ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ

KATEDRA ELEKTROENERGETIKY A EKOLOGIE

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Analýza zatížení a regulačních možností distribučních transformátorů

Jakub Kuliš **2013**

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
Fakulta elektrotechnická
Akademický rok: **2012/2013**

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení:	**Jakub KULIŠ**
Osobní číslo:	**E11N0190P**
Studijní program:	**N2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor:	**Elektroenergetika**
Název tématu:	**Analýza zatížení a regulačních možností distribučních transformátorů**
Zadávající katedra:	**Katedra elektroenergetiky a ekologie**

Zásady pro vypracování:

1. Uveďte typy transformátorů, které se v současné době využívají v transformačních stanicích z hlediska jejich konstrukce, způsobu chlazení a izolace vinutí, možnosti regulace napětí, výkonu a zapojení. Porovnejte jejich provozní vlastnosti a možnosti použití.
2. Uveďte a rozpracujte hlediska, z nichž se vychází při návrhu typu, velikosti a počtu transformátorů v transformační stanici, např. předpokládané zatížení, ztráty transformátoru, investiční náklady, možnost paralelní spolupráce více transformátorů, nasazení transformátoru s regulací pod zatížením atd.
3. Popište účel a druh měření prováděných v transformačních stanicích ve vybraném regionu, jaké parametry se sledují dlouhodobě a jaké krátkodobě.
4. Na základě archivních dat vyhodnoťte měření zatížení vybraných transformačních stanic a analyzujte průměrné využití transformátorů dle jejich jmenovitého výkonu.
5. Popište problematiku regulace napětí v distribuční síti a analyzujte možnost nasazování regulačních transformátorů 22 kV/nn v souvislosti se zvyšujícím se počtem distribuovaných zdrojů zapojených do sítí 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

Konzultant diplomové práce: **Ing. Martin Kašpírek, PhD.**
E. ON Česká republika, s.r.o.

Datum zadání diplomové práce: **15. října 2012**

Termín odevzdání diplomové práce: **9. května 2013**

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

L.S.

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

V Plzni dne 15. října 2012

Anotace

Jakub Kuliš. Analýza zatížení a regulačních možností distribučních transformátorů. Katedra elektroenergetiky a ekologie, Západočeská univerzita v Plzni – Fakulta elektrotechnická, 2013, počet stran: 50, vedoucí práce: Doc. Ing. Miloslava Tesařová, Ph.D.
Předkládaná diplomová práce pojednává o distribučních transformátorech. V první části práce pojednává o distribuční soustavě, základním principu, ztrátách, konstrukci a hledisek při návrhu těchto transformátorů. Je zde uvedena analýza zatížení distribučních transformátorů současného stavu s teoretickým návrhem řešení a opatření. Dále se práce zabývá problematikou regulace napětí, která je zde reprezentována výpočty a různými úvahami.

Abstract

Jakub Kuliš. Analysis of Load and Voltage Control Capability of Distribution Transformers. Department of Electrical Power Engineering and Ecology. University of West Bohemia in Pilsen – Faculty of electrical engineering, 2013, number of pages: 50, supervisor: Doc. Ing. Miloslava Tesařová, Ph.D.

This diploma thesis deals with distribution transformers. The first part is concerned with a distribution system, the basic principle of a transformer, its losses, design and design considerations. There is an analysis of load of distribution transformers and current solutions. There follows the theoretical design of a transformer together with proposed improvements to the current solutions.solutions Next the work deals with the voltage control capability, both in terms of theoretical and practical calculations.

Klíčová slova

Distribuční soustava, distribuční transformátor, analýza, zatížení, regulace napětí

Key Words

Distribution systém, distribution transformer, analysis, load, voltage control

Prohlášení

Předkládám 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.

V Plzni dne 5.5.2013

Jméno příjmení

……...

Poděkování

Rád bych touto příležitostí poděkoval vedoucí diplomové práce doc. Ing. Miloslavě Tesařové, Ph.D. a konzultantovi Ing. Martinu Kašpírkovi, Ph.D. ze společnosti E.ON Česká republika, s.r.o. za cenné profesionální rady a připomínky. Poděkování také patří celé mé rodině za podporu při studiu.

Obsah

OBSAH **8**

ÚVOD **10**

SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK **11**

1 DISTRIBUČNÍ SOUSTAVA (DS) **12**

2 DISTRIBUČNÍ TRANSFORMÁTOR (DTR) **12**

2.1 PRINCIP TRANSFORMÁTORU 13
2.2 ZTRÁTY TRANSFORMÁTORU 14
2.2.1 Jádro DTR *15*
2.2.2 Nízkoztrátový transformátor *16*
2.3 KONSTRUKCE DTR 16
2.3.1 Olejová nádoba *17*
2.3.2 Vysokonapěťové vinutí *17*
2.3.3 Nízkonapěťové vinutí *17*
2.4 CHLAZENÍ TRANSFORMÁTORU 18
2.5 PROVOZNÍ VLASTNOSTI DTR A JEJICH POUŽITÍ 19

3 HLEDISKA PŘI NÁVRHU DTR **20**

3.1 PARALELNÍ CHOD TRANSFORMÁTORŮ 22
3.2 ZATÍŽITELNOST TRANSFORMÁTORU 24
3.3 INVESTIČNÍ NÁKLADY 24
3.4 STUPEŇ ZAJIŠTĚNÍ DODÁVKY (SZD) 25

4 ZATÍŽENÍ DISTRIBUČNÍCH TRANSFORMÁTORŮ **25**

4.1 PROCES SLEDOVÁNÍ ZATÍŽENÍ DTR 26
4.1.1 Ampérmetr EAM 1 ..... *27*
4.1.2 Voltmetr MEg10 ..... *29*
4.2 ANALÝZY MĚŘENÍ 29
4.3 ZÁVĚR Z ANALÝZY MĚŘENÍ 31

5 REGULACE NAPĚTÍ **32**

5.1 REGULACE NA HLADINĚ VYSOKÉHO NAPĚTÍ 33
5.1.1 Regulace s ohledem na zatížení sítě (regulace s kompaundací) *33*
5.1.2 Regulace na konstantní napětí *34*
5.2 REGULACE NA HLADINĚ NÍZKÉHO NAPĚTÍ 36
5.2.1 Regulace v beznapěťovém stavu DTR *36*
5.2.2 Regulace napětí při zatížení DTR *38*
5.3 ANALÝZA REGULAČNÍCH TRANSFORMÁTORŮ 22 KV/NN 39
5.4 VLIV OZE NA PROVOZ DISTRIBUČNÍ SÍTĚ NN 42
5.4.1 Síť nn s DTR 22/0,42 kV *42*
5.4.2 Síť nn s DTR 22/0,4 kV *45*

ZÁVĚR 48

SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ 49

PŘÍLOHY.....1

Úvod

Neustálý růst spotřeby elektrické energie zvyšuje nároky nejen z kvantitativního zajištění požadavků spotřebitelů, ale v neposlední řadě i z hlediska dodržení kvality dodávané elektrické energie a to vše při zachování ekonomických kritérií. Cílem mé diplomové práce je analyzovat soubor naměřených hodnot zatížení distribučních transformátorů, které jsem obdržel prostřednictvím útvaru Kontroly kvality E.ON Česká republika, s.r.o. Z hospodárného hlediska DS je nutné analyzovat zatížení transformátorů. Znalost zatížení umožňuje účinné nasazování strojů nejen při jejich obnově, ale současně jde i o predikci pro nasazení DTR do oblastí, které jsou svým charakterem srovnatelné s oblastí, kde je již měření dlouhodobě využíváno (např. chatové oblasti a sídliště rodinných domů). Dalším úkolem je teoretická analýza regulačních možností distribučních transformátorů. Hodnota napětí, jehož velikost se může pohybovat v mezích stanovených normou, je jedním z kritérií pro posouzení kvality napětí. Nastavení správné velikosti napětí ovlivňuje bezchybný provoz elektrických spotřebičů a technické ztráty. Regulace napětí je záležitost, při které je nutné dodržovat zásady hospodárnosti i spolehlivosti pro provoz distribuční soustavy. Ve společnosti E.ON Česká republika, s.r.o. se touto problematikou zabývá útvar Kontroly kvality.

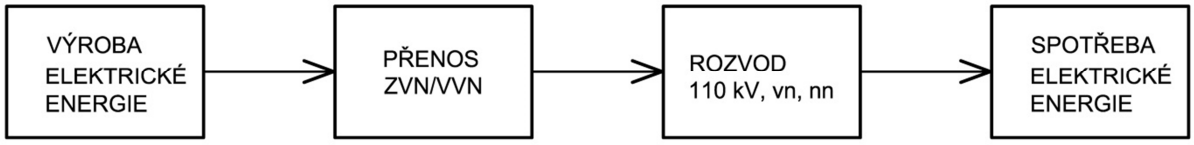
Text je rozdělen do pěti částí. První část práce popisuje distribuční soustavu jako celek. Druhá část popisuje princip a ztráty transformátoru. Ve třetí části jsou zpracována různá hlediska při návrhu typu a počtu distribučních transformátorů. Čtvrtá část obsahuje zpracování, výsledky a grafy analýzy zatížení distribučních transformátorů. Poslední část předkládá úvahy a teoretický rozbor regulačních možností distribučních transformátorů.

Seznam symbolů a zkratek

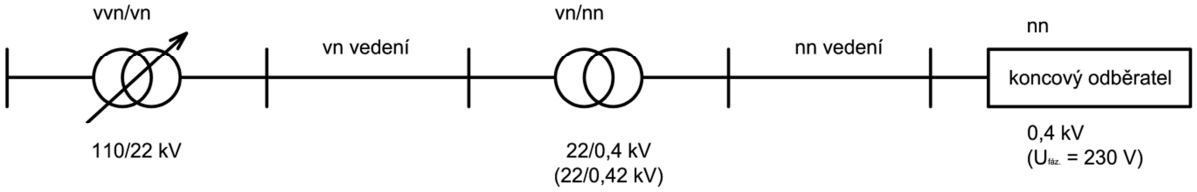
ČSN EN	harmonizovaná česká technická norma
DS	Distribuční soustava
DTR	Distribuční transformátor
DTS	Distribuční transformační stanice
ES	Elektrizační soustava
FVE	fotovoltaická elektrárna
HDO	Hromadné dálkové ovládání
nn	nízké napětí
OZE	obnovitelné zdroje energie
vn	vysoké napětí
vvn	velmi vysoké napětí

1 Distribuční soustava (DS)

Distribuční soustava je jeden z nejdůležitějších celků elektrizační soustavy (ES) definovaný jako vzájemně propojený soubor vedení a zařízení na napěťových hladinách VVN (110kV), vyjma některých vedení a zařízení, která jsou již součástí přenosové soustavy. Dále DS tvoří hladiny vn (10, 22, 35kV) a nn (0,4kV) a různé systémy (HDO, měřící, zabezpečovací, řídící, ochranné, telekomunikační, vf přenos informací …). Dříve do hladiny vn v DS patřily také hodnoty napětí 3 a 6kV. V dnešní době se jedná spíše o výjimku. Tyto hodnoty tvoří rozvody areálů velkých průmyslových závodů, kde sice slouží k distribuci, ale v dnešním slova smyslu se distribucí rozumí tok elektřiny k zákazníkovi a to co má zákazník v interní instalaci. Distribuční vedení je to, co vlastní distributor. V tomto případě jsou domovní rozvody v majetku zákazníka. Převážná část sítě 110kV je napájena prostřednictvím transformátorů přenosové soustavy 400/110kV zapojených paralelně. Distribuční síť 22kV je provozována obvykle paprskově, většinou s možností propojení (např. při poruše) konstrukčně tzv. do „kruhu“. Pouze ve výjimečných případech (zvýšení spolehlivosti, zlepšení napěťových poměrů, …) se tato síť provozuje paralelně. U nn sítě se využívá paprskového provozování, ve výjimečných případech se síť provozuje jako polomřížová či mřížová (u vysoké hustoty zatížení). Hlavním úkolem DS je zajištění distribuce elektrické energie z přenosové soustavy ke koncovým odběratelům v požadovaném množství a kvalitě v daném čase. DS slouží také pro připojování výroben elektrické energie až do výkonu desítek MW.



Obr. 1.1 Elektrizační soustava (ES)



Obr. 1.2 Schéma distribuční soustavy (DS)

2 Distribuční transformátor (DTR)

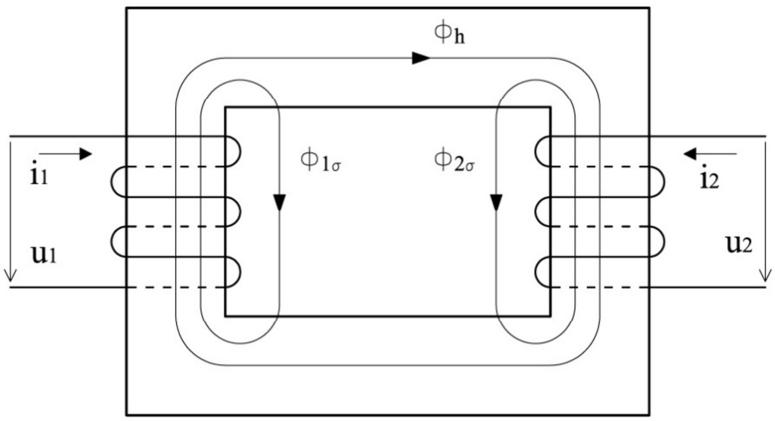
Jedním z nejdůležitějších prvků hlavního silového obvodu transformoven je distribuční transformátor. Pod pojmem distribuční transformátor si dříve nejen každý provozní technik představil transformátor s převodem 22/0,4 kV osazující venkovní (především koncové stožáry vedení VN) či vnitřní transformační stanici (TS). V současné době norma ČSN 33 0120 nařizuje napětí zdroje 420V a napětí spotřebiče 400V. Od roku 2009 tedy využívá společnost E.ON Distribuce, a.s. nové standardní DTR s převodem 22/0,42 kV. Tyto distribuční transformátory se vyrábějí podle velikosti předpokládaného odběru o různých výkonech s odlišným zapojením vinutí. U spojovacích transformátorů patřících do distribuční soustavy 110/22 kV se využívá zapojení vinutí YNy a YNd. U transformátorů 22/0,4(0,42) kV jsou různá zapojení vinutí podle jmenovitého výkonu, viz tabulka 2.1.

Tab. 2.1 Výkony a zapojení vinutí DTR 22/0,4(0,42)kV

Výkon DTR (kVA)	50	100	160	250	400	630
Zapojení vinutí	Yzn1	Yzn1	Yzn1	Dyn1	Dyn1	Dyn1

2.1 Princip transformátoru

Transformátor, jakožto netočivý elektrický stroj, pracuje na principu elektromagnetické indukce. Úlohou transformátoru je změna střídavého napětí na jinou hodnotu při nezměněném kmitočtu. Fyzikální princip vychází z II. Maxwellovy rovnice. Jednotlivé vztahy vycházejí z obr. 2.1.



Obr. 2.1 Zjednodušené uspořádání transformátoru

Pro magnetické toky platí:

$$\Phi_1(t) = \Phi_h(t) + \Phi_{1\sigma}(t) \tag{2.1}$$

$$\Phi_2(t) = \Phi_h(t) + \Phi_{2\sigma}(t) \tag{2.2}$$

$$\Phi_h(t) = \Phi_{1h}(t) + \Phi_{2h}(t) \tag{2.3}$$

Indukované napětí:

$$u_{i1}(t) = N_1 \cdot \frac{d\Phi_1(t)}{dt} \tag{2.4}$$

$$u_{i2}(t) = N_2 \cdot \frac{d\Phi_2(t)}{dt} \tag{2.5}$$

Zavedení spřaženého toku ψ pro konkrétní vinutí:

$$\psi = N \cdot \Phi \tag{2.6}$$

Z čehož pro indukované napětí platí:

$$u_i(t) = \frac{d\psi}{dt} \tag{2.7}$$

Harmonický časový průběh magnetického toku:

$$\Phi(t) = \Phi_m \sin(\omega t + \alpha) \tag{2.8}$$

Pro praktické použití dostáváme po úpravách vztahů 2.6, 2.7 a 2.8 vztah pro indukované napětí ve tvaru:

$$U_{im} = \omega N \phi_m \tag{2.9}$$

Pro efektivní hodnotu platí:

$$U_i = \frac{U_{im}}{\sqrt{2}} = \frac{2\pi f}{\sqrt{2}} N\phi_m = 4{,}44\, N\phi_m f \tag{2.10}$$

Ze vztahu 2.10 můžeme určit jeden z nejzákladnějších parametrů transformátoru a to převod. Bývá označován symbolem „p“.

$$p = \frac{U_1}{U_2} = \frac{4{,}44 N_1 \phi_m f}{4{,}44 N_2 \phi_m f} = \frac{N_1}{N_2} \tag{2.11}$$

Pro poměr proudů využijeme rovnost příkonů:

$$P_1 = P_2 \tag{2.12}$$

$$U_1 I_1 = U_2 I_2 \tag{2.13}$$

Pro úplnou rovnici převodu platí:

$$k = \frac{U_1}{U_2} = \frac{I_2}{I_1} = \frac{N_1}{N_2} \tag{2.14}$$

2.2 Ztráty transformátoru

Ztráty na transformátoru lze rozdělit na ztráty v železe ΔP_0 (naprázdno) a ztráty v mědi ΔP_k (nakrátko).

