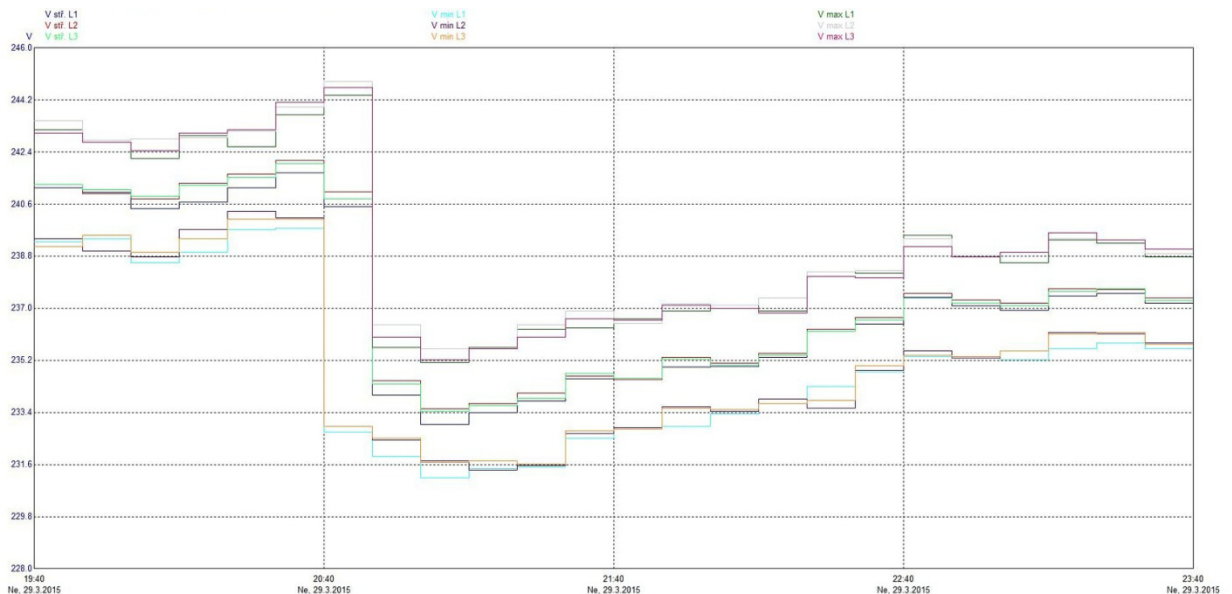
dlouhodobé míry vjemu flikru v místě připojení FVE byla vyhodnocena také o něco vyšší, a to na nejvyšší hodnotu ze třech fází 1,51.

Naopak v době, kdy nedošlo k přepínání odboček DRTR (tj. od 14:00 hodin 19. 3. 2015 do 8:00 hodin 27. 3. 2015) vyšlo hodnocení na sekundární straně DRTR $P_{It} = 0,52$ a v místě připojení FVE $P_{It} = 1,45$. Výsledky hodnocení rozdílu přepnutí na P_{It} jsou ukázány v Tabulce 5.16.

Tabulka 5.16 Výsledky hodnocení P_{It} DRTR s variantou 1, rozdíly přepnutí.

	Na sekundární straně DRTR			V místě připojení FVE		
	P_{It} fáze 1	P_{It} fáze 2	P_{It} fáze 3	P_{It} fáze 1	P_{It} fáze 2	P_{It} fáze 3
bez přepnutí	0,5128	0,5182	0,4926	1,441	0,713	0,7716
s přepnutími	0,63075	0,59825	0,59875	1,5075	0,708	0,7625

Z Tabulky 5.16 je na sekundární straně DRTR jasně vidět zvýšení dlouhodobé míry vjemu flikru při přepnutí odbočky. Stejný jev ale už není vidět v místě připojení FVE, kde nejvyšší hodnota P_{It} ve fázi 1 se zvýšila, ale v ostatních fázích je mírný pokles, čímž jasně nelze vyčíst negativní vliv přepnutí odbočky na síť NN. Bohužel doba měření není dostatečná, protože za minimální dobu potřebnou pro vyhodnocení dlouhodobé míry vjemu flikru se považuje minimálně týden, což v tomto případě není.



Obrázek 5.17 Přepnutí snižující odbočky na DRTR, pořizeno z kvalimetru dne 29.3.2015 v 20:50 hodin.

5.5.3 Provoz DRTR - nastavení parametrů regulace podle varianty 2

Varianta 2 má dle Tabulky 5.12 nastavené fázové napětí na hodnotě 234 V, což odpovídá úseku před zvýšením napětí v Analýze poskytnutých hodnot. Tato varianta byla na DRTR nastavená v období od 3:00 hodin 13. 4. 2015 do 9:00 hodin 23. 4. 2015.

Ve sledovaném období hodnocení P_{lt} vyšla na sekundární straně DRTR hodnota 0,3, která je znatelně menší než hodnota z varianty 1 s DRTR ($P_{ltV1}=0,57$), čímž je splněno kritérium $P_{lt} \leq 1$.

Hodnota P_{lt} v místě připojení FVE vyšla 1,46, čímž se oproti hodnotě se standardním DTR mírně zvýšila a tato hodnota je přibližně stejná jako u Varianty 1.

Výsledky vyhodnocení P_{lt} je vyjádřeno v Tabulce 5.18.

Tabulka 5.18 Výsledky hodnocení P_{lt} s DRTR varianty 2.