- Ztráty naprázdno – nejsou závislé na zatížení. Jedná se především o ztráty v magnetickém obvodu transformátoru.
- Ztráty nakrátko – jsou závislé na zatížení. Jedná se o ztráty způsobené ohmickým odporem cívky, která tvoří primární a sekundární vinutí.

Pro celkové ztráty na transformátoru platí:

$$\Delta P_{celk} = \Delta P_0 + \Delta P_k \cdot \left(\frac{I}{I_n}\right)^2 \text{, kde} \tag{2.15}$$

I – skutečný proud

I_n – jmenovitý proud

Za povšimnutí stojí příklad určení velikosti zatížení (proudu), od kdy je výhodnější provozovat dva transformátory s poloviční jmenovitým výkonem s ohledem na minimalizaci ztrát.

Úvaha:

K dispozici máme 1×TR1 a 2×TR2 o poloviční výkonu s následujícími parametry.

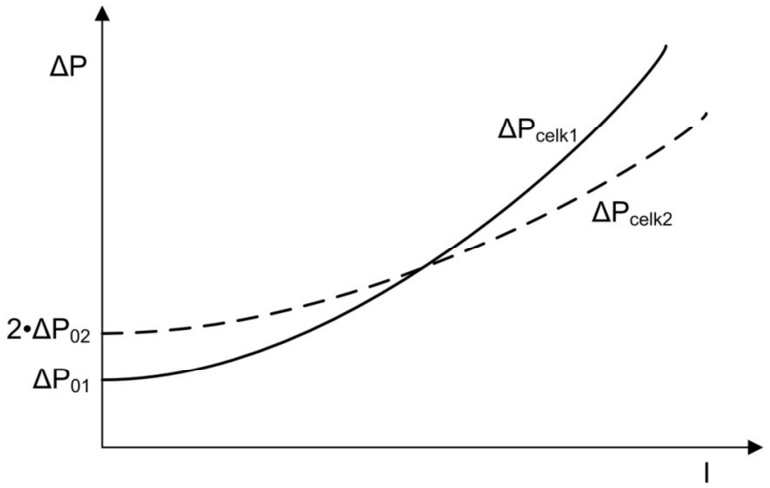
1. 1×TR1: $\Delta P_{01}, \Delta P_{k1}, I_{n1}$
2. 2×TR2: $\Delta P_{02}, \Delta P_{k2}, I_{n1} = \frac{I_{n1}}{2}$

Aby pro oba případy platila rovnost ztrát, musí platit:

$$\Delta P_{01} + \Delta P_{k1} \cdot \left(\frac{I}{I_{n1}}\right)^2 = 2 \cdot \left[\Delta P_{02} + \Delta P_{k2} \cdot \left(\frac{2 \cdot I}{I_{n2}}\right)^2\right] \tag{2.16}$$

Po úpravách výrazu 2.16 dostáváme pro velikost proudu vztah:

$$I = I_{n1} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta P_{02} - \Delta P_{01}}{\Delta P_{k1} - 8 \cdot \Delta P_{k2}}} \tag{2.17}$$

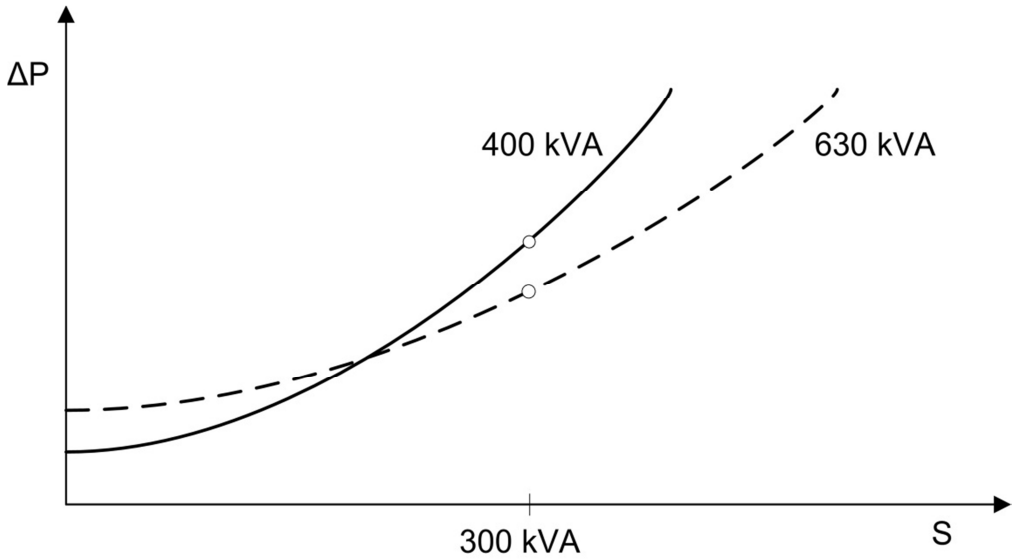


Obr. 2.2 Celkové ztráty v závislosti na zatížení (proudu) pro případ 1×TR1 a 2×TR2 o polovičním výkonu

Při velikosti proudu (dle rovnice 2.17) jsou pro případ 1×TR1 a případ 2×TR2 o polovičním výkonu celkové ztráty stejné. Z obr. 2.2 vyplývá, že pokud by byl proud větší než dle rovnice 2.17, celkové ztráty by byly menší při provozu 2×TR2 o polovičním výkonu.

V praxi (např. dřevozpracující průmysl napájen vlastním TR 630 kVA) dochází 5× týdně v délce cca 8 hodin denně za plného provozu k odběru cca 260 A. Mimo plný provoz je odběr cca 60A. Pokud by došlo k pořízení TR 63kVA, který by byl nasazován v době mimo plný provoz, činila by návratnost investice na ušetřených ztrátách za 5 až 10 let.

Při návrhu DTR je nutné přihlížet na zatížení, které určuje ztráty transformátoru. Pro názornost předkládám obr. 2.3, kde je znázorněno zatížení 300 kVA pro transformátory o jmenovitém výkonu 400 a 630 kVA.



Obr. 2.3 Volba výkonu DTR dle celkových ztrát

Z obr. 2.3 vyplývá, že pro zatížení 300 kVA by byl transformátor 400 kVA dosti zatížen, což by způsobilo velké ztráty. Je tedy vhodné použít DTR o jmenovitém výkonu 630 kVA.

2.2.1 Jádro DTR

Jak již bylo zmíněno, se ztrátami naprázdno vysoce souvisí kvalita magnetického obvodu.

Pro jádro všech typů DTR platí stejné vlastnosti a podmínky.

Pro návrh jader DTR jsou tyto předepsané parametry:

1. Proud naprázdno
2. Ztráty naprázdno
3. Hlučnost

Pro DTR se používají za studena válcované plechy se ztrátovým číslem zhruba 0,85 W/kg. Jestliže je vyžadováno snížení ztrát, používá se tzv. Hi-B-plech, díky kterému můžou být ztráty naprázdno sníženy až o 15 % a hlučnost o 5-7 dB. Jednotlivé plechy jsou mnohonásobně překryty, čímž jsou omezeny ztráty. Proti korozi jsou chráněny pomocí dvousložkového laku. Jádro je fixováno pomocí rámu, který se skládá z horního a spodního stahovacího profilu. Tyto profily jsou spojeny závitovou tyčí.
Ke snížení ztrát tedy vede nahrazování starých DTR s neorientovanými plechy novými DTR s plechy orientovanými, válcovanými za studena. U těchto plechů jsou hrany krystalů rovnoběžné se směrem válcování, což způsobuje lepší permeabilitu a malé měrné ztráty.

2.2.2 Nízkoztrátový transformátor

Vlivem štědré dotační politiky státu vychází spousta společností, které nabízejí nabízející nízkoztrátové transformátory, vstříc svým zákazníkům z řad investorů a provozovatelů obnovitelných zdrojů. Zejména se jedná o fotovoltaické a větrné elektrárny. Vše vychází z vysoké výkupní ceny elektrické energie, kterou omezují vzniklé ztráty při výrobě energie. Jedním z nejhlavnějších dodavatelů těchto transformátorů pro Českou republiku je společnost BEZ Transformátory, a.s.. Uvádím tabulku 2.2 s porovnáním ztrát u nejvíce nasazovaných DTR o jmenovitém výkonu 400 kVA.

Tab. 2.2 Porovnání ztrát u DTR 400 kVA se standardními a redukovanými ztrátami

DTR 22/0,42 kV 400 kVA	TR se standardními ztrátami	TR s redukovanými ztrátami
P_o (W)	930	610
P_k (W)	6000	4600

Pro přibližnou představu významu ztrát uvádím následující kalkulaci[1] přibližující reálnou situaci:
FVE: $P_{inst.}$=1 MW, $P_{reálný\ špičkový}$=950 kW, $P_{dlouhodobě\ dodávaný}$=400 kW
TR: **varianta 1**: p_0=1100 W, p_k=11600 W → Tomu odpovídají ztráty za jeden rok provozu 15204 kWh. Uvažujme výkupní cenu 12,- Kč/1 kWh. Poté jsou roční ztráty 182448,- Kč.

varianta 2 (snížené ztráty o 20 %): : p_0=880 W, p_k=9280 W → Tomu odpovídají ztráty za jeden rok provozu 12163 kWh. Uvažujme výkupní cenu 12,- Kč/1 kWh. Poté jsou roční ztráty 145958,- Kč.
Roční úspora činí 36490,- Kč. Navýšení ceny transformátoru je pouze 60 – 80000,- Kč. Z toho vyplývá, že návratnost investice do nízkoztrátového transformátoru je do tří let od uvedení do provozu.

2.3 Konstrukce DTR

Z konstrukčního provedení, tzn. z hlediska izolace a chlazení, se DTR dělí na:

- **Olejové**
- **Suché**

Olejové DTR se vyrábějí především v hermetickém provedení, kdy je DTR hermeticky uzavřen a zcela naplněn olejem. Olejové transformátory se v některých případech nahrazují

[1] Kalkulace převzata z: http://www.azcomputers.cz/!/trafo/nizkoztratove-transformatory-pro-fve.php

transformátory s litou izolací, tzv. suché transformátory. Děje se tak z hlediska ekologického, například ve vodárenském pásmu, z důvodu ochrany vod a z hlediska požárních předpisů.

Obr. 2.3 Olejový DTR [13]

Obr. 2.4 Suchý DTR [12]

2.3.1 Olejová nádoba

Na první pohled lze z obr. 2.3 a obr. 2.4 usoudit, že základní rozdíl nastává v přítomnosti olejové nádoby, která slouží k udržení oleje a odvedení přebytečného tepla. Nádoba se skládá ze tří částí:

1. Olejová vana, která slouží především k udržení oleje.
2. Vlnovec, neboli „harmonika“, zvětšuje velikost chladící plochy pro odvod tepelných ztrát.
3. Vrchní nosný rám.

Ve víku nádoby jsou instalovány průchodky pro vodiče, přepínač odboček a pro čidla měření teploty. Pro snadnější manipulaci také zvedací oka. U suchých DTR je výkon na primární vinutí přiveden pomocí připojovacích svorek. Ze sekundárního vinutí je výkon vyveden pomocí připojovacích praporců.

2.3.2 Vysokonapěťové vinutí

- **Olejový DTR**
  Jednotlivé cívky se při konstantním tahu navíjejí lakovaným drátem na nosný válec nebo přímo na NN vinutí. Pro zpevnění vinutí pro dobrou zkratovou odolnost a optimální rozložení rázového napětí se používá smršťovací bandáž.
- **Suchý DTR**
  Vysokonapěťové vinutí je zcela uzavřeno v pryskyřicovém tělese s hladkým povrchem.

2.3.3 Nízkonapěťové vinutí

Toto vinutí bývá u obou typů provedeno jako fóliové, což zaručuje nejen snížení dodatečných ztrát, ale také vyrovnané rozložení teplot ve vinutí a vysokou zkratovou pevnost. To ovšem není z technických důvodů možné u výkonů nižších než 160 kVA.

2.4 Chlazení transformátoru

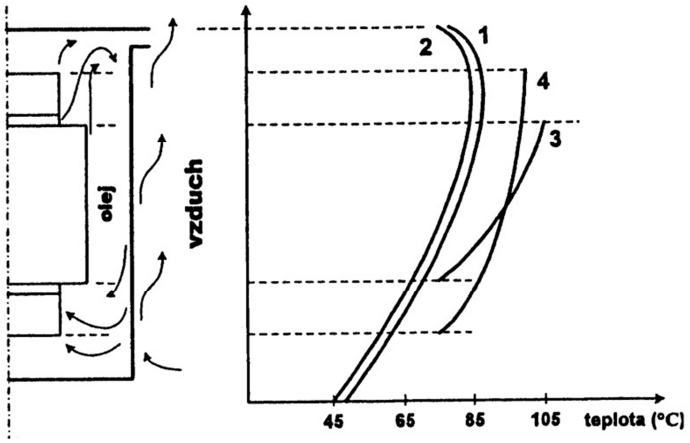
Pro určení druhu chlazení se vychází ze zkratky ve formátu $X_1X_2X_3X_4$, kde jednotlivá X ve značkách (viz tab. 2.3) zastupují:

- X_1 – Chladící médium vinutí
- X_2 – Způsob oběhu média vinutí (cirkulace)
- X_3 – Chladící médium transformátorové nádoby
- X_4 – Způsob oběhu vnějšího média (cirkulace)

Tab. 2.3 Značení chladícího média a způsobu cirkulace

Značky pro chladící médium:	
Druh média	**Značka**
vzduch	A
plyn	G
voda	W
olej (bod vzplanutí≤300°C)	O
jiná kapalina (bod vzplanutí>300°C)	K
jiná kapalina (neměřitelný bod vzplanutí)	L
Značky pro způsob cirkulace:	
Způsob cirkulace	**Značka**
přirozená	N
nucená (ventilátor nebo čerpadlo)	F
nucená s usměrněným prouděním	D

Nejčastěji používaným je systém ONAN, kde je vinutí chlazené přirozenou cirkulací oleje a nádoba je chlazena přirozenou cirkulací vzduchu. U suchých transformátorů se používá chlazení typu AN, kde dochází k ochlazování také pomocí přirozené cirkulace vzduchu.
Zvýšená teplota v transformátoru může způsobit přetížení, v horším případě může dojít i k jeho poruše. Teplotu je nutné monitorovat a zajistit tak bezporuchový chod DTR a stanovit jeho životnost. Tepelné stárnutí je jeden z degradačních parametrů transformátoru. Olej v transformátorech zastává jak funkci chladící, tak i funkci izolační. Ztracená elektrická energie v DTR se přeměňuje v teplo ve vinutí, v magnetickém obvodu a v dalších částech transformátoru. Oteplení těchto částí je závislé na zatížení, ztrátách v transformátoru, intenzitě chlazení vinutí atd. Plechy, ze kterých je složen magnetický obvod, se vyznačují velkou tepelnou vodivostí a malou tepelnou kapacitou. To ovšem platí i pro vinutí, a tak se tyto části stávají stálými zdroji tepla, což má za následek omezení výkonu DTR a vlastnosti izolačního materiálu. Tento nežádoucí jev je možné odstranit například izolační kapalinou, jako je minerální olej. Tím, že se olej pomocí vinutí a magnetického obvodu zahřívá, dochází k jeho stoupání a tím i k samotné cirkulaci oleje. Zpět do dolních poloh se olej vrací postranními trubkami. Rozdílnou teplotu v různých částech DTR zobrazuje obr. 2.4.



Obr. 2.4 Průběh teploty v závislosti na výšce transformátoru (1- teplota oleje, 2- teplota stěny nádoby, 3- teplota vinutí, 4- teplota magnetického obvodu) [4]

2.5 Provozní vlastnosti DTR a jejich použití

Mezi hlavní provozní vlastnosti distribučních transformátorů patří odolnost proti impulzním přepětím, účinkům zkratových proudů i přetížení a také lze jejich výkon zvýšit dodatečnou montáží ventilátorů, to především u suchého provedení.

Tab. 2.4 Provozní vlastnosti DTR a jejich použití

	Olejový DTR	Suchý DTR
VÝHODY	+Cena +Dlouhá životnost (min. 25 let) +Nízká hlučnost +Nízké ztráty +U hermetického provedení takřka nulové náklady na údržbu +"zelené transformátory" – plněné syntetickým nebo rostlinným olejem -> nízká hořlavost	+Minimální zatížení životního prostředí +Levná montáž a provoz +Menší požární riziko +Vysoká krátkodobá přetížitelnost +Příznivé možnosti zakrytování +Žádné chladící kapaliny
NEVÝHODY	-Vybudování záchytné olejové jámy nebo vany -Horší montáž	-Vyšší pořizovací náklady -Větší rozměry -Hlučnost
POUŽITÍ	• Tam, kde nehrozí nebezpečí vzniku požáru a výbuchu • Mimo chráněné oblasti • Pro venkovní i vnitřní transformační stanice	• Průmyslové i občanské stavby (nemocnice, hotely, divadla, letiště, metra, …)- tam, kde se netoleruje znečištění ŽP (blízkost zdrojů pitné vody), nebezpečí vzniku požáru a výbuchu • Pro venkovní a sloupové transformační stanice

3 Hlediska při návrhu DTR

Velikost DTR se stanovuje podle sumy všech rezervovaných příkonů v dané lokalitě, která má být tímto DTR napájena. Rezervovaným příkonem se na hladině VN rozumí hodnota elektrického příkonu v kW sjednaná s provozovatelem distribuční soustavy. U hladiny NN se jedná o hodnotu hlavního jističe před elektroměrem v ampérech.
Ve venkovských obcích je v transformační stanici (obvykle se používá sloupová či příhradová) vždy pouze jeden transformátor o velikosti 100 kVA až 400 kVA. Jedná-li se pouze o okrajovou část obce s několika málo odběry, používá se DTR o výkonu 50 kVA.

Obr. 3.1 Dvousloupová TS [19]

Ve městech připadá na jednu DTS (kiosková či věžová, která se používala dříve) jeden až tři transformátory s velikostmi 400 kVA nebo 630 kVA.

Obr. 3.2 Věžová TS s jedním DTR [19]

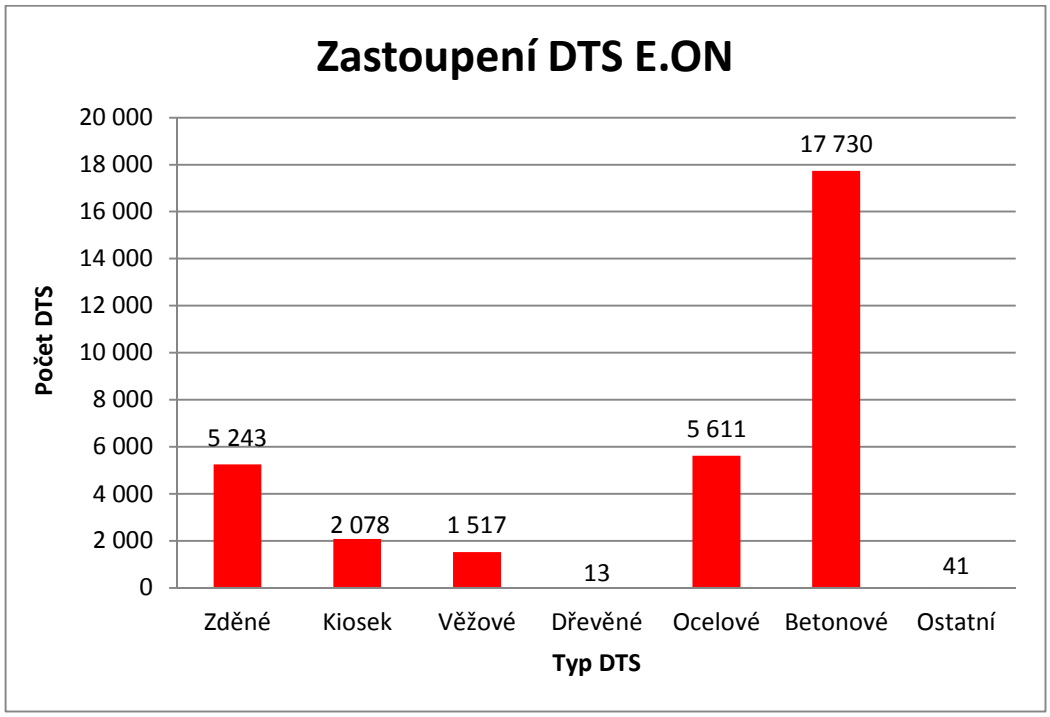
Více transformátorů v jedné DTS nepracuje paralelně, rozváděče nejsou propojeny. Každý DTR tak napájí svou oblast (např. dvě ulice). U rozlehlých obcí či větších měst dochází k propojení konce NN vývodu s jiným DTR z jiné DTS.

Obr. 3.3 Kiosková TS se dvěma transformátory (1. DTR v provozu, 2. DTR mimo provoz – náhradní, pro případ navýšení počtu zákazníků v dané lokalitě) [19]

Tam, kde jsou alespoň dvě transformační stanice a každá s nejméně jedním DTR, se poté zohledňuje i možnost pro převzetí alespoň části zatížení transformační stanice, která je například z důvodu údržby v odstávce. V takovém případě, pokud je to možné, dochází k přepojení odstavené sítě NN k DTS, která zůstává v provozu.

Tab. 3.1 DTS dle umístění a provedení E.ON [19]

RSS	Zděné	Kiosek	Věžové	Dřevěné	Ocelové	Betonové	Ostatní	Celkem
Brno	775	380	7	1	25	309	8	**1 505**
Hodonín	257	102	50		132	1 056	2	**1 599**
Nové Město na Moravě	203	38	52	4	130	837	1	**1 265**
Otrokovice	345	176	27		315	1 677		**2 540**
Prostějov	257	93	55	1	237	1 171		**1 814**
Jihlava	285	135	91	1	137	1 004	2	**1 655**
Znojmo	139	33	148		91	543	1	**955**
České Budějovice	401	146	78		493	915	8	**2 041**
Jindřichův Hradec	188	64	158	1	497	881	1	**1 790**
Písek	230	92	98	1	661	1 166	2	**2 250**
Tábor	159	40	49		231	407	1	**887**
Celkem	**3 239**	**1 299**	**813**	**9**	**2 949**	**9 966**	**26**	**18 301**



Obr. 3.4 Zastoupení DTS E.ON [19]

3.1 Paralelní chod transformátorů

Paralelní chod transformátorů je takový chod, kdy jsou transformátory jak na vstupní, tak výstupní straně připojeny na společné přípojnice nebo společnou síť. Paralelní chod TR se využívá tehdy, je-li třeba dodávat větší výkon pro napájení určité distribuční oblasti, popř. průmyslového provozu.
Při provozování paralelního chodu TR je nutné dodržet následující podmínky:

- *Stejná jmenovitá napětí na primární i sekundární straně transformátorů.* I zanedbatelné rozdíly napětí způsobí mezi transformátory velké vyrovnávací proudy.
- *Stejný převod napětí (naprázdno).* Při nedodržení odchylky převodu menší než 0,5 % vznikají také mezi transformátory velké vyrovnávací proudy, což má za následek různé zatížení transformátorů. V takovém případě je více zatížen transformátor s větším napětím (menším převodem). Vyrovnávací proud lze vypočítat následovně:

$$I_v = \frac{100 \cdot b}{u_{k1} + u_{k2}}, \text{ kde} \qquad (3.1)$$

  I_v – vyrovnávací proud [% jmenovitého proudu]
  b – rozdíl v převodových poměrech [%]
  u_k – napětí nakrátko jednotlivých transformátorů [%]
- *Stejné hodinové číslo = Stejný úhel natočení fázorů napětí.* Lze ovšem paralelně spojit i transformátory s rozdílným hodinovým číslem. Podmínkou je permutace (prohození) svorek na primárním nebo sekundárním vinutí (někdy i na obou zároveň) a dosáhnutí tak stejného fázového natočení vektorů. Je nutné, aby oba transformátory patřily do stejné skupiny hodinových čísel. Pokud podmínka není splněna, paralelní chod TR je zcela vyloučen.

- *Stejné napětí nakrátko (u_k).* Dovolená odchylka tohoto napětí je ±10%. Při nesplnění této podmínky dochází k nerovnoměrnému zatížení jednotlivých transformátorů takto:

$$\frac{S_1}{S_2} = \frac{\frac{S_{n1}}{u_{k1}}}{\frac{S_{n2}}{u_{k2}}}, \text{ kde} \tag{3.2}$$

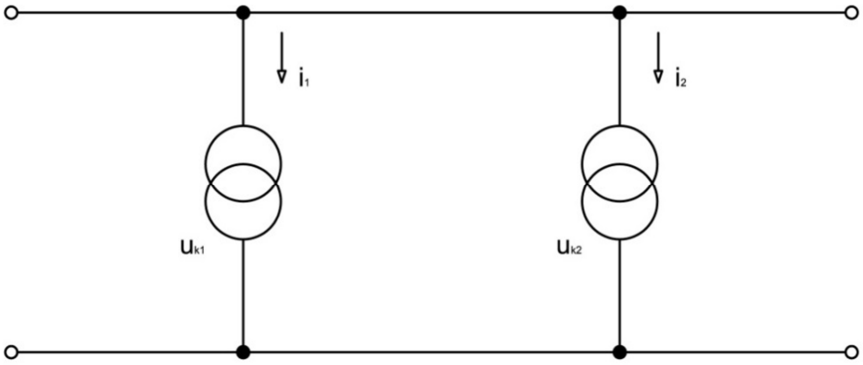
  S_1 – skutečný výkon TR1
  S_{n1} – jmenovitý výkon TR1
  u_{k1} – napětí nakrátko TR1

- *Poměr jmenovitých výkonů paralelně spolupracujících transformátorů menší než 1:3,2.* Většího poměru se používá pouze krátkodobě při přepojování zátěže bez přerušení dodávky (nemusí být splněna ani podmínka týkající se napětí nakrátko). Abychom dosáhli dobrého využití paralelně pracujících TR, je výhodné, aby TR s menším napětím nakrátko měl větší jmenovitý výkon. Ideálním případem je poměr jmenovitých výkonů paralelně pracujících transformátorů 1:1.
  Koeficient využití skupiny paralelně pracujících transformátorů:

$$\chi = \frac{S_{celk.}}{S_{n1} + S_{n2}} \tag{3.3}$$

  Při dodržení maximálního poměru 1:3,2 má být využití skupiny alespoň $\chi = 0{,}95$.

Odvození:



Obr. 3.5 Zjednodušené schéma paralelního chodu transformátorů

Platí (v poměrných hodnotách):

$$u = z \cdot i \rightarrow \text{Ohmův zákon} \tag{3.4}$$

$$Z_k = \frac{U_k}{I_n} \tag{3.5}$$

$$u_k = \frac{u_k(\%)}{100} = \frac{U_k}{U_n} = \frac{Z_k \cdot I_n}{Z_n \cdot I_n} = z \tag{3.6}$$

Poté můžeme rovnost napětí na obou transformátorech zapsat takto:

$$u_{k1} \cdot i_1 = u_{k2} \cdot i_2 \tag{3.7}$$

Z čehož vyplývá:

$$i_1 = i_2 \cdot \frac{u_{k2}}{u_{k1}} \tag{3.8}$$

Jelikož nechceme, aby došlo k přetížení TR1 o jmenovitém výkonu S_{n1} (resp. jmenovitém proudu I_{n1}), musí platit podmínka $i_1 = 1$ (to odpovídá 100 % jmenovitého proudu), poté platí:

$$1 = i_2 \cdot \frac{u_{k2}}{u_{k1}} \rightarrow i_2 = \frac{u_{k1}}{u_{k2}} \tag{3.9}$$

Pro využití TR2 tedy platí:

$$zatížení = \frac{u_{k1}}{u_{k2}} \cdot 100 \text{ (\% jmenovitého výkonu)} \tag{3.10}$$

Příklad:

Uvažujme dva transformátory s napětím nakrátko $u_k = 8\,\%$ a dovolenou výrobní odchylkou od této hodnoty. Poté tedy platí $u_{k1} = 7\,\%, u_{k2} = 9\,\%$. Pokud nechceme přetížit stroj s u_{k1}, pak transformátor s u_{k2} můžeme zatížit pouze na $\frac{7}{9} \cdot 100 = 78\,\%$ jmenovitého výkonu S_{n2}.

3.2 Zatížitelnost transformátoru

Při jmenovitém zatížení musí TR vydržet v provozu až 25 let, což platí pro nejvyšší denní teplotu 35 °C a průměrnou roční teplotu 15 °C. Za těchto podmínek by průměrná teplota nejteplejšího místa vinutí neměla přesáhnout hodnotu 95 °C. Tuto hodnotu také nesmí přesáhnout horní vrstva oleje (viz kapitola 2.4). Pokud by byl transformátor zatěžován na jmenovitý výkon, mělo by toto zatížení vliv na životnost TR. Z tohoto důvodu se jmenovitý výkon transformátoru volí takový, aby se průměrné zatížení pohybovalo kolem 60 - 70 % jmenovitého výkonu. Doba provozu TR při přetížení závisí především na velikosti přetížení a stavu před vznikem přetížení. Zatěžováním transformátorů se zabývá norma.

Pro TS se volí transformátor s co nejmenšími ztrátami a s maximální účinností η danou vztahem:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_1 - \Delta P_Z}{P_1} = 1 - \frac{\Delta P_Z}{P_1} \cdot 100(\%) \quad \text{, kde} \tag{3.11}$$

P_1 – činný příkon TR (W)

P_2 – činný výkon TR (W)

$$\Delta P_Z = P_0 + P_k + P_d \text{ (W), kde} \tag{3.12}$$

P_0 – ztráty naprázdno (W)

P_k – ztráty nakrátko (W)

P_d – přídavné ztráty (W)

3.3 Investiční náklady

Požadavky na distribuční síť a tedy i na DTR je třeba zajistit s co nejmenšími nutnými investičními náklady. Je tedy nutné nalézt tzv. „zlatou střední cestu“, tedy kompromis mezi technikou a ekonomikou. Celkové náklady na transformátor (včetně kupní ceny za vyhodnocované období):

$$N_n = C + \sum_{k=1}^{n} 24 \cdot 365 \cdot \left(P_0 + P_k \left(\frac{I}{I_n} \right)^2 \right) \cdot B \cdot \left(1 + \frac{d}{100} \right)^k \cdot \left(1 + \frac{e}{100} \right)^k \cdot \left(1 + \frac{f}{100} \right)^k \text{, kde} \tag{3.13}$$

C – kupní cena TR (Kč)

P_0 – ztráty naprázdno (kW)

P_k – ztráty nakrátko při 75 °C (kW)

$\frac{I}{I_n}$ - průměrné zatížení TR
B – cena za 1 kWh el. energie (Kč)
d - roční nárůst ceny elektrické energie za celé vyhodnocované období (%)
e – inflační míra (%)
k - jednotlivé roky vyhodnocovaného období
f – růst odběru

Většinou se vyhodnocuje ekonomická výhodnost za dobu 5 – 7 let.
Uvádím přibližný ceník DTR znázorněný v tab. 3.2.

Tab. 3.2 Ceník DTR

Výkon (kVA)	Cena (tisíc Kč)
50	73
100	96
160	117
250	147
400	181
630	233

3.4 Stupeň zajištění dodávky (SZD)

SZD závisí na typech zařízení, které napájíme a na jejich potřebě plynulého napájení. SZD stanovuje norma ČSN 34 1610. Zajištění dodávky elektrické energie dělíme do tří stupňů:

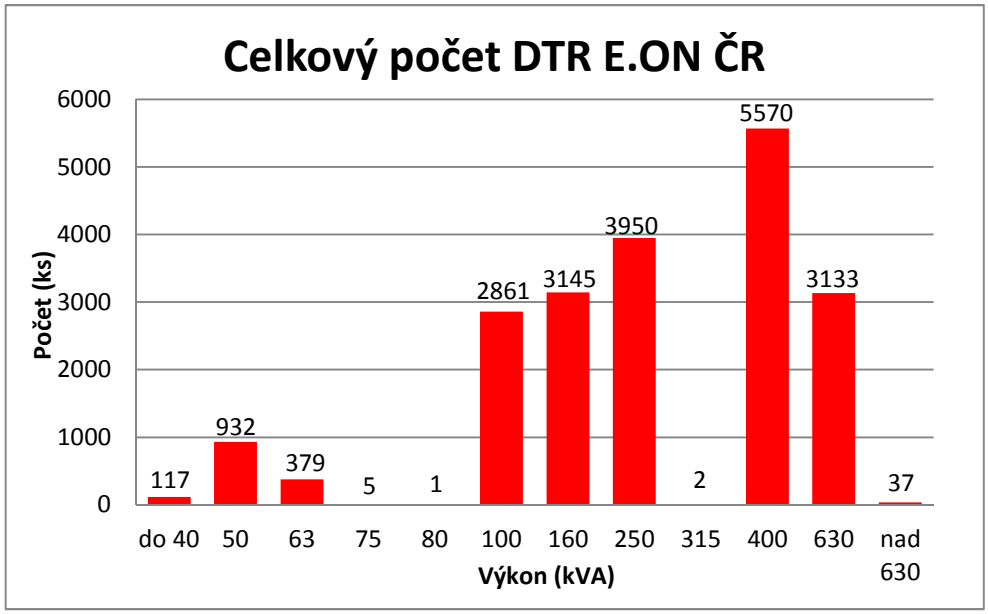
- *1. Stupeň* – Při tomto stupni musí být rezervní zdroj napájení, na který v případě poruchy přepínáme. Napájecí zdroje nesmí být na sobě závislé (porucha jednoho nesmí ovlivnit funkci druhého). Uplatňuje se tam, kde hrozí velké materiálové škody či ohrožení lidí (nemocnice, chemický průmysl, automobilky – desynchronizace výroby, velkovýkrmny, …).
- *2. Stupeň* – Zajištění dodávky ve speciálních zařízení. Zde se toleruje určitá doba nedodávky, kde nepožadujeme na sobě nezávislé napájecí zdroje. Uplatňuje se u průmyslového odvětví.
- *3. Stupeň* – U zařízení, kde není požadavek na plynulost dodávky. Zde se toleruje delší nedodávka. Tento stupeň zahrnují například domácnosti.