Na sekundární straně DRTR			V místě připojení FVE		
P_{lt} fáze 1	P_{lt} fáze 2	P_{lt} fáze 3	P_{lt} fáze 1	P_{lt} fáze 2	P_{lt} fáze 3
0,3027	0,2967	0,2994	1,4604	0,6713	0,7084

Během doby nastavení varianty 2 podle výsledků měření došlo k 26 přepnutím. Všechna přepnutí na rozdíl od Varianty 1 proběhla v celém sledovaném období, čímž nelze potvrdit či vyvrátit předchozí zjištění negativního vlivu přepnutí odbočky na síť NN.

Zajímavé je zjištění, že i když u této varianty došlo k více přepnutím (cca 5x více), P_{lt} zůstala v místě připojení FVE přibližně na stejné hodnotě jako u předchozí varianty 1.

5.5.4 Provoz DRTR - Celkové vyhodnocení nastavených variant

Pro určení nejvhodnější varianty nastavení DRTR došlo k porovnání výše naměřených hodnot se standardním transformátorem a variant 1 a 2. Získané hodnoty jsou zobrazeny v Tabulce 5.19. Výsledky hodnocení na sekundární straně DRTR ve všech fázích považují za přibližně stejné. Při variantě 2 s nejvíce přepnutím odbočky vyšlo hodnocení P_{lt} menší než se standardním DTR. Stejně hodnoty P_{lt} už ale nejsou vyhodnoceny v místě připojení FVE, kde jedna hodnota je téměř dvojnásobná oproti ostatním fázím. Tento vliv je způsobený připojenými jednofázovými přístroji (spotřebiči) v blízkosti připojení FVE, které svou činností způsobují znatelné kolísání napětí.

Tabulka 5.19 Závěrečné srovnání P_{lt} .

	Na sekundární straně DRTR			V místě připojení FVE		
	P_{lt} fáze 1	P_{lt} fáze 2	P_{lt} fáze 3	P_{lt} fáze 1	P_{lt} fáze 2	P_{lt} fáze 3
s DTR	0,5372	0,4858	0,5115	0,7521	0,7893	1,3621
DRTR Var. 1	0,5696	0,55	0,54	1,454	0,718	0,7646
DRTR Var. 2	0,3027	0,2967	0,2994	1,4604	0,6713	0,7084

Dle hodnocení počtu přepnutí odbočky (viz. Tabulka 5.20) vyšlo ve prospěch varianty 1, kde došlo k méně přepnutím oproti variantě 2. Tento rozdíl lze vysvětlit rozdílným počasím u obou variant a také výrobou OZE a odběrem spotřebitelů, kdy u varianty 1 docházelo pouze k přepínání snižující odbočky, tak ve variantě 2 došlo mimo přepnutí snižující odbočky i několikrát k přepnutí zvyšující odbočky na krátký čas (jednotky hodin).

Menší počet přepnutí je výhodnější, protože výrobci DRTR obvykle garantují řádově několik desítek tisíc přepnutí odbočky a poté je doporučena následná kontrola či oprava, která s sebou přináší zvýšené náklady na provoz.

Tabulka 5.20 Závěrečné srovnání počtu přepnutí odboček.

	Počet přepnutí odboček
s DTR	0
DRTR Var. 1	5
DRTR Var. 2	26

Závěr

Výsledkem mé diplomové práce je řešení současné problematiky zaměřené na téma udržení napětí v síti NN v dovolených mezích dané normou ČSN EN 50160.

V první kapitole jsou popsány používané transformátory v přenosové a distribuční síti v České republice a rozebrány jednotlivé regulační rozsahy a kroky.

Druhá kapitola se věnuje PPDS, ve které jsou ukázány rozdílné napěťové profily z dob před nárůstem OZE a dnes.

Třetí kapitola rozebírá dostupná opatření stabilizace napětí v síti NN.

Čtvrtá kapitola obsahuje výčet výrobců, kteří nabízejí DRTR.

Pátá kapitola, nazvaná případová studie, se věnuje samotnému návrhu sad regulačních parametrů pro nastavení DRTR dle provedené simulaci, analýze poskytnutých hodnot a dodržovaných postupů výrobce. Hodnotícími kritérii jsou počet přepnutých odboček a vliv kolísání napětí na síť NN. Během nastavení jednotlivých sad parametrů regulace jsem došel k rozdílným výsledkům z měření, které ukázaly při kombinaci několika rozdílných zdrojů OZE svou nepředvídatelnost výroby. První varianta regulačních parametrů byla nastavena za přítomnosti VTE s průměrným zvýšeným napětím 237 V. Tato varianta svůj účel splnila a pouze přepínala minimálně mezi nulovou a snižovací odbočkou DRTR, což značí dlouhodobou činnost VTE s kombinací denního diagramu FVE. Druhá varianta byla nastavena na přibližně obvyklé napětí 234 V, u níž došlo k většímu počtu přepnutí odboček a také i odbočky zvyšující napětí. Tato varianta měla hranici pro přepnutí odbočky nižší než varianta 1. Průběh měření značí, že kombinace zdrojů OZE s sebou přináší nejen pozitiva výroby energie v místě spotřeby ale také potřebu dostatečné kapacity napájení z PS pro záskok těchto zdrojů, které se v průběhu dne rychle mění.