4 Zatížení distribučních transformátorů

Pro volbu velikosti DTR je důležité respektovat předpokládané zatížení v několika dalších letech s ohledem na rozvoj výstavby a na nové žádosti o připojení v dané lokalitě. Již v minulosti docházelo k návrhu distribučních transformátorů s ohledem na případné zatížení v budoucích letech a tím tak k vyloučení problému, kdy je třeba přistoupit k výměně stroje za větší. V současné době patří mezi kritéria při návrhu DTR především cena a také ztráty. Pokud dojde např. k navýšení rezervovaného příkonu nebo k podání nové žádosti o připojení, je nutné stávající transformátor vyměnit za větší. To se v současné době s ohledem na ekonomické aspekty stává běžnou činností distributora. V tab. 5.1 je patrné, že mezi nasazované stroje patří především transformátory o velikosti (výjimečně 25) 50, 63, 100, 160, 250, 400 a 630 kVA.

Tab. 4.1 Přehled DTR dle výkonů a napětí ve společnosti E.ON ČR, s.r.o. [19]

Výkon (kVA)	6 kV (ks)	10 kV (ks)	22 kV (ks)	35 kV (ks)	Celkem		Or. plechy (ks)
					(ks)	(kVA)	
do 40			117		117	2851	116
50			932		932	46600	931
63			379		379	23877	379
75			5		5	375	4
80			1		1	80	0
100			2857	4	2861	286100	2844
160			3141	4	3145	503200	3143
250			3938	12	3950	987500	3943
315			2		2	630	1
400	1		5555	14	5570	2228000	5520
630	1		3128	4	3133	1973790	3133
nad 630		1	36		37	45850	37
Celkem	**2**	**1**	**20091**	**38**	**20132**	**6098853**	**20051**



Obr. 4.1 Celkový počet DTR dle jmenovitého výkonu [19]

4.1 Proces sledování zatížení DTR

Ke sledování maximálních hodnot zatížení dochází u zhruba 30 % DTR o výkonech především 100, 160, 250, 400 a 630 kVA pomocí trojfázových elektronických ampérmetrů EAM1. Jedná se dlouhodobé měření, které je vyčítané v ročních intervalech, a to většinou během dubna.

Přibližně u dvou set kusů DTS ročně se sleduje zatížení krátkodobé (např. týden). Jedná se o DTS, které nejsou osazeny ampérmetrem EAM 1 a nebo se sleduje zatížení jen jednoho z vývodů, kde je např. v plánu připojení nového odběru. V tomto případě jde o posouzení průřezu vodiče, zda dané zatížení vydrží.

U zhruba sto kusů DTS se měří z provozních důvodů kvalita napětí dle normy EN 50160.

Mezi provozní důvody patří vhodné nastavení odbočky s ohledem na provoz nových výroben v síti.
V několika set DTS se trvale měří události (poklesy napětí a přerušení) analyzátorem MEg10. Dále dochází při údržbě v několika tisících DTS k okamžitému orientačnímu odečítání hodnot přiložením voltmetru.

4.1.1 Ampérmetr EAM 1

Tento přístroj slouží jako náhrada starších ampérmetrů s vlečnou ručkou. Je určený pro záznam maximálních hodnot proudu (střední hodnoty) během sledovaného období a dalších statistik. Pomocí EAM 1 dochází především k trvalému měření zatížení na vývodech transformátorů.

Tab. 4.2 Parametry EAM 1

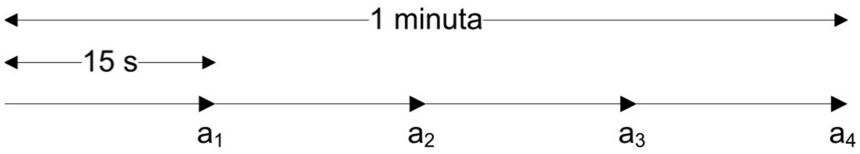
Měřené veličiny	3 střídavé proudy (střední hodnoty)
Jmenovité hodnoty proudů I_{jm}	5:00 dop.
	1:00 dop.
	Speciální[2]
Rozsah měření proudů	3 % až 130 % I_{jm}
Přesnost měření	v rozsahu 3 % až 120 % I_{jm} 1 % + 1 digit
Frekvence měřených proudů	50 Hz až 150 Hz
Četnost měření proudů	4 × za 1 min
Referenční teplota	23 °C
Teplota okolí	0 °C až 50 °C normální
	-20 °C až 60 °C rozšířená
Relativní vlhkost	40 % až 90 %
Pracovní poloha	libovolná, přednostně svislá
Napájení	při proudu větším než 3 % I_{jm} změřených obvodů
	při proudu nižším než 3 % I_{jm} ze záložní baterie typu R1/2AACD (3V) 3
Spotřeba vstupu	3 x 2 VA při I_{jm}
Doba uchování výsledků	Delší než 5 let
Rozměry	92 x 92 x 80 mm
Hmotnost	500 g
Cena (uvedené ceny v Kč a bez DPH)	bez displeje 5200,-
	s displejem 5300,-
	s displ. a kláves. 5450,-

Kromě samotného ampérmetru je pro celkový provoz nutné vlastnit ještě čtečku, komunikační kabel ke čtečce, převodník USB/RS232, redukce čtečka EAM 1/převodník USB, speciální měřící transformátor atd. Celková hodnota příslušenství k jednomu ampérmetru EAM 1 se pohybuje okolo patnácti tisíc korun.

[2] Předností tohoto speciálního MTP (značeno MT-S) je možnost instalace bez mechanického přerušení a demontáže měřeného obvodu.

Vzorkování EAM 1 probíhá tak, že v každé fázi se v každých patnácti sekundách změří okamžitá hodnota. Minutová hodnota se vypočte jako průměr čtyř hodnot za jednu minutu dle rovnice 4.1:

$$x = \frac{1}{4} \cdot \sum_{k=1}^{4} a_k \qquad (4.1)$$



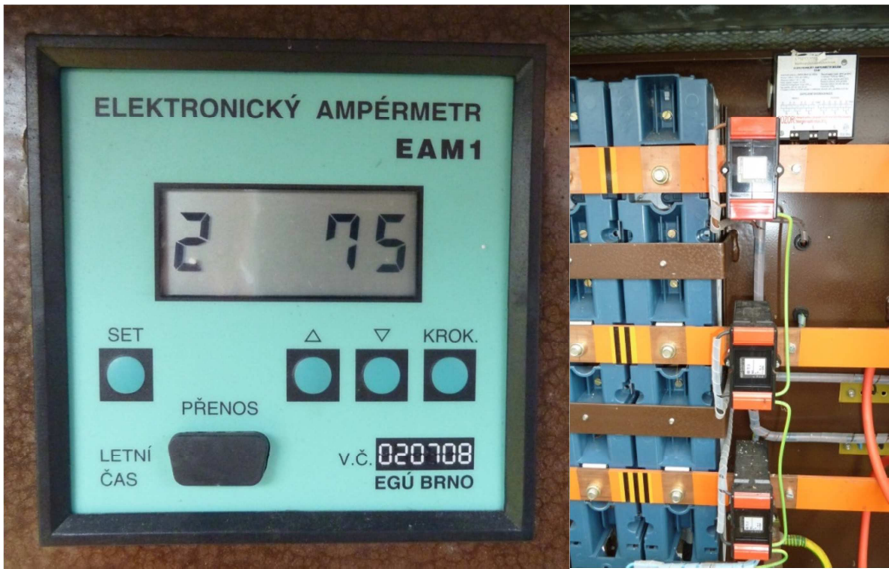
Obr. 4.2 Minutová hodnota

Maximální hodnota proudu se stanovuje (podle rovnice 4.2) jako hodnota klouzavého průměru za dobu patnáct minut, kdy je zaznamenávána každá „minutová“ hodnota (x_1, x_2…x_{15}).

$$i = \frac{1}{15} \cdot \sum_{k=1}^{4} x_k \qquad (4.2)$$

Obr. 4.3 Patnácti minutová hodnota

Sejmutí a archivace dat se provádí místně (technikem nebo montérem) pomocí čtečky. Čtečka se do EAM1 zasouvá I5 kolíkovým konektorem CANON. Sejmutí dat probíhá automaticky po zasunutí čtečky do ampérmetru. Kapacita čtečky činí 127 záznamů. Data obsahují pouze hodnoty maximálního zatížení, což je výhodou pro nenáročnost dat na paměť. Stovky záznamů nezaberou více než několik málo MB paměti. Sejmutá data jsou následně převedena do formátu *txt a načtena do nadstavbové aplikace DAM. Pomocí ID ampérmetru jsou hodnoty daného DTR přiřazeny k příslušné DTS dle technické evidence. Díky sejmutí dat pomocí EAM 1 a přenesení do počítače je měření bezchybné a velice přesné.



Obr. 4.4 Elektronický ampérmetr EAM1 a jeho osazení [19]

4.1.2 Voltmetr MEg10

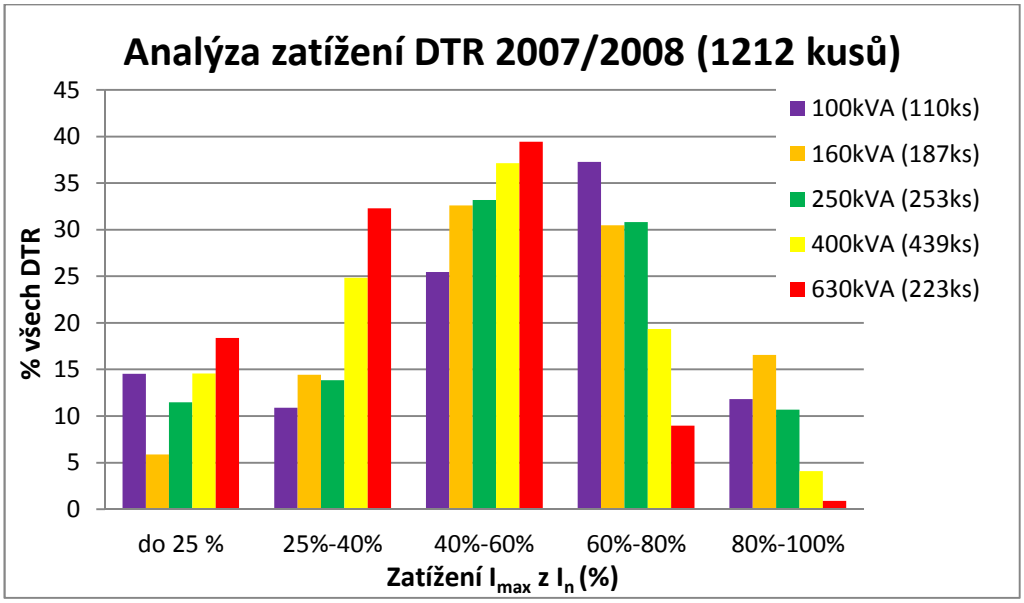
Jedná se o trojfázový statický voltmetr, který je určen pro měření fázových napětí v síti nn nebo sdružených napětí v sítích vn a vvn. Voltmetr obsahuje displej, kde jsou zobrazena měřená napětí ve voltech nebo v procentech jmenovité hodnoty. Umožňuje také zobrazování odchylky od jmenovité hodnoty v procentech. Registruje všechny události na napětích (poklesy napětí, dočasná přepětí, přerušení a výpadky).

4.2 Analýzy měření

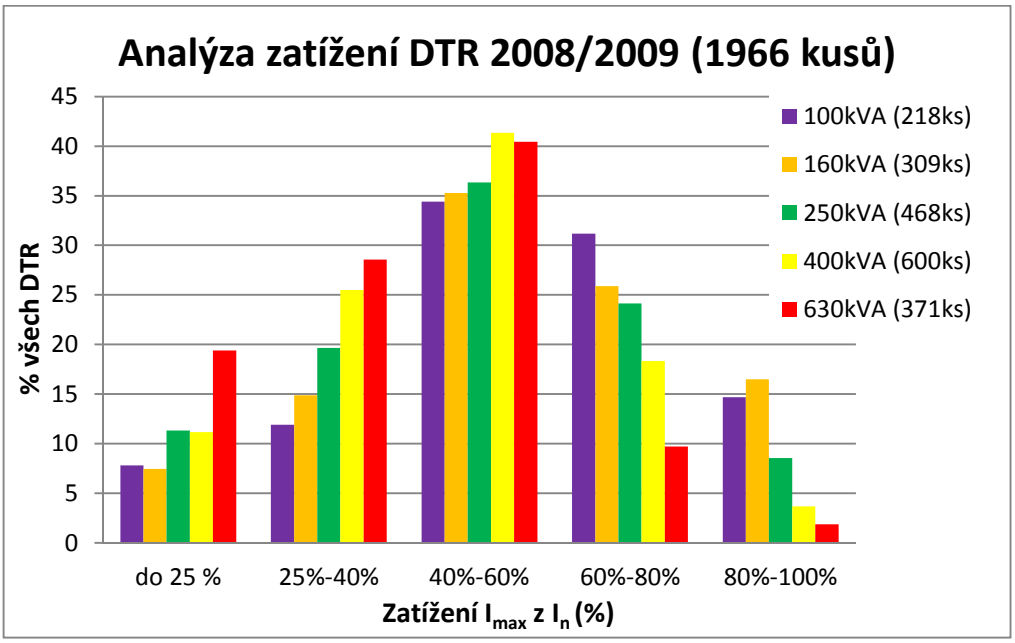
Prostřednictvím útvaru Kontroly kvality E.ON Česká republika, s.r.o jsem obdržel soubor odečtů měření zatížení pomocí EAM1 za období několika let. Soubor obsahoval maximální hodnoty proudů všech DTR , které jsou osazeny tímto ampérmetrem. Pro svoji analýzu jsem vybral roční odečty v rozmezí let 2007 až 2011 a měsíců 3-7 až 3-7 následujícího roku. Jedná se o úseky hodnot, které zasahují do zimního období, kdy dochází díky většímu odběru elektrické energie (především vlivem elektrického vytápění) k maximálnímu zatížení DTR. Celková délka trvání maximálních hodnot proudů během měřeného období činí jednotky nebo desítky minut. Pomocí filtrů a výpočtů jsem v softwaru MS Excel sestrojil grafy, které znázorňují procentní zatížení DTR dle jmenovitého výkonu. Celkem jsem analyzoval 6690 hodnot maximálního zatížení, které se vztahovaly k DTR o jmenovitých výkonech 100, 160, 250, 400 a 630 kVA.