Z výsledků této práce lze pozitivně zhodnotit osvědčení obou variant. Z vyhodnocení variant nastavení DRTR překvapivě plyne, že varianta 1 (se zvýšeným napětím 237 V) lépe splnila hodnocené kritérium na počet přepnutí odboček a varianta 2 (s přibližně obvyklým napětím 234 V) zase splnila lépe kritérium na kolísání napětí na sekundární straně DRTR. Z těchto výsledků nelze prokazatelně říci, že počet přepnutí odbočky má negativní vliv na kolísání napětí v síti NN. Nastavení dalších variant zabránily provozní komplikace (porucha DRTR a výměna transformátoru).

Na provedené nastavení regulačních parametrů by bylo velice dobré navázat s mnohem aktivnějším přístupem, kdy se navrhne několik variant a zadají se postupně během různých týdenních či měsíčních měření, ve kterých se budou sledovat dodávky výroby OZE a odběr

spotřebiteli s ohledem na počasí, a vyhodnotí se vhodnost nastavených parametrů regulace na různé počasí. Po dostatečném naplnění databáze regulačních parametrů pro nastavení DRTR se bude dle předpovědi počasí (u FVE sluneční svit, u VTE povětrnostní podmínky) volit různé nastavení regulačních parametrů. Tímto modelem by se efektivně zvolily parametry regulace DRTR, kterými by se zamezilo zbytečným a krátkodobým přepínáním na několik desítek minut, popř. hodin (časté přepínání bylo zjištěné ze zaznamenaných hodnot varianty 2).

Závěrem lze jen říci, že pokud se současně provozují různé typy OZE společně, které mají doby maximální a minimální výroby různé, mohou během dne nastat v mžiku rozdílné extrémní režimy, které byly při řešení této práce nasimulované. Do budoucna lze očekávat pozvolný nárůst nových OZE, které svojí dodávkou do DS sítě budou měnit rozevření napěťových nůžek, které s sebou přinese větší potřebu regulačních prvků.

Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] BERMANN, Jiří. *Transformátorová koncepce ČR+SR – stále aktuální a potřebná*. Konference ČK CIRED: ABB s.r.o., 2014, 13s.
- [2] MRAVEC, Rudolf. *Elektrické stroje a přístroje I.: Elektrické stroje*. 2. vyd. Praha: SNTL, 1982. 421 s.
- [3] VÁPENÍK, René. *Elektrorevue: Regulace napětí v distribuční soustavě vn a nn* [online]. 2011 [cit. 2015-01-10], roč. 13, č. 3, 6 s. Dostupné z: www.elektrorevue.cz/file.php?id=200000599-5a5255b4c5.
- [4] *PRAVIDLA PROVOZOVÁNÍ DISTRIBUČNÍCH SOUSTAV - Příloha č. 3: Kvalita napětí v distribuční soustavě, způsoby jejího zjišťování a hodnocení*. 2011, 43 s.
- [5] ČSN EN 50160. *Charakteristiky napětí elektrické energie dodávané z veřejných distribučních sítí*. ed. 3. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2011.
- [6] TESAŘOVÁ, Miloslava. *Přednáška z předmětu průmyslová energetika: Kvalita elektrické energie - odchylky napětí*. 2014, 30 prezentačních stran. Západočeská Univerzita v Plzni.
- [7] PNE 33 3430-2. *Podniková norma energetiky pro rozvod elektrické energie: Parametry kvality elektrické energie - Část 2: Kolísání napětí*. 3. vyd. Praha: České sdružení regulovaných elektroenergetických společností, 2012. Dostupné z: <http://www.csres.cz/CZ/podnikove-normy>.
- [8] TESAŘOVÁ, Miloslava a Milada ŠTROBLOVÁ. *Průmyslová elektroenergetika*. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2000, 154s. ISBN 80-7082-703-3.
- [9] KOPÁČEK, Milan. *Přednáška z Letní energetické akademie E.ON: Energetika v 21. století*. 2013, 24 prezentačních stran. E.ON České Budějovice.
- [10] KAŠPÍREK, Martin. *Dopad OZE na provoz distribučních NN sítí*. Conference ELEN: E.ON Česká republika s.r.o., 2012, 42 s.
- [11] KAŠPÍREK, Martin, Jan JIŘIČKA, David MEZERA, Martin HROUDNÝ, Aleš PROCHÁZKA a Daniel KOUBA. *Problematika stabilizace napětí ve VN a NN distribučních sítích v důsledku provozu OZE*. Conference ELEN: E.ON Česká republika s.r.o., 2012, 27 s.
- [12] KAŠPÍREK, Martin, Jan JIŘIČKA, Vratislav ŠTĚPKA, Jan VRZAL a Petr VACULÍK. *Nasazení a provoz transformátorů vn/nn s regulací napětí pod zatížením*. Konference ČK CIRED: E.ON Česká republika s.r.o.. 2013, 28 s.
- [13] KAŠPÍREK, Martin. *Dopad OZE na provoz distribučních NN sítí*. Conference ELEN: E.ON Česká republika s.r.o., 2012, 42 s.

- [14] KORENC, Vladimír a Tomáš BŮBELA. *Linkový kondicionér a jeho použití*. XI. Konference „Energetické rušení v distribučních sítích“, 2014, 6 s.
- [15] KORENC, Vladimír a Jiří HOLOUBEK. *Kompenzace jalového výkonu v praxi*. 1. vyd. Praha: IN-EL, 1999, 127 s. ISBN 80-862-3007-4.
- [16] HÁLA, Pavel a Břetislav LACINA. *Kompenzace v teorii a praxi s příklady výpočtů*, 7. svazek. Brno, 1994, 90 s.
- [17] ČEZ DISTRIBUCE, a.s., *Technická politika - rozvoj distribučních sítí a technologických prvků v DSO – Příloha č. 1: Koncepce kabelových sítí nn* [online]. 2006 [cit. 2015-01-22]. Dostupné z: <http://www.cezdistribuce.cz/edee/content/file-other/distribuce/technicke-informace/priloha-1.doc>.
- [18] Katalogové listy výrobců transformátorů ABB, BEZ, Efacec, Magtech, Reinhausen, Schneider Electric, Siemens.
- [19] Městys Drahany. [online]. [cit. 2015-02-26]. Dostupné z: <http://www.drahany.wz.cz/obec.html>
- [20] KULIŠ, Jakub. *Analýza zatížení a regulačních možností distribučních transformátorů*. Plzeň, 2013. 50 s. Diplomová práce. Západočeská Univerzita v Plzni.
- [21] RENO, Matthew J., Kyle COOGAN, Robert BRODERICK, Santiago GRIJALVA. Reduction of distribution feeders for simplified PV impact studies. In: *2013 IEEE 39th Photovoltaic Specialists Conference (PVSC)* [online]. 2013 [cit. 2015-03-17]. DOI: 10.2172/1095950.
- [22] JIŘIČKA, Jan a Miloslava TESAŘOVÁ. *Stanovení koeficientů soudobosti výroby FVE v závislosti na stálosti osvitu*. Konference ČK CIREĐ, 2012, 14 s.
- [23] VELEK, Vladimír. *Zkušenosti z provozu větrného parku 21 x 2 MW Kryštofovy Hamry - VI*. Konference ČK Cired, 2013, 16 s.
- [24] VELEK, Vladimír. *Farma VTE 3 x 2,3 MW U Tří Pánů - II*. Konference ČK Cired, 2013, 11 s.
- [25] ECZR-PP-DS-037. *Omezovací plán a dispečerské řízení výroby FVE a VTE připojených do DS E.ON v ČR*. 2015.
- [26] SIEMENS AG. *Bedienungsanleitung FITformer® REG: Der anpassungsfähige Ortsnetz-Transformator*. Erlangen, Germany, 2013. Dostupné z: www.siemens.com/energy/transformers.
- [27] E.ON DISTRIBUCE, a.s. *Popis distribuční soustavy E.ON*. E.ON Distribuce, a.s., Brno, 2006.
- [28] Parametry vedení a transformátorů. In: [online]. [cit. 2015-03-27]. Dostupné z: http://fei1.vsb.cz/kat410/studium/studijni_materialy/katalogy/parametry.doc.

Příloha A Porovnání hodnot regulačních transformátorů pro výkon 630 kVA.

Tabulka A.1 Porovnání hodnot regulačních transformátorů pro výkon 630 kVA.

Výrobce	ABB	BEZ	Efacec	Magtech	Reinhausen	Schneider Electric	Siemens
Jmenovitý výkon (kVA)	250 - 800	630, 1000	630, 1000, 1600	400, 630	250, 400, 630, 800	160, 250, 400, 630, 800, 1000	400, 630
Regulační rozsah při zatížení (%U _n)	± 4 x 2,5 %	± 6 x 3,3 %, ± 8 x 2,5 %	± 4 x 2,5 %	-6%	± 4 x 2,5 %	± 4 x 2,5 %	± 4,34 %
Zapojení vinutí	Dy	Dyn1	Yyn0(d1)	x	Dyn5	Dyn5, Dyn11	Dyn
Ztráty naprázdno (W)	1250	860	950	x	1100	1100	860
Ztráty nakrátko (W)	4760	5400	9650	x	4760	4760	6500
Napětí nakrátko (%)	6	6	6	x	5	4	4
Typ regulace, přepínač odboček	Hybridní přepínač	Mechanický přepínač	Mechanický přepínač	Magnetickým polem, plynulá regulace	Hybridní přepínač	Přepínač na principu výkonové elektroniky	Přepínač na principu výkonové elektroniky
Systém vzdálené komunikace	Rozhraní ethernet	Řeší si provozovatel	Řeší si provozovatel	x	Rozhraní ethernet	ADMS dohled	Rozhraní ethernet
Rozměry dxšxv (cm)	x	251x124x237	269x130x217	158x100x166	150x87x175	156x89x180	129x93x141
Hmotnost vč. oleje (kg)	x	3890	3900	2600	3150	3490	1650
Typ stání	x	x	vnitřní	venkovní	vnitřní	vnitřní	venkovní

Pole označené x – není známo

Příloha B Zjednodušení distribuční sítě VN a NN

Tabulka B.1 Seznam prvků v síti VN (výpis z programu E-vlivy).