Začátek	Konec	Výkon	I1max [A]	I2max [A]	I3max [A]	I1max [%]	I2max [%]	I3max [%]	Imax L1, L2,L3 [%]
22.3.2010	13.3.2011	630	503	503	473,1	55,09	55,09	51,82	55,09
30.6.2010	6.5.2011	630	677,3	836,7	766,9	74,18	91,64	83,99	91,64
1.7.2010	6.5.2011	630	493	408,4	443,2	54	44,73	48,54	54
29.3.2010	4.4.2011	630	328,7	308,8	318,7	36	33,82	34,91	36
2.4.2010	15.4.2011	630	433,3	488,1	383,5	47,46	53,46	42	53,46
26.4.2010	29.3.2011	630	532,9	582,7	537,9	58,37	63,82	58,91	63,82
26.4.2010	22.3.2011	630	164,4	209,2	234,1	18,01	22,91	25,64	25,64

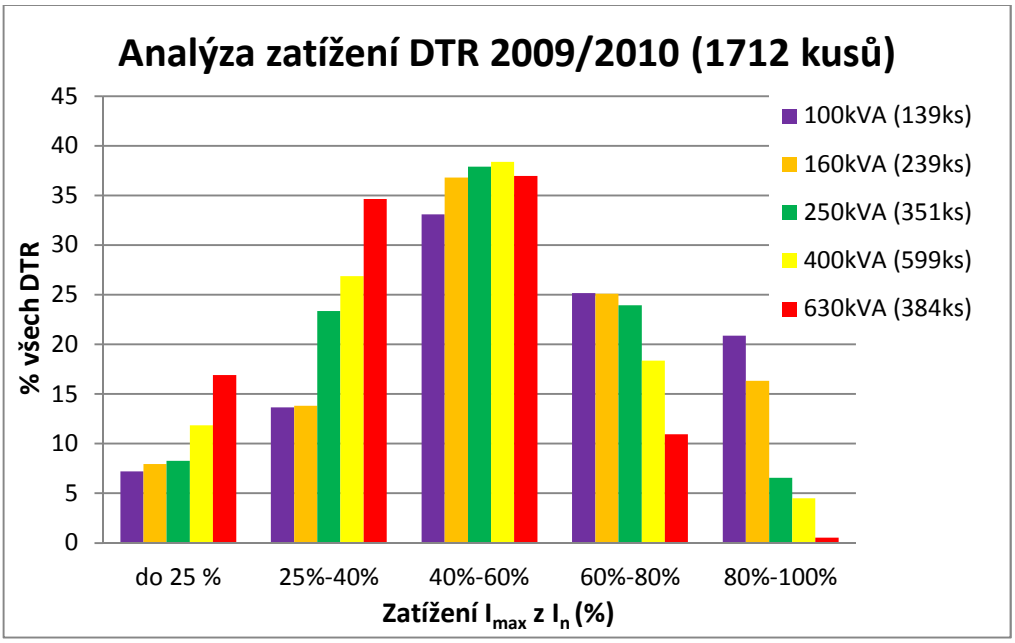
Obr. 4.5 Náhled dat vyhodnocení zatížení DTR o jmenovitém výkonu 630 kVA



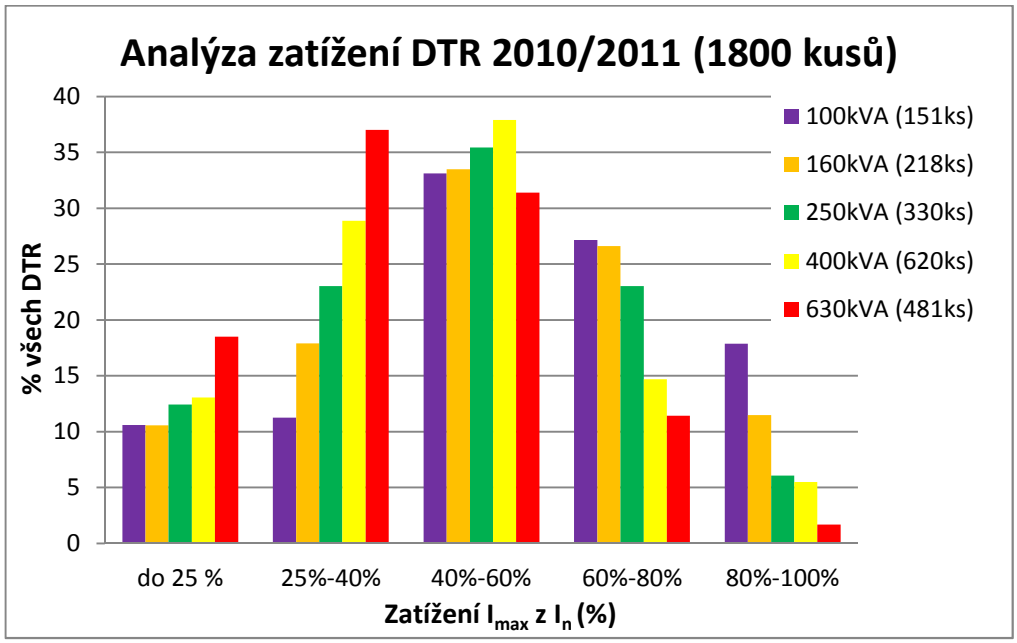
Obr. 4.6 Analýza zatížení DTR 2007/2008



Obr. 4.7 Analýza zatížení DTR 2008/2009



Obr. 4.8 Analýza zatížení DTR 2009/2010



Obr. 4.9 Analýza zatížení DTR 2010/2011

Uvádím rozbor analýzy zatížení pro období 2010/2011. Pro ostatní období platí stejné odečty a výpočty s rozdílem počtu DTR.

Z obr. 4.9 vyplývá, že zatížení 45 % DTR o jmenovitém výkonu 100 kVA během sledovaného období přesáhne hospodárnou mez zatížení transformátoru, a to 60 %. S ohledem na krátkodobé trvání maximálních hodnot zatížení a nízké hodnotě jmenovitého výkonu není nutné stroje měnit, nejedná-li se např. o přetížení při výpomoci sousedním oblastem. Dalším důvodem výměny může být krytí budoucích požadavků odběratelů v dané oblasti.

Pro stroje 100 kVA platí, že hodnota jmenovitého proudu (hodnota maximálního zatížení) je rovna 144 A. Pro již zmíněnou hospodárnou mez 60 % platí hodnota maximálního zatížení 86,4 A. Hodnotu 86,4 A nepřekročilo celkem 56 kusů (25,7 %) strojů o jmenovitém výkonu 160 kVA. Z technického hlediska je možné tyto stroje, s ohledem na ztráty, vyměnit za menší (o stupeň výkonově nižší). V tomto případě za transformátor 100 kVA.

Hodnota maximálního zatížení pro stroje 160 kVA činí 231 A. Pro hospodárnou mez je tato hodnota snížena na 138,6 A. Tato hodnota nebyla překročena u 103 kusů (31,2 %) o jmenovitém výkonu 250 kVA. Z technického hlediska je možno tyto stroje vyměnit za menší. V tomto případě za transformátor 160 kVA.

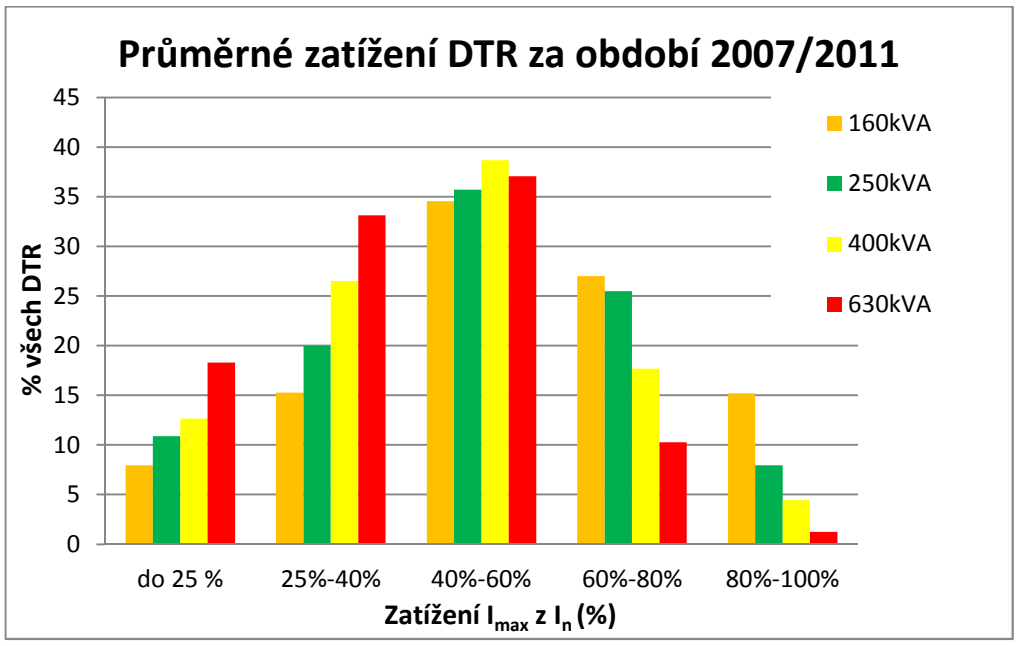
U výkonu 400 kVA přesahuje optimální zatížení 20 % všech těchto strojů. Jmenovité zatížení pro stroje 250 kVA činí 361 A. Pro hospodárnou mez platí hodnota 216,6 A. Tato podmínka je splněna 219 kusy (35,3 %) o jmenovitém výkonu 400 kVA. Po technické stránce je možné těchto 219 kusů strojů 400 kVA vyměnit za stroje 250 kVA.

U výkonu 630 kVA činí hodnota nad optimální zatížení 13 % DTR. Jmenovité zatížení pro stroje 400 kVA činí 577,4 A. Pro hospodárnou mez platí hodnota 346,44 A. Z technického hlediska je možné 249 kusů (51,8 %) strojů o jmenovitém výkonu 630 kVA vyměnit za stroje 400 kVA.

4.3 Závěr z analýzy měření

Vzhledem k nízké soudobosti lze často bez ohledu na přetížení TR využít DTS i pro náhradní napájení sousedních oblastí, např. při beznapěťových revizích nebo při rekonstrukcích. Cena DTR 630 kVA činí cca 233 tisíc Kč, což je oproti DTR 400 kVA (cca 181 tisíc Kč) navýšení o 52 tisíc Kč. Výsledkem analýzy za období 2010/2011 je především nahrazení 249 kusů strojů 630 kVA novými stroji 400 kVA. Náhrada představuje úsporu téměř 13 miliónů korun.

K ještě větší úspoře může dojít při uvážení, že v síti E.ON Distribuce, a.s. je nasazeno cca 3 tisíce kusů DTR 630 kVA. V tomto případě by u 51,8 % z 3 tisíc DTR o jmenovitém výkonu 630 kVA došlo k úspoře téměř 81 miliónů Kč. K realizaci zmíněné úspory dochází u společnosti E.ON systematicky při výměnách starých strojů 630 kVA za nové stroje 400 kVA, kdy se tato možnost prokáže měřením. Pokud se mění TR ve stávající DTS, musí se prokázat zatížení alespoň 50 % I_n jinak dochází právě k výměně stroje za menší. Měření se provádí pomocí již zmíněného ampérmetru EAM 1 nebo dochází k týdennímu měření přenosným analyzátorem. Při výstavbě nové DTS se přistupuje k výpočtovému zatížení, které má být menší než 70 % $I_{n.}$ Tzn. při výpočtovém zatížení 71 % I_n se už volí transformátor o stupeň výkonově větší.



Obr. 4.10 Analýza průměrného zatížení DTR za celé sledované období (2007/2011)

5 Regulace napětí

Jmenovitá napětí sítě jsou stanovena normami ČSN 33 0120 a ČSN 33 0121. Jedná se o napětí, kterým je označena síť nebo zařízení a ke kterému se vztahují provozní charakteristiky. V roce 1993 došlo v České republice, v mnoha případech bez povšimnutí laické veřejnosti, ke změně normalizovaného napětí. Došlo k přechodu z napěťové soustavy 220/380 V na napěťovou soustavu 230/400 V. Obdobně se tak stalo i u zemí, které používaly napěťovou soustavu 240/415 V. V současné době tedy platí hodnoty nízkého napětí 230 V mezi fází a středním vodičem a 400 V mezi fázemi. Současné platí doporučení, aby se v místech předání dodávky odběrateli dodavatelem napětí nelišilo o více než ±10 %. Nejrozšířenější hodnotou vysokého napětí v distribuční síti je 22 kV. Ve východních Čechách a částečně i v severních Čechách tato hodnota činí 35 kV. Pro tyto hodnoty (nad 1000 V) je definován pojem „nejvyšší napětí pro zařízení“. Jedná se o nejvyšší napětí, pro které je zařízení určeno s ohledem na izolaci a jiné vlastnosti. Je to nejvyšší efektivní hodnota, která se vyskytne za normálních provozních podmínek v libovolném okamžiku a v libovolném místě sítě a pro kterou může být zařízení použito. Vyhláška Ministerstva průmyslu a obchodu České republiky č. 79/2010 říká, že řízení napětí v distribuční soustavě je plně v kompetenci technických dispečinků provozovatele distribuční soustavy.

5.1 Regulace na hladině vysokého napětí

U výkonových transformátorů 110/23 kV lze regulaci napětí provádět při zatížení. Tyto transformátory s převodem 110kV±8×2%/23 kV (vyskytují se ještě TR s převodem 110kV±8×1,7%/23 kV) umožňují regulaci napětí po skocích 2 %, což v systému vn 22 kV znamená skokovou změnu napětí o několik set volt. Skoková změna napětí závisí na velikosti vstupního napětí a na nastavené odbočce. Pohybuje v rozmezí cca 300 až 700 V. Z technického hlediska je jemnější nebo přesnější regulace vyloučena. Nastavení daného napětí tedy určí technický dispečink provozovatele distribuční soustavy. V současné době se v praxi vyskytují dvě koncepce regulace napětí na straně vn. Jedná se o regulaci s ohledem na zatížení a o regulaci na konstantní napětí.

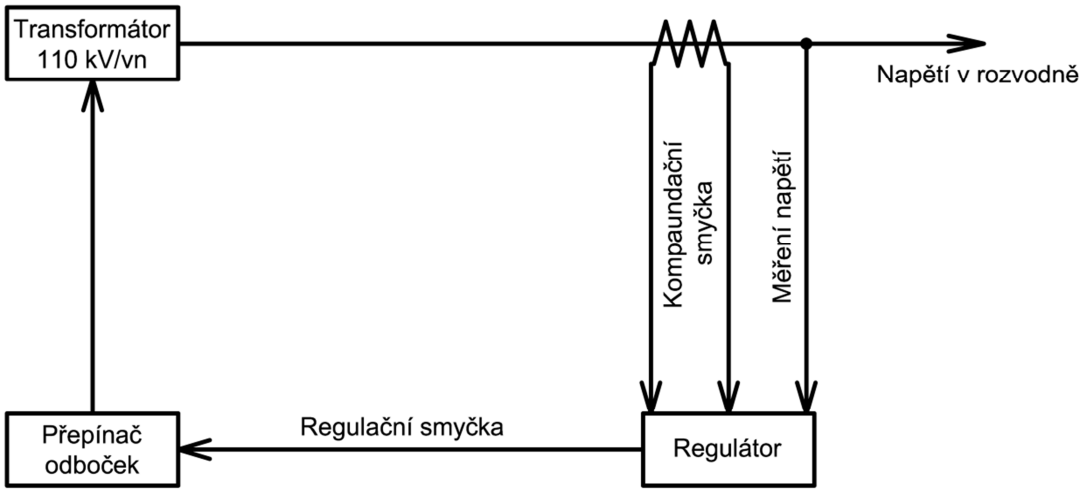
5.1.1 Regulace s ohledem na zatížení sítě (regulace s kompaundací)

Jedná se o regulaci napětí dle zatížení. Regulace je v tomto případě prováděna automatickými regulátory napětí (např. HRT 5) nebo za pomoci příslušných algoritmů dispečerského řídicího systému. Principem proudové kompaundace je snímání procházejícího proudu transformátorem 110/22 kV, který vytváří úbytek napětí v kompaundační smyčce, čímž umožňuje získat potřebné napětí i na delších vývodech. Tento úbytek je odečítán od regulovaného napětí u_2. Výsledné napětí se porovnává se zadanou hladinou u_z a vzniklá odchylka ovládá přepínač odboček. Z důvodu požadavků na přepínač odboček by počet regulací za den neměl přesáhnout 25. Je proto nutné regulátor správně nastavit pomocí několika parametrů. Jedná se o zadanou hladinu napětí (u_z), proudovou kompaundaci (D,Δ), časové zpoždění regulace (T) a necitlivost (N). Především správné nastavení necitlivosti regulátoru a časové zpoždění regulace omezuje časté přepínání odboček. Necitlivostí regulátoru se rozumí odchylka od napětí u_2 v rozvodně, na kterou nemá regulátor ještě zareagovat. Necitlivost se volí větší než skok regulace napětí jednou odbočkou, tedy větší než 2 %. V praxi se hodnota necitlivosti doporučuje cca 2,5 %. Časové zpoždění potlačuje reakce na krátkodobé odchylky napětí.