Trafo	Název	U1 [kV]	U2 [kV]	St [MVA]	Pk [kW]	Uk [%]
	T102	110	22	25	163	11
	T2	22	0,4	0,16	2,35	4
	T3	22	0,4	0,25	3,25	4
	T4	22	0,4	0,25	3,25	4
	T5	22	0,4	0,25	3,25	4
	T6	22	0,4	0,4	4,6	4
	T7	22	0,4	0,4	4,6	4
	T8	22	0,4	0,16	2,35	4
	T9	22	0,4	0,16	2,35	4
	T10	22	0,4	0,25	3,25	4
	T11	22	0,4	0,25	3,25	4
	T12	22	0,4	0,25	3,25	4
	T13	22	0,4	0,25	3,25	4
	T14	22	0,4	0,16	2,35	4
	T15	22	0,4	0,63	6,5	4
	T16	22	0,4	0,25	3,25	4
	T17	22	0,4	0,4	4,6	4
	T18	22	0,4	0,4	4,6	4
	T19	22	0,4	0,4	4,6	4
	T20	22	0,4	0,63	6,5	4
	T21	22	0,4	0,4	4,6	4
	T22	22	0,4	0,4	4,6	4
	T23	22	0,4	0,25	3,25	4
	T24	22	0,4	0,63	6,5	4
	T25	22	0,4	0,63	6,5	4
	T26	22	0,4	0,63	6,5	4
	T27	22	0,4	0,4	4,6	4
	T28	22	0,4	1	10,5	6
	T29	22	0,4	0,25	3,25	4
	T30	22	0,4	0,4	4,6	4
	T31	22	0,4	0,16	2,35	4
	T32	22	0,4	0,25	3,25	4
	T33	22	0,4	0,25	3,25	4
	T34	22	0,4	0,4	4,6	4
	T35	22	0,4	0,4	4,6	4
	T36	22	0,4	0,16	2,35	4
	T37	22	0,4	0,25	3,25	4
	T38	22	0,4	0,25	3,25	4
	T39	22	0,4	0,16	2,35	4
	T40	22	0,4	0,25	3,25	4
	T41	22	0,4	0,25	3,25	4
	T42	22	0,4	0,25	3,25	4
	T43	22	0,4	0,25	3,25	4
	T44	22	0,4	0,63	6,5	4
	T45	22	0,4	0,25	3,25	4
	T46	22	0,4	0,25	3,25	4
	T47	22	0,4	0,4	4,6	4
	T48	22	0,4	0,25	3,25	4
	T49	22	0,4	0,16	2,35	4
	T50	22	0,4	0,25	3,25	4
	T51	22	0,4	0,25	3,25	4
	T52	22	0,4	0,4	4,6	4
	T53	22	0,4	0,25	3,25	4
	T54	22	0,4	0,25	3,25	4

Pokračování Tabulky B.1

Vedení	Název	Druh	Typ	R/km	X/km	B/km	Délka [km]	I _{max} [A]
	V26	kabel-22	240AxEKCY	0,128	0,198	94	0,35	506
	V29	kabel-22	240AxEKCY	0,128	0,198	94	0,6	506
	V30	venko-22	50AlFe6	0,615	0,396	1,407	0,9	177
	V31	venko-22	10/22AlFe6	0,259	0,368	1,46	1,2	318
	V1	venko-22	10/22AlFe6	0,259	0,368	1,46	2,81	318
	V28	venko-22	50AlFe6	0,615	0,396	1,407	0,5	177
	V27	venko-22	10/22AlFe6	0,259	0,368	1,46	5,675	318
	V25	venko-22	10/22AlFe6	0,259	0,368	1,46	1,4	318
	V32	venko-22	50AlFe6	0,615	0,396	1,407	2,693	177
	V24	venko-22	70AlFe6	0,434	0,391	1,427	2,4	225
	V33	venko-22	50AlFe6	0,615	0,396	1,407	0,9	177
	V35	venko-22	10/22AlFe6	0,259	0,368	1,46	1,271	318
	V42	venko-22	10/22AlFe6	0,259	0,368	1,46	0,888	318
	V41	venko-22	50AlFe6	0,615	0,396	1,407	1,4	177
	V40	venko-22	50AlFe6	0,615	0,396	1,407	0,627	177
	V39	venko-22	50AlFe6	0,615	0,396	1,407	1,6	177
	V38	venko-22	10/22AlFe6	0,259	0,368	1,46	1,14	318
	V34	venko-22	10/22AlFe6	0,259	0,368	1,46	0,83	318
	V36	venko-22	70AlFe6	0,434	0,391	1,427	2	225
	V37	venko-22	10/22AlFe6	0,259	0,368	1,46	1,17	318
	V23	venko-22	70AlFe6	0,434	0,391	1,427	0,844	225
	V22	venko-22	70AlFe6	0,434	0,391	1,427	0,375	225
	V21	venko-22	70AlFe6	0,434	0,391	1,427	0,542	225
	V8	venko-22	10/22AlFe6	0,259	0,368	1,46	3,631	318
	V7	venko-22	95AlFe6	0,301	0,374	1,448	1,14	289
	V6	venko-22	50AlFe6	0,615	0,396	1,407	1,6	177
	V5	venko-22	50AlFe6	0,615	0,396	1,407	0,371	177
	V4	venko-22	95AlFe6	0,301	0,374	1,448	1,208	289
	V9	venko-22	50AlFe6	0,615	0,396	1,407	1,861	177
	V2	venko-22	10/22AlFe6	0,259	0,368	1,46	5,911	318
	V3	venko-22	95AlFe6	0,301	0,374	1,448	1,123	289
	V10	venko-22	10/22AlFe6	0,259	0,368	1,46	1,61	318
	V11	venko-22	10/22AlFe6	0,259	0,368	1,46	1,207	318
	V12	venko-22	50AlFe6	0,615	0,396	1,407	1,843	177
	V18	venko-22	10/22AlFe6	0,259	0,368	1,46	1,025	318
	V19	venko-22	70AlFe6	0,434	0,391	1,427	1,5	225
	V20	venko-22	42/7AlFe6	0,667	0,421	1,837	0,9	163
	V43	venko-22	10/22AlFe6	0,259	0,368	1,46	0,638	318
	V17	venko-22	10/22AlFe6	0,259	0,368	1,46	1,855	318
	V15	venko-22	50AlFe6	0,615	0,396	1,407	1,7	177
	V16	venko-22	10/22AlFe6	0,259	0,368	1,46	1,24	318
	V13	venko-22	50AlFe6	0,615	0,396	1,407	1,4	177
	V14	venko-22	50AlFe6	0,615	0,396	1,407	2,4	177
	V44	venko-22	50AlFe6	0,615	0,396	1,407	2,544	177
Zátěž	Název	U [kV]	I [A]	cos φ _i	P [kW]	Q [kVAr]	S [kVA]	Q _k [kVAr]
	VTE3	22	-49,86	1,0	-1900,0	0,0	-1900,0	0,0
	VTE1	0,4	-144,34	1,0	-100,0	0,0	-100,0	0,0
	VTE2	22	-78,73	1,0	-3000,0	0,0	-3000,0	0,0
	FVE1	22	-41,99	1,0	-1600,0	0,0	-1600,0	0,0
	FVE2	0,4	-236,71	1,0	-164,0	0,0	-164,0	0,0