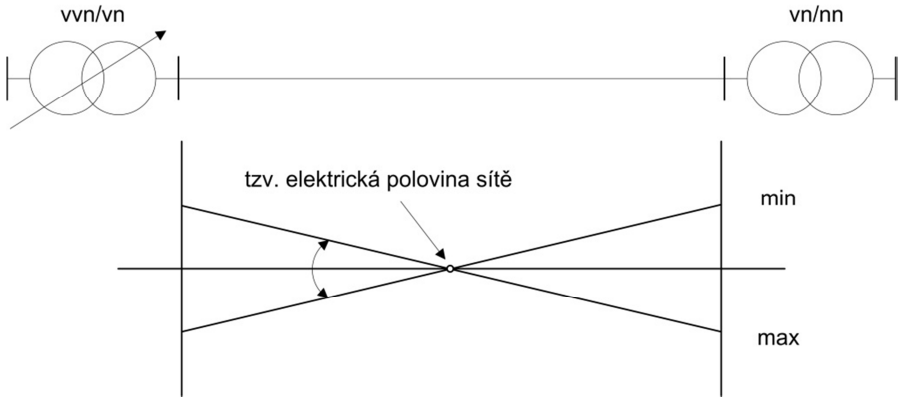
Napětí u_2 na výstupu transformátoru odpovídá hodnotě:

$$u_2 = u_z + \frac{I_2}{I_n} \cdot \Delta \text{, kde} \qquad (5.1)$$

I_2 – zatížení transformátoru (A)
I_n – jmenovitý proud transformátoru (A)
Δ – proudová kompaundace (%)



Obr. 5.1 Blokové schéma regulátoru napětí s kompaundační smyčkou

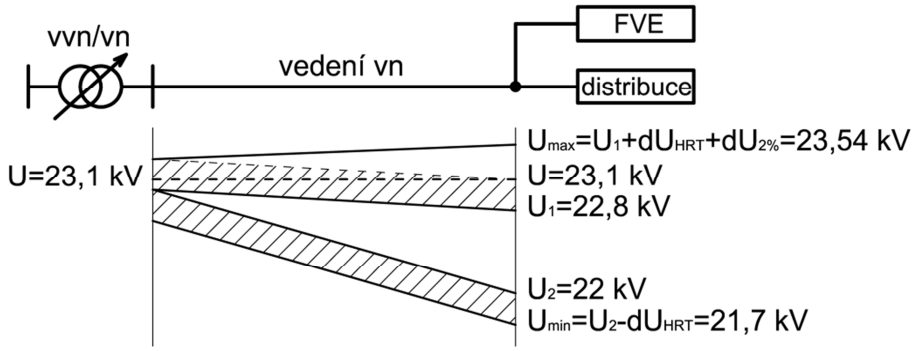


Obr. 5.2 Princip kompaundace

V tzv. elektrické polovině sítě se nachází fiktivní bod (charakteristický bod), ve kterém se udržuje napětí na konstantní hodnotě.

5.1.2 Regulace na konstantní napětí

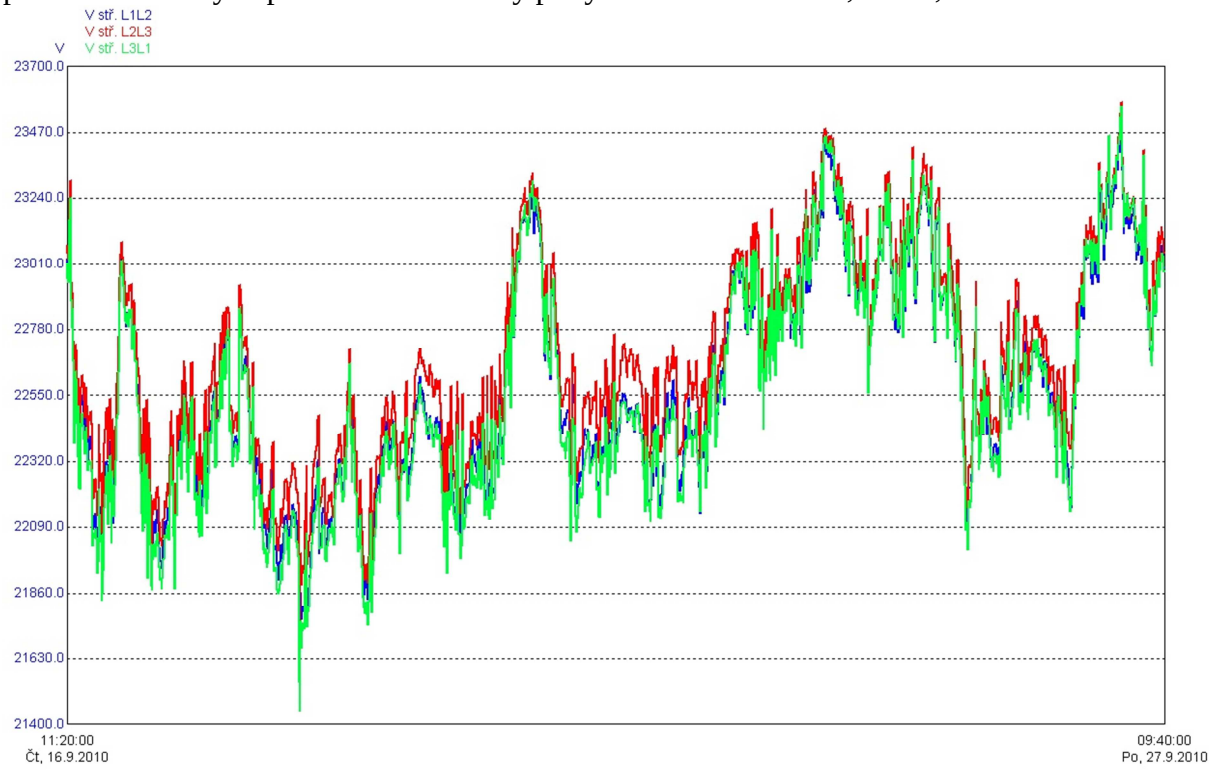
Jedná se o regulaci bez ohledu na zatížení. Na výstupu tansformátoru 110/22 kV je nejen u společnosti E.ON napětí regulováno na hodnotu 23,1 kV pro E.ON západ (dříve JČE), resp. 22,8 kV pro E.ON východ (dříve JME). Jedná se o pevnou hodnotu, která slouží v současné době k eliminaci kolísání napětí ze sítě 110 kV tak, aby v síti 22 kV bylo konstantní napětí. Tato hodnota je fixní zhruba 40 let. Důvodem je šetření přepínače odboček, který má do doby revize 100 tisíc přepnutí a dobu životnosti 800 tisíc přepnutí, což představuje velkou rezervu i pro dynamické řízení. Ovšem přihlíží se také na měření napětí v rozvodně 22 kV, ze které vychází několik vývodů, které mohou mít na konci rozdílné napětí. Zvýšením napětí v R22 kV můžeme pomoci např. polovině vývodů, ovšem za cenu ztráty optimálních parametrů druhé poloviny vývodů.
Následující úvaha odhaduje velikost napětí v síti 22 kV.



Obr. 5.3 Rozmezí napětí v síti 22 kV

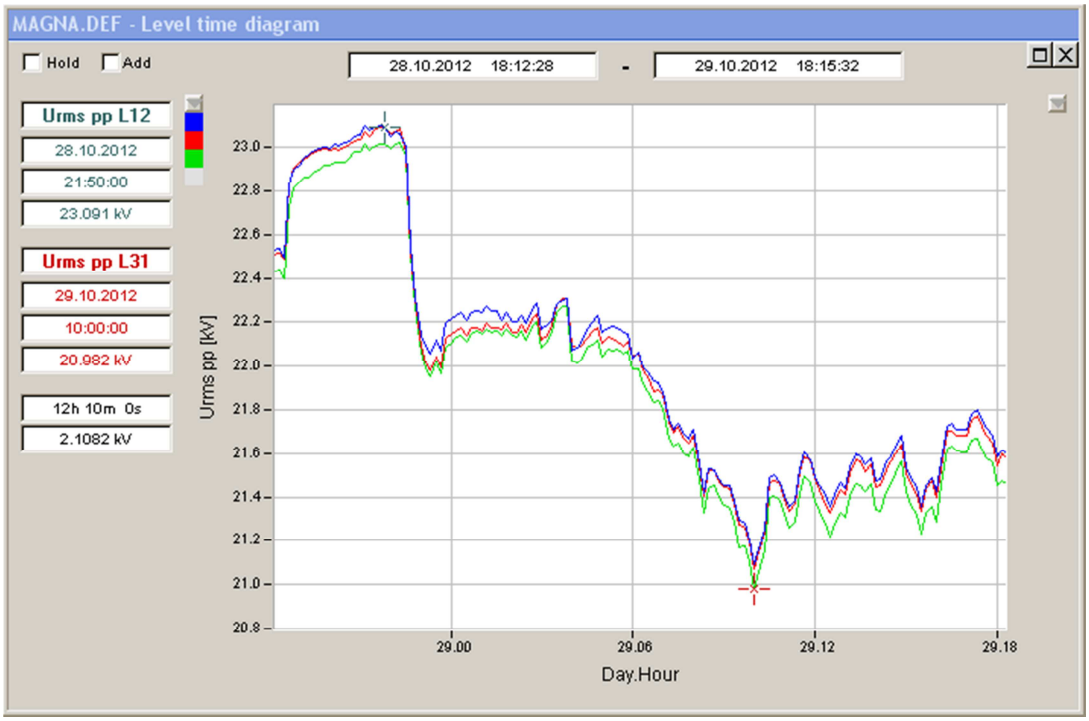
Na výstupu TR 110/22 kV je tedy napětí regulováno na pevnou hodnotu 23,1 kV. Hodnota necitlivosti HRT činí 0,3 kV (šrafovaná část na obr. 5.2 - ± 0,3 kV). Pro minimální zatížení můžeme na konci očekávat napětí U_1=23,1-0,3=22,8 kV. Bez uvažování provozu výroben a přičtením necitlivosti HRT můžeme na konci vývodu očekávat U_1=22,8+0,3=23,1 kV. Dle PPDS může ve vn síti výrobna způsobit zvýšení napětí o 2% (0,44 kV). Při uvažování zatížení sítě, necitlivosti regulátoru a maximální dovolené změny napětí způsobené provozem výrobny je maximální napětí na konci vn vedení U_{max}=22,8+0,3+0,44=23,54 kV. Vedení vn je dimenzováno tak, aby na jeho konci při reprezentativním zatížení bylo ideálních 22 kV. Při stavu, kdy výrobna elektřinu nedodává, je při zatížení konce vn vedení a odečtením

necitlivosti HRT minimální napětí U_{min}=22-0,3=21,7 kV. Za normálních provozních podmínek se tedy napětí může teoreticky pohybovat v rozmezí 21,7 – 23,54 kV.



Obr. 5.4 Průběh napětí na konci vývodu 22 kV

Potvrzení teoretických předpokladů znázorňuje obr. 5.3, kde se jedná o analýzu konkrétního praktického měření velikosti napětí za několik dní. Hodnoty jsou průměrem za 10 minut. Je zřejmé, že napětí v síti 22 kV se může pohybovat v rozmezí 21,5 – 23,6 kV.



Obr. 5.5 Denní průběh napětí na konci vývodu 22 kV

5.2 Regulace na hladině nízkého napětí

V distribuční síti nízkého napětí lze regulaci provádět na primárním vinutí transformátoru 22/0,42(dříve 0,4) kV pomocí přepínače odboček v beznapěťovém stavu transformátoru a v současnosti je možné nasazení regulačních DTR s regulací pod zatížením.

5.2.1 Regulace v beznapěťovém stavu DTR

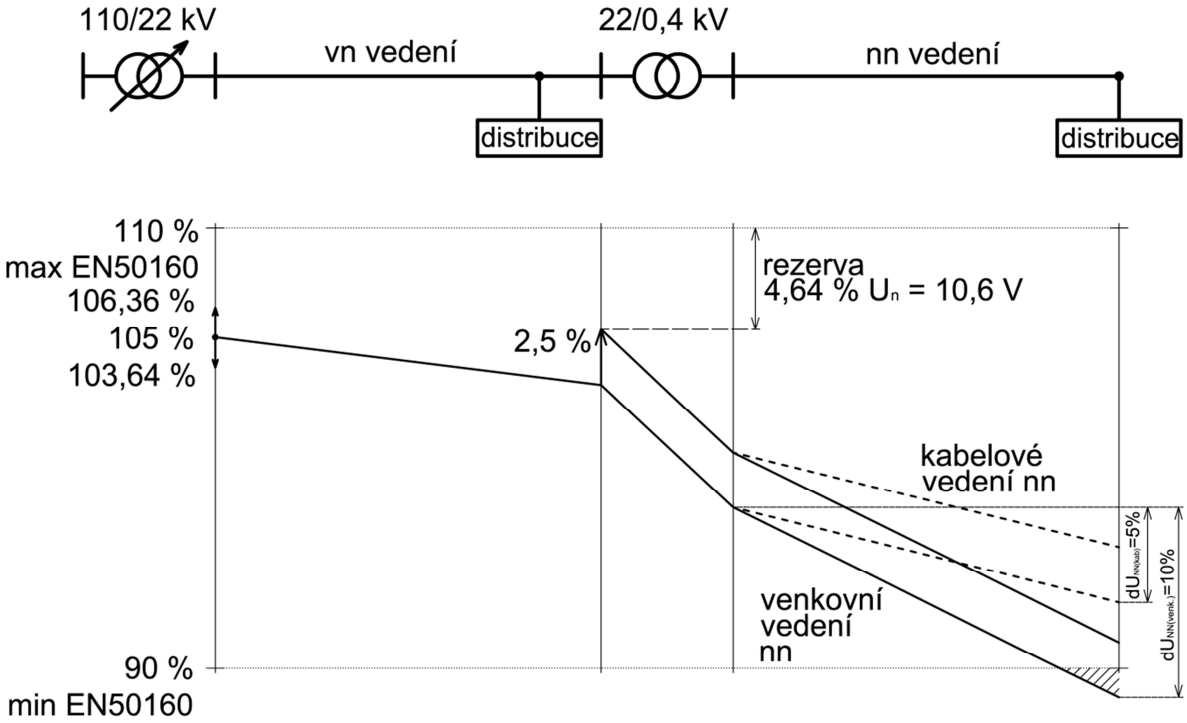
Odbočku lze přepnout do pěti různých stavů: ±2×2,5 %U_n a do střední polohy. Starší transformátory mají pouze tři stupně: ±5 % a střední polohu. Správná odbočka je nastavena při uvádění transformátoru do provozu, z čehož vyplývá, že nastavení odbočky se provádí pouze v beznapěťovém stavu. Za provozu tedy není přenastavení odbočky možné. Na výstupu transformátoru je tedy napětí:

$$u_2 = u_1 + \delta u_T + \Delta u_T \text{, kde} \qquad (5.2)$$

u_1, u_2 – napětí na primárním a sekundárním vinutí
δu_T – odchylka napětí daná pevně nastavenou odbočkou regulace
Δu_T – úbytek napětí na transformátoru (při I_n cca 3 %)

Z provozního hlediska se jedná o běžnou záležitost. Tato manipulace ovšem nesouvisí pouze s přerušením dodávky elektrické energie zákazníkům z tohoto transformátoru, ale také s výjezdem montérů, manipulacemi na úsečníku a se zajištěním pracoviště. Z těchto důvodů přichází v úvahu nasazení distribučního transformátoru s regulací odboček pod napětím. V současné době je ve společnosti E.ON Distribuce, a.s. provozováno zhruba 18 tisíc kusů distribučních transformátorů vn/nn s regulací odboček v beznapěťovém stavu.