Tabulka B.2 Seznam prvků v síti NN (výpis z programu E-vlivy).

Vedení	Název	Druh	Typ	R/km	X/km	B/km	Délka [km]	I _{max} [A]
	V1	kabel-0,4	16AYKY16	1,935	0,082	1	0,038	70
	V33	kabel-0,4	70AYKY50	0,442	0,073	1	0,109	183
	V19	kabel-0,4	150NAYY	0,206	0,079	1	0,039	275
	V34	kabel-0,4	70AYKY50	0,442	0,073	1	0,109	183
	V18	kabel-0,4	150NAYY	0,206	0,079	1	0,055	275
	V35	kabel-0,4	35AYKY35	0,885	0,079	1	0,024	125
	V3	kabel-0,4	150NAYY	0,206	0,079	1	0,008	275
	V2	kabel-0,4	150NAYY	0,206	0,079	1	0,028	275
	V25	venko-0,4	70AlFe6_50	0,501	0,279	1	0,035	254
	V22	venko-0,4	70AlFe6_50	0,501	0,279	1	0,03	254
	V24	venko-0,4	70AlFe6_50	0,501	0,279	1	0,026	254
	V26	venko-0,4	70AlFe6_50	0,501	0,279	1	0,038	254
	V23	venko-0,4	70AlFe6_50	0,501	0,279	1	0,027	254
	V27	venko-0,4	70AlFe6_50	0,501	0,279	1	0,058	254
	V29	venko-0,4	70AlFe6_50	0,501	0,279	1	0,023	254
	V32	venko-0,4	70AlFe6_50	0,501	0,279	1	0,037	254
	V31	venko-0,4	70AlFe6_50	0,501	0,279	1	0,03	254
	V30	venko-0,4	70AlFe6_50	0,501	0,279	1	0,033	254
	V28	venko-0,4	70AlFe6_50	0,501	0,279	1	0,021	254
	V21	venko-0,4	70AlFe6_50	0,501	0,279	1	0,044	254
	V20	venko-0,4	70AlFe6_50	0,501	0,279	1	0,028	254
	V4	venko-0,4	2/7AlFe6_42	0,687	0,298	1	0,042	191
	V9	venko-0,4	2/7AlFe6_42	0,687	0,298	1	0,021	191
	V8	venko-0,4	2/7AlFe6_42	0,687	0,298	1	0,029	191
	V7	venko-0,4	2/7AlFe6_42	0,687	0,298	1	0,033	191
	V10	venko-0,4	2/7AlFe6_42	0,687	0,298	1	0,02	191
	V11	venko-0,4	2/7AlFe6_42	0,687	0,298	1	0,01	191
	V12	venko-0,4	2/7AlFe6_42	0,687	0,298	1	0,025	191
	V13	venko-0,4	2/7AlFe6_42	0,687	0,298	1	0,02	191
	V17	venko-0,4	2/7AlFe6_42	0,687	0,298	1	0,008	191
	V5	venko-0,4	2/7AlFe6_42	0,687	0,298	1	0,016	191
	V16	venko-0,4	2/7AlFe6_42	0,687	0,298	1	0,017	191
	V14	venko-0,4	2/7AlFe6_42	0,687	0,298	1	0,016	191
	V15	venko-0,4	2/7AlFe6_42	0,687	0,298	1	0,028	191
	V6	venko-0,4	2/7AlFe6_42	0,687	0,298	1	0,011	191

Pokračování Tabulky B.2

Zátěž	Název	U [kV]	I [A]	cos ϕ_i	P [kW]	Q [kVAr]	S [kVA]
	FVE22	0,4	-31,75	1,0	-22,0	0,0	-22,0
	125	0,4	25,0	0,9	15,59	7,55	17,32
	151	0,4	60,0	0,9	37,41	18,12	41,57
	191	0,4	32,0	0,9	19,95	9,66	22,17
	149	0,4	50,0	0,9	31,18	15,1	34,64
	180	0,4	25,0	0,9	15,59	7,55	17,32
	101	0,4	25,0	0,9	15,59	7,55	17,32
	40	0,4	50,0	0,9	31,18	15,1	34,64
	76	0,4	25,0	0,9	15,59	7,55	17,32
	64	0,4	66,0	0,9	41,15	19,93	45,73
	105	0,4	25,0	0,9	15,59	7,55	17,32
	82	0,4	25,0	0,9	15,59	7,55	17,32
	144	0,4	63,0	0,9	39,28	19,03	43,65
	140	0,4	25,0	0,9	15,59	7,55	17,32
	207	0,4	75,0	0,9	46,77	22,65	51,96
	134	0,4	25,0	0,9	15,59	7,55	17,32
	157	0,4	25,0	0,9	15,59	7,55	17,32
	179	0,4	25,0	0,9	15,59	7,55	17,32
	193	0,4	25,0	0,9	15,59	7,55	17,32
	156	0,4	25,0	0,9	15,59	7,55	17,32
	175	0,4	25,0	0,9	15,59	7,55	17,32
	183	0,4	25,0	0,9	15,59	7,55	17,32
	187	0,4	25,0	0,9	15,59	7,55	17,32
	190	0,4	25,0	0,9	15,59	7,55	17,32
	rwe	0,4	30,0	0,9	18,71	9,06	20,78
	153	0,4	25,0	0,9	15,59	7,55	17,32
	75	0,4	25,0	0,9	15,59	7,55	17,32
	194	0,4	25,0	0,9	15,59	7,55	17,32
	137	0,4	25,0	0,9	15,59	7,55	17,32
	152	0,4	25,0	0,9	15,59	7,55	17,32
	98	0,4	25,0	0,9	15,59	7,55	17,32
	150	0,4	25,0	0,9	15,59	7,55	17,32
	171	0,4	25,0	0,9	15,59	7,55	17,32
	185	0,4	25,0	0,9	15,59	7,55	17,32
	164	0,4	25,0	0,9	15,59	7,55	17,32
	167	0,4	25,0	0,9	15,59	7,55	17,32
	169	0,4	25,0	0,9	15,59	7,55	17,32
	41	0,4	25,0	0,9	15,59	7,55	17,32
	132	0,4	25,0	0,9	15,59	7,55	17,32
	141	0,4	25,0	0,9	15,59	7,55	17,32
	146	0,4	25,0	0,9	15,59	7,55	17,32
	142	0,4	20,0	0,9	12,47	6,04	13,86
	145	0,4	25,0	0,9	15,59	7,55	17,32
	88	0,4	25,0	0,9	15,59	7,55	17,32
	155	0,4	25,0	0,9	15,59	7,55	17,32
	138	0,4	25,0	0,9	15,59	7,55	17,32

Tabulka B.3 Seznam prvků ve zjednodušené síti VN a NN (výpis z programu E-vlivy).

Trafo	Název	U1 [kV]	U2 [kV]	St [MVA]	Pk [kW]	Uk [%]	io [%]	Po [kW]
	T102	110	22	25	163	11	0	0
	T39	22	0,4	0,16	4,6	4	0	0
Vedení	Název	Druh	Typ	R/km	X/km	B/km	Délka [km]	I _{max} [A]
	V5NN	kabel-0,4	35AYKY35	0,02124	0,001896	1	1	125
	V4NN	kabel-0,4	70AYKY50	0,024089	0,003979	1	1	183
	V1NN	venko-0,4	?/7AlFe6_42	0,210768	0,091052	1	1	191
	V3NN	venko-0,4	70AlFe6_50	0,184694	0,099496	1	1	254
	V2NN	venko-0,4	70AlFe6_50	0,031563	0,017577	1	1	254
	V3VN	venko-22	10/22AlFe6	0,3626	0,5152	1,46	1	318
	V6VN	venko-22	10/22AlFe6	1,537683	2,184816	1,46	1	318
	V4VN	venko-22	10/22AlFe6	1,469825	2,0884	1,46	1	1
	V2VN	venko-22	10/22AlFe6	5,099769	9,006202	1,448	1	289
	V5VN	venko-22	10/22AlFe6	0,3108	0,4416	1,46	1	1
Zátěž	Název	U [kV]	I [A]	cos φ	P [kW]	Q [kVAr]	S [kVA]	Q _k [kVAr]
	FVE22	0,4	-31,75	1,0	-22,0	0,0	-22,0	0,0
	VTE3	22	-49,86	1,0	-1900,0	0,0	-1900,0	0,0
	VTE1	22	-2,62	1,0	-100,0	0,0	-100,0	0,0
	FVE1	22	-41,99	1,0	-1600,0	0,0	-1600,0	0,0
	VTE2	22	-78,73	1,0	-3000,0	0,0	-3000,0	0,0
	Z2	22	160,6	0,95	5803,83	1941,09	6119,83	0,0
	Z25	22	14,16	0,97	521,71	138,02	539,65	0,0
	Z19	0,4	27,65	0,95	18,2	5,96	19,15	0,0
	Z71	0,4	49,9	0,95	32,79	10,96	34,57	0,0
	Z31	0,4	26,23	0,95	17,31	5,53	18,17	0,0
	Z33	0,4	4,83	0,95	3,18	1,04	3,35	0,0
	Z35	0,4	13,02	0,95	8,57	2,82	9,02	0,0
	Z95	22	28,77	0,95	1041,5	342,33	1096,32	0,0
	Z70	22	40,54	0,95	1467,58	482,37	1544,82	0,0
	Z36	0,4	5,38	0,95	3,54	1,16	3,73	0,0
	FVE2	22	-4,3	1,0	-164,0	0,0	-164,0	0,0

Příloha C Tabulky transformátorových stupňů

Tabulka C.1 Hodnoty pro transformátorový stupeň 3 %.