- Distribuční síť bez OZE

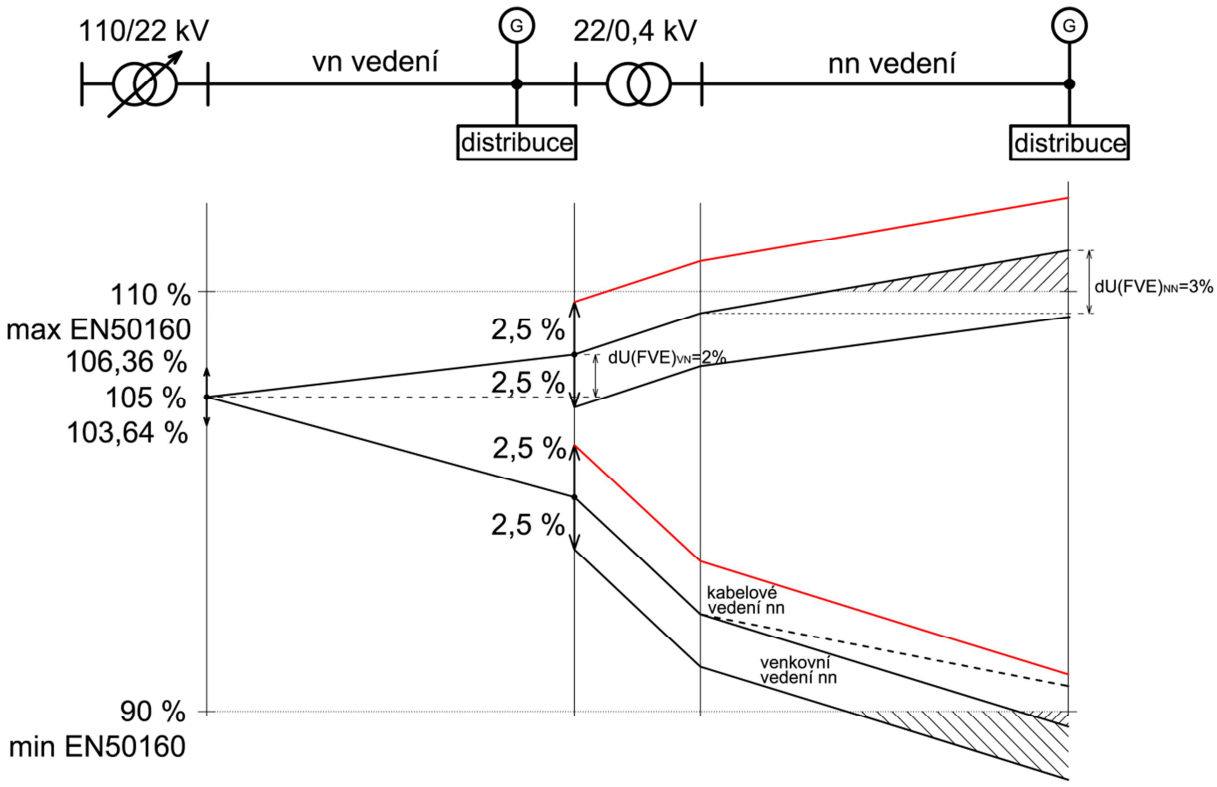


Obr. 5.6 Rozptyl napětí v distribuční síti bez OZE

Z obr. 5.5 vyplývá, že hodnota na výstupu TR 110/22 kV je stanovena na 23,1 kV (105 % U_n). Ve skutečnosti může vlivem necitlivosti regulátoru napětí dosahovat hodnot v mezích 23,1-0,3=22,8 kV (103,64 %) a 23,1+0,3=23,4 kV (106,36 %). Tím, že nejsou v sítích vn a nn připojeny výrobny, nedochází na vedeních vn a nn ke zvýšení napětí. Důsledkem zatížení je úbytek napětí na vedení vn v mezích 1 až 4 % U_n. V případě provozu DTR 22/0,4 kV s nastavenou střední odbočkou nebo DTR 22/0,42 s nastavenou krajní odbočkou +5 % (plus odbočka snižuje napětí a minus odbočka napětí zvyšuje), dochází přes DTR naprázdno k identickému přenesení procentního napětí do nn sítě. V nn sítích dochází vlivem zatížení také k úbytkům napětí. Kabelové vedení vykazuje úbytek napětí (5 % U_n) menší než vedení venkovní (10 % U_n). K úbytku napětí dochází také na TR 22/0,4 kV (při I_n cca 3 % U_n). Je patrná také pod limitní mezní hodnota napětí na konci nn vedení (<90 % U_n dle ČSN EN 50160). Pokud by tento stav trval více než 5 % času, odchylky napětí nevyhoví požadavkům normy ČSN EN 50160 dle PPDS z důvodu podpětí. Napětí na konci nn vedení lze zvýšit na DTR 22/0,4 kV přenastavením střední odbočky na odbočku -2,5 %. U DTR 22/0,42 kV by se zvýšení napětí docílilo změnou -5 % odbočky na -2,5 % odbočku. Dochází tak ke zvýšení napětí o 2,5 % U_n v celé nn síti (posunutí odchylky napětí k hornímu tolerančnímu pásmu).

- Distribuční síť s OZE

Podle PPDS mohou výrobny (na obr. 5.6 G - generátory) ve vn síti svým provozem způsobit zvýšení napětí maximálně 2 % U_n. U nn sítí je tato hodnota eliminována na 3 % U_n.



Obr. 5.7 Rozptyl napětí v distribuční síti s OZE

Při provozu sítě s nastavenou střední odbočkou u DTR 22/0,4 kV nebo s krajní odbočkou + 5 % na DTR 22/0,42 kV vzniká nejen na konci venkovního vedení nn podpětí, ale také obecně přepětí. Je to způsobeno zvýšením napětí výrobnami ve vn a nn síti 3+2=5 % U_n. Bez uvažování výroben na obr. 5.5 je rezerva v horním tolerančním pásmu ovšem „pouze“ 4,64 % U_n. Dochází tak k negativnímu dopadu na nn síť. Částečným řešením je přenastavení

střední odbočky u DTR 22/0,4 kV na odbočku +2,5 %, čím dojde k eliminaci přepětí, ale také v případě reprezentativního zatížení k výraznějšímu podpětí. U DTR 22/0,42 kV nelze napětí snížit, jelikož odbočka -5 % je již krajní. Při nastavení odbočky -2,5 % u DTR 22/0,4 kV nebo +2,5 % u DTR 22/0,42 kV dochází v nn síti k výraznému přepětí (na obr. 5.6 červeně). S takovýmto nastavením odboček u DTR nelze síť s nasazenými OZE provozovat. Je tedy nutné napětí na výstupu DTR 22 kV/nn snížit o 1 odbočku.

5.2.2 Regulace napětí při zatížení DTR

Nasazení těchto transformátorů se jeví jako východisko při řešení problému s nevyhovujícími hodnotami napětí v síti způsobené odchylkami. Jedná se o několikrát dražší transformátory, než kterými jsou v současné době osazeny distribuční transformační stanice. Na trhu existuje několik společností nabízející tyto transformátory. Uvádím tabulku 5.1 s technickými parametry, výhodami, nevýhodami a použitím různých typů, které se liší především principy regulací.

Tab. 5.1 Základní technické parametry DTR s regulací pod zatížením

Výrobce	**Magtech**	**Efasec**	**Reinhausen**	**Siemens**
Jmenovitý výkon (kVA)	250, 400, 600	400, 600, 1000	400, 630	400, 630
Regulační rozsah při zatížení (%Un)	-6%	±4×2,5 %	±4×2,5 %	±3,57 % pro 400 kVA ±4,34 % pro 630 kVA
Typ regulace, přepínač odboček	Magnetickým polem, plynulá regulace	Mechanickým přepínačem	Hybridním přepínačem	Přepínačem na principu výkonové elektroniky
Rozměry d×š×v (cm)	158×100×166	280×130×235	175×95×172	129×93×141
Hmotnost vč. oleje (kg)	2600	3950	2760	1650
Výhody	By-pass[3]	Velký regulační rozsah	Velký regulační rozsah	Malé rozměry a hmotnost
Nevýhody	Napětí je na výstupu možno pouze snižovat	Velké rozměry a hmotnost	Pouze do kompaktních tansformačních stanic	Menší regulační rozsah
Použití	V sítích až pro dvojnásobek úrovně výkonu FVE. Jako trvalé řešení→žádná další investice do úpravy distribuční sítě	Tam, kde napětí ve vn síti kolísá ve velkém rozsahu	Vnitřní transformační stanice	Především venkovní transformační stanice

[3] Transformátor Magtech má dva nn výstupy (regulovaný a neregulovaný). Neregulovaný výstup (by-pass) pro „normální“ tok energie pro spotřebitele. Jestli-že se tok energie stává „reverzní“ (díky nn zdrojům) a překračuje předem stanovenou hodnotu, spustí se automaticky regulace napětí až do doby, kdy dojde k útlumu napětí do stanovených mezí.

Obr. 5.8 Distribuční transformátor SIEMENS s regulací pod zatížením [19]

5.3 Analýza regulačních transformátorů 22 kV/nn

Následující tabulky (5.2 a 5.3) jsem vytvořil pomocí softwaru MS Excel za účelem porovnání efektivnosti nasazování transformátorů vn/0,4 kV a vn/0,42 kV. V pravé straně znázorňují rozsahy výstupních fázových napětí ve voltech při vstupním napětí 110 kV a při nastavení určité odbočky na straně vvn transformátoru vvn/vn. Levé sloupce tabulek znázorňují odbočky a k nim odpovídající výstupní napětí transformátoru vvn/vn. Při výpočtu hodnot u těchto tabulek jsem zanedbal úbytky napětí na vedení. Jde tedy o stav, kdy je transformační stanice vn/nn umístěna v blízkosti transformační stanice vvn/vn.

Tab. 5.2 Rozsah výstupních fázových napětí transformátorů 22/0,4 kV

110/23 kV		22/0,4 kV → fázové hodnoty (V)				
odbočka	napětí (kV)	-5%	-2,50%	0	2,50%	5%
-8	27,381	303	295	287	280	274
-7	26,744	296	288	281	274	267
-6	26,136	289	281	274	268	261
-5	25,556	282	275	268	262	255
-4	25,000	276	269	262	256	250
-3	24,468	270	263	257	251	245
-2	23,958	265	258	251	245	240
-1	23,469	259	253	246	240	235
0	23,000	254	248	241	236	230
1	22,549	249	243	237	231	225
2	22,115	244	238	232	226	221
3	21,698	240	234	228	222	217
4	21,296	235	229	224	218	213
5	20,909	231	225	219	214	209
6	20,536	227	221	216	210	205
7	20,175	223	217	212	207	202
8	19,828	219	213	208	203	198

Tab. 5.3 Rozsah výstupních fázových napětí transformátorů 22/0,42 kV

110/23 kV		22/0,42 kV → fázové hodnoty (V)				
odbočka	napětí (kV)	-5%	-2,50%	0	2,50%	5%
-8	27,381	318	310	302	294	287
-7	26,744	310	302	295	288	281
-6	26,136	303	295	288	281	274
-5	25,556	297	289	282	275	268
-4	25,000	290	283	276	269	262
-3	24,468	284	277	270	263	257
-2	23,958	278	271	264	258	251
-1	23,469	272	265	259	252	246
0	23,000	267	260	254	247	241
1	22,549	262	255	249	242	237
2	22,115	257	250	244	238	232
3	21,698	252	245	239	233	228
4	21,296	247	241	235	229	224
5	20,909	243	236	230	225	219
6	20,536	238	232	226	221	216
7	20,175	234	228	222	217	212
8	19,828	230	224	219	213	208

Poznámka:

	napětí mimo odchylku
	napětí s odchylkou ±10 %
	napětí s odchylkou ±6 %

Příklad výpočtu pro zvyšující odbočku „-1“:

$$p = \frac{110 - 1 \cdot 0{,}02 \cdot 110}{23} = 4{,}687 \rightarrow U_2 = \frac{U_1}{p} = \frac{110}{4{,}687} = 23{,}469\ kV$$

$$p = \frac{22 - 1 \cdot 0{,}025 \cdot 22}{0{,}4} = 53{,}625 \rightarrow U_{2s} = \frac{U_1}{p} = \frac{23}{53{,}625} = 0{,}423\ kV$$

$$U_{2f} = \frac{U_{2s}}{\sqrt{3}} = \frac{0{,}423}{\sqrt{3}} = 248\ V$$

V následujících tabulkách 5.4 a 5.5 uvažuji při výpočtu úbytek napětí na vedení nn 10 %.

Tab. 5.4 Rozsah výstupních fázových napětí transformátorů 22/0,4 kV (uvažován úbytek napětí 10 %)

110/23 kV		22/0,4 kV → fázové hodnoty (V)				
odbočka	napětí (kV)	-5%	-2,50%	0	2,50%	5%
-8	27,381	272	265	259	252	246
-7	26,744	266	259	253	247	241
-6	26,136	260	253	247	241	235
-5	25,556	254	248	241	236	230
-4	25,000	249	242	236	230	225
-3	24,468	243	237	231	226	220
-2	23,958	238	232	226	221	216
-1	23,469	233	227	222	216	211
0	23,000	229	223	217	212	207
1	22,549	224	218	213	208	203
2	22,115	220	214	209	204	199
3	21,698	216	210	205	200	195
4	21,296	212	206	201	196	192
5	20,909	208	203	198	193	188
6	20,536	204	199	194	189	185
7	20,175	201	195	191	186	182
8	19,828	197	192	187	183	178

Tab. 5.5 Rozsah výstupních fázových napětí transformátorů 22/0,42 kV (uvažován úbytek napětí 10 %)

110/23 kV		22/0,42 kV → fázové hodnoty (V)				
odbočka	napětí (kV)	-5%	-2,50%	0	2,50%	5%
-8	27,381	286	279	272	265	259
-7	26,744	279	272	265	259	253
-6	26,136	273	266	259	253	247
-5	25,556	267	260	254	247	241
-4	25,000	261	254	248	242	236
-3	24,468	255	249	243	237	231
-2	23,958	250	244	238	232	226
-1	23,469	245	239	233	227	222
0	23,000	240	234	228	223	217
1	22,549	235	229	224	218	213
2	22,115	231	225	219	214	209
3	21,698	227	221	215	210	205
4	21,296	222	217	211	206	201
5	20,909	218	213	207	202	198
6	20,536	214	209	204	199	194
7	20,175	211	205	200	195	191
8	19,828	207	202	197	192	187

V současné době jsou transformační stanice vn/nn umisťovány co nejblíže odběru, což po stránce přístupu usnadňuje montáž a údržbu a dochází k eliminaci úbytku napětí na vedení. V minulosti se však tyto transformovny umisťovaly například na krajích obcí nebo v polích mezi obcemi. Vznikla tak i několika set metrů dlouhá vzdálenost mezi odběrateli a tím i větší úbytek napětí. Pro tento fakt mělo používání transformátorů s převodem 22/0,4 kV pro napájení sítě se jmenovitým napětím 220/380 V své opodstatnění. Nynější nasazování standardních transformátorů 22/0,42 kV se jeví jako nevhodné. Výhodou je ekonomická stránka, ovšem technika jde v tomto případě stranou. Pro distribuční síť vysokého napětí 22 kV je v rámci unifikace napětí nutné uvažovat nejvyšší hodnotu napětí 24 kV (dříve 25 kV). A to z důvodu, že nelze předpokládat, že by nynější jednotliví výrobci rozvaděčů, kabelů, izolátorů atd. uvažovali při výrobě a dimenzování svých výrobků s hodnotou 25 kV. U distribučních soustav se jmenovitým napětím 22 kV je tedy vhodné regulovat na primární straně na průměrnou hodnotu 23,4 kV, která při běžném kolísání zajišťuje nepřekročení hodnoty 24 kV a současně zajišťuje možnost nastavení transformátoru 22/0,42 kV tak, aby nedošlo k překročení hodnoty 230±10 % (253 V). Poté tedy hodnota nejvyššího napětí pro zařízení 25 kV[4] ztrácí smysl a je nutné přistoupit v případě jmenovitého napětí sítě 22 kV k obecně platné hodnotě 24 kV[5].

5.4 Vliv OZE na provoz distribuční sítě nn

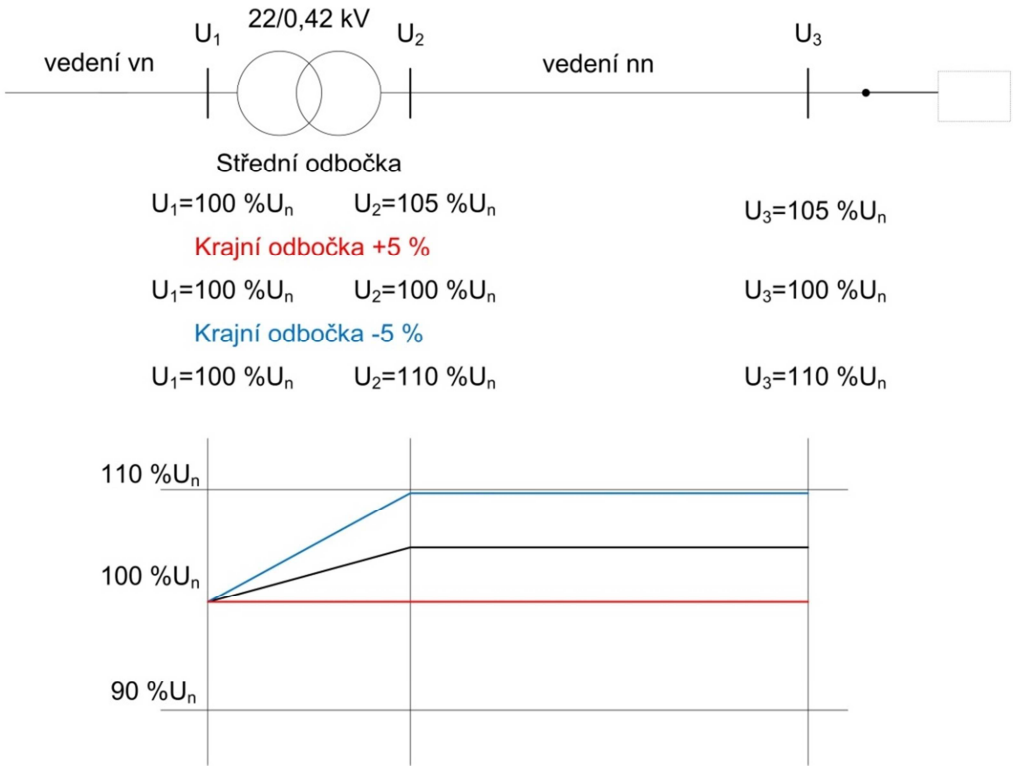
Konec vedení vn bývá při reprezentativním zatížení obvykle dimenzován na ideálních 22 kV. Kapitola 5.1.2 uvádí teoretické odvození rozmezí napětí, které je možné na konci vedení vn očekávat (21,7 – 23,54 kV). V praxi, dokázáno měřením, je možné očekávat napětí 21,5 – 23,6 kV. V následujících modelech nn sítí je uvažován výkon DTR 250 kVA.

5.4.1 Síť nn s DTR 22/0,42 kV

Pro nn síť, která je osazena DTR 22/0,42 kV platí, že napětí zdroje je ve sdružených hodnotách o 20 V (5 % U_n) vyšší než jmenovité napětí sítě. Pokud je na vstup DTR naprázdno přivedeno ideálních 22 kV, lze na jeho výstupu změřit hodnotu 420 V (105 % U_n). Pro nastavení krajních odboček (+5 % a -5 % U_n) platí následující úvaha na obr. 5.9, kdy dané barevné označení odbočky odpovídá průběhu napětí.

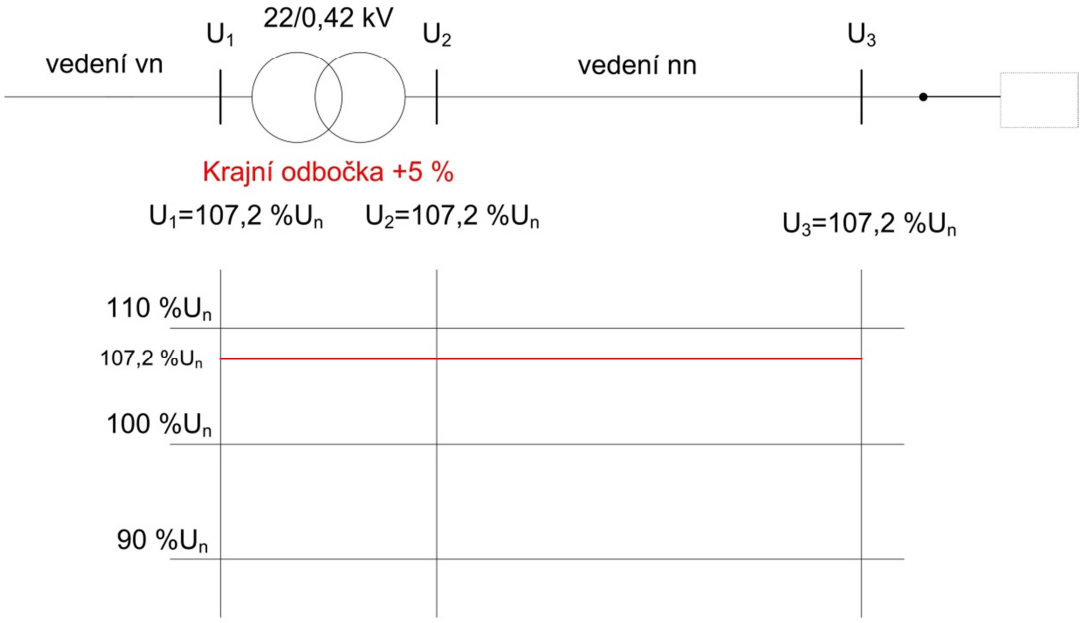
[4] Nejvyšší efektivní hodnota sdruženého napětí stanovena normou ČSN 33 0120 (2001) - Normalizované napětí IEC dle přílohy NA.

[5] Nejvyšší efektivní hodnota sdruženého napětí stanovena normou ČSN 33 0120 (2001) - Normalizované napětí IEC dle tab. III.



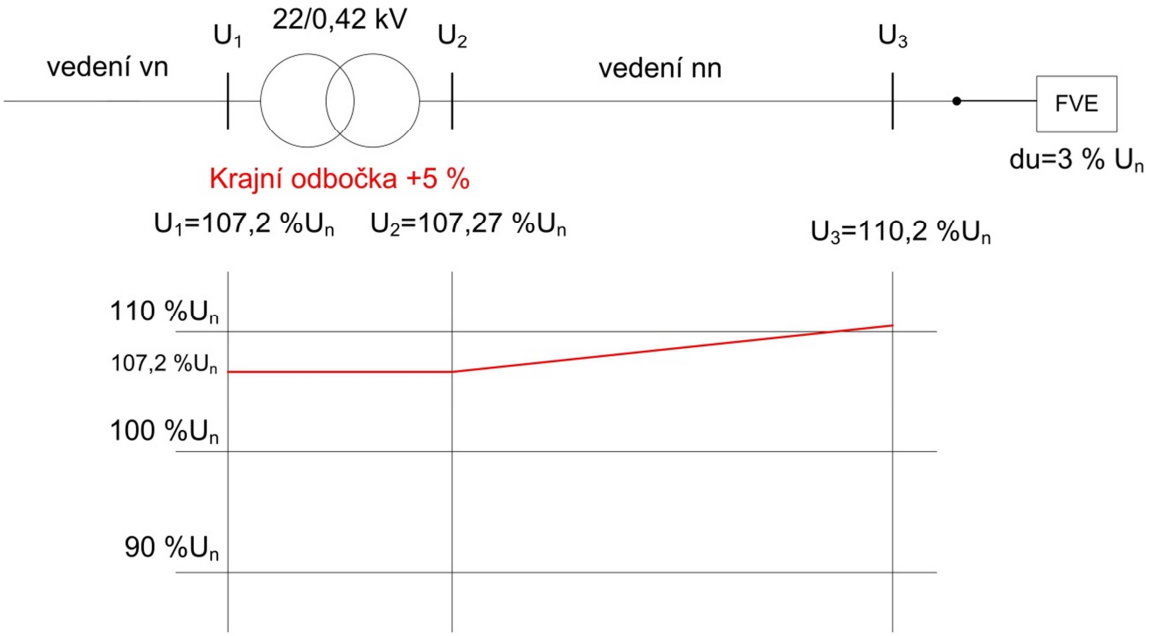
Obr. 5.9 Průběh napětí v nn síti naprázdno – U_1=22 kV

Nyní uvažujme mezní stav sítě vn, kdy maximální hodnota napětí je 23,6 kV a síť nn naprázdno s DTR 22/0,42 kV s nastavenou odbočkou +5 %.



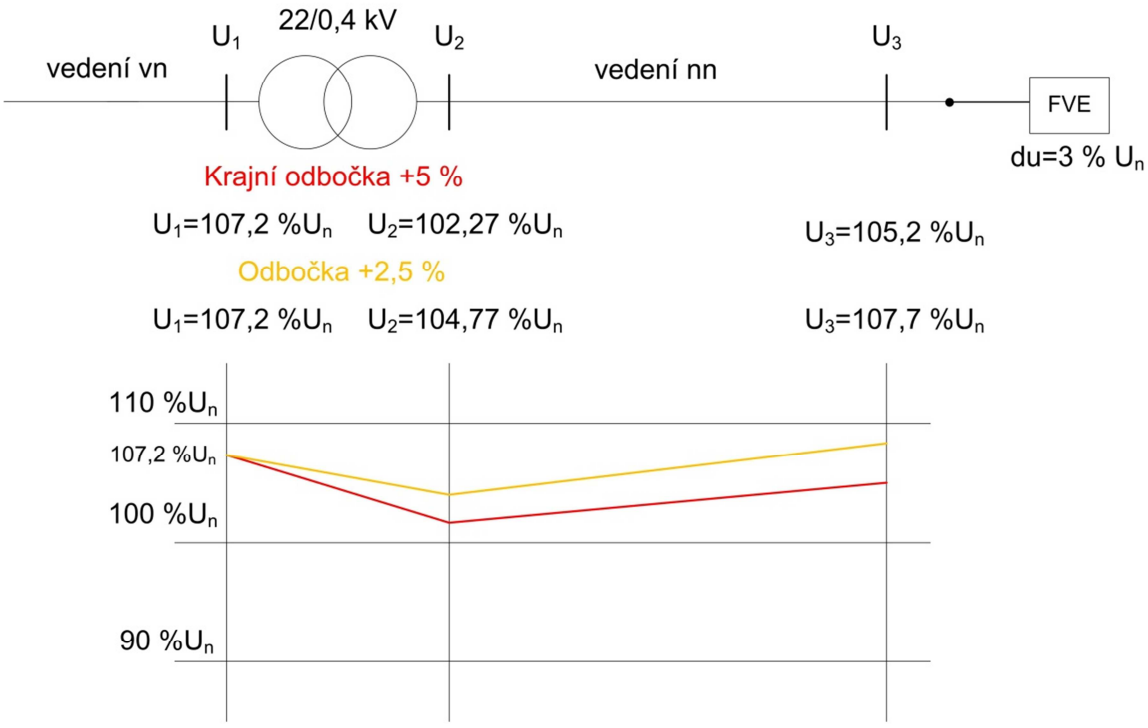
Obr. 5.10 Průběh napětí v nn síti naprázdno – U_1=23,6 kV, krajní odbočka +5 %

Nyní uvažujme případ provozu nn sítě, kdy zanedbáme odběr a budeme uvažovat provoz FVE připojené do uzlu 3. PPDS dovolují změnu napětí v uzlu U_3 o 3% U_n. Takováto úvaha reprezentuje situaci venkovských obcí, kdy v poledních hodinách za jasného počasí dochází k maximální výrobě FVE a spotřeba domácností je minimální.



Obr. 5.11 Průběh napětí v nn síti– U_1=23,6 kV, krajní odbočka +5 %, zanedbatelný odběr, uvažování výrobny (FVE dle PPDS 3 % U_n)

Z obr. 5.11 vyplývá, že v uzlu U3 dochází za výše uvedených předpokladů k přepětí (>110 % U_n) dle ČSN EN 50160. Dále vyplývá fakt, že napětí v síti přenastavením odbočky již snížit nemůžeme. Řešením této situace je výměna dosavadního DTR 22/0,42 kV za DTR typu 22/0,4 kV. Viz obr. 5.12.

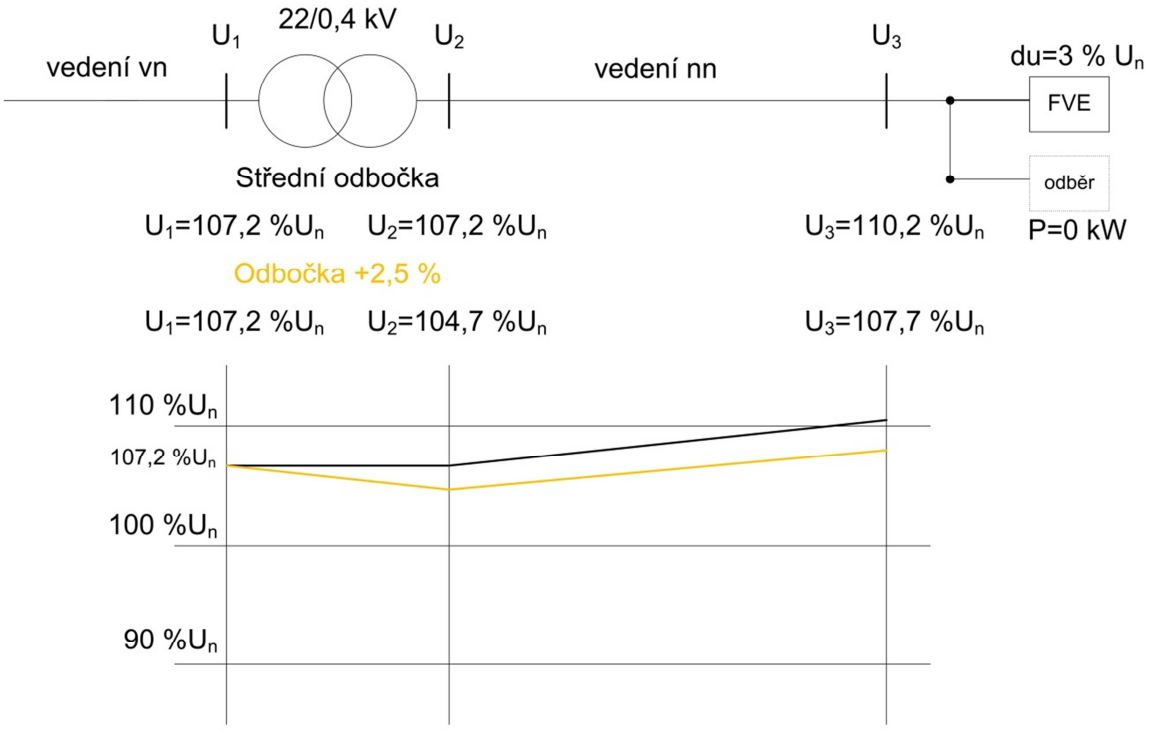


Obr. 5.12 Průběh napětí v nn síti– U_1=23,6 kV, krajní odbočka +5 % a +2,5 %, zanedbatelný odběr, uvažování výrobny (FVE dle PPDS 3 % U_n)

Poznámka: Hodnota 0,07 % U_n reprezentuje změnu napětí FVE odpovídající 3 % U_n v uzlu U_3 přepočtená do uzlu U_2.

5.4.2 Síť nn s DTR 22/0,4 kV

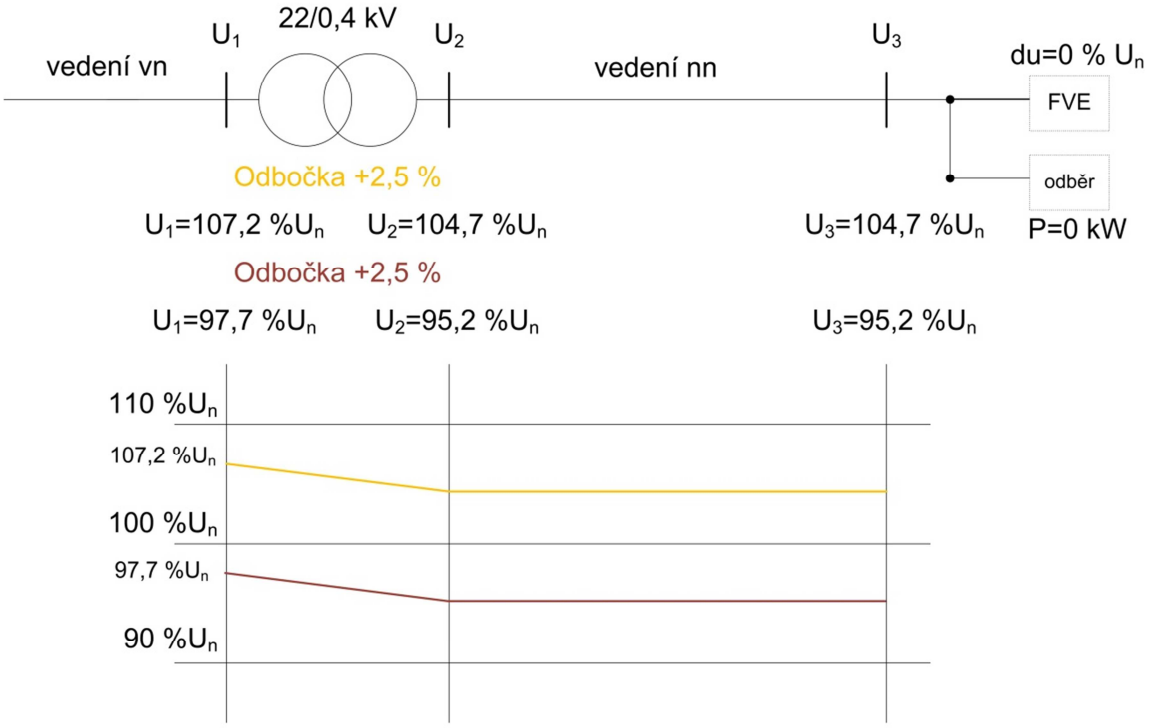
Opět uvažujme případ provozu nn sítě, kdy zanedbáme odběr a budeme uvažovat provoz FVE připojené do uzlu 3. PPDS dovolují změnu napětí v uzlu U_3 o 3% U_n. Takováto úvaha reprezentuje situaci venkovských obcí, kdy v poledních hodinách za jasného počasí dochází k maximální výrobě FVE a spotřeba