- DOLNÍ MEZ

Velikost transformátor. stupně [%]	Velikost transformátor. stupně [V]	Část transformátor. stupně [%]	Část transformátor. stupně [V]	Přepínání při napětí [V]	Přepnutí na napětí [V]
- 3,0%	7,074	40%	2,8296	232,9704	239,9595
		45%	3,1833	232,6167	239,5952
		50%	3,537	232,263	239,2309
		55%	3,8907	231,9093	238,8666
		60%	4,2444	231,5556	238,5023
		65%	4,5981	231,2019	238,138
		70%	4,9518	230,8482	237,7736
		75%	5,3055	230,4945	237,4093
		80%	5,6592	230,1408	237,045
		85%	6,0129	229,7871	236,6807
		90%	6,3666	229,4334	236,3164
		95%	6,7203	229,0797	235,9521
		100%	7,074	228,726	235,5878

- HORNÍ MEZ

Velikost transformátor. stupně [%]	Velikost transformátor. stupně [V]	Část transformátor. stupně [%]	Část transformátor. stupně [V]	Přepínání při napětí [V]	Přepnutí na napětí [V]
3,0%	7,074	40%	2,8296	238,6296	231,4707
		45%	3,1833	238,9833	231,8138
		50%	3,537	239,337	232,1569
		55%	3,8907	239,6907	232,5
		60%	4,2444	240,0444	232,8431
		65%	4,5981	240,3981	233,1862
		70%	4,9518	240,7518	233,5292
		75%	5,3055	241,1055	233,8723
		80%	5,6592	241,4592	234,2154
		85%	6,0129	241,8129	234,5585
		90%	6,3666	242,1666	234,9016
		95%	6,7203	242,5203	235,2447
		100%	7,074	242,874	235,5878

Tabulka C.2 Hodnoty pro transformátorový stupeň 3,5 %.

- DOLNÍ MEZ

Velikost transformátor. stupně [%]	Velikost transformátor. stupně [V]	Část transformátor. stupně [%]	Část transformátor. stupně [V]	Přepínání při napětí [V]	Přepnutí na napětí [V]
- 3,5%	8,253	40%	3,3012	232,4988	240,6363
		45%	3,71385	232,0862	240,2092
		50%	4,1265	231,6735	239,7821
		55%	4,53915	231,2609	239,355
		60%	4,9518	230,8482	238,9279
		65%	5,36445	230,4356	238,5008
		70%	5,7771	230,0229	238,0737
		75%	6,18975	229,6103	237,6466
		80%	6,6024	229,1976	237,2195
		85%	7,01505	228,785	236,7924
		90%	7,4277	228,3723	236,3653
		95%	7,84035	227,9597	235,9382
100%	8,253	227,547	235,5111		

- HORNÍ MEZ

Velikost transformátor. stupně [%]	Velikost transformátor. stupně [V]	Část transformátor. stupně [%]	Část transformátor. stupně [V]	Přepínání při napětí [V]	Přepnutí na napětí [V]
3,5%	8,253	40%	3,3012	239,1012	230,7327
		45%	3,71385	239,5139	231,1309
		50%	4,1265	239,9265	231,5291
		55%	4,53915	240,3392	231,9273
		60%	4,9518	240,7518	232,3255
		65%	5,36445	241,1645	232,7237
		70%	5,7771	241,5771	233,1219
		75%	6,18975	241,9898	233,5201
		80%	6,6024	242,4024	233,9183
		85%	7,01505	242,8151	234,3165
		90%	7,4277	243,2277	234,7147
		95%	7,84035	243,6404	235,1129
100%	8,253	244,053	235,5111		

Tabulka C.3 Hodnoty pro transformátorový stupeň 4 %.

- DOLNÍ MEZ

Velikost transformátor. stupně [%]	Velikost transformátor. stupně [V]	Část transformátor. stupně [%]	Část transformátor. stupně [V]	Přepínání při napětí [V]	Přepnutí na napětí [V]
- 4,0%	9,432	40%	3,7728	232,0272	241,3083
		45%	4,2444	231,5556	240,8178
		50%	4,716	231,084	240,3274
		55%	5,1876	230,6124	239,8369
		60%	5,6592	230,1408	239,3464
		65%	6,1308	229,6692	238,856
		70%	6,6024	229,1976	238,3655
		75%	7,074	228,726	237,875
		80%	7,5456	228,2544	237,3846
		85%	8,0172	227,7828	236,8941
		90%	8,4888	227,3112	236,4036
		95%	8,9604	226,8396	235,9132
100%	9,432	226,368	235,4227		

- HORNÍ MEZ

Velikost transformátor. stupně [%]	Velikost transformátor. stupně [V]	Část transformátor. stupně [%]	Část transformátor. stupně [V]	Přepínání při napětí [V]	Přepnutí na napětí [V]
4,0%	9,432	40%	3,7728	239,5728	229,9899
		45%	4,2444	240,0444	230,4426
		50%	4,716	240,516	230,8954
		55%	5,1876	240,9876	231,3481
		60%	5,6592	241,4592	231,8008
		65%	6,1308	241,9308	232,2536
		70%	6,6024	242,4024	232,7063
		75%	7,074	242,874	233,159
		80%	7,5456	243,3456	233,6118
		85%	8,0172	243,8172	234,0645
		90%	8,4888	244,2888	234,5172
		95%	8,9604	244,7604	234,97
100%	9,432	245,232	235,4227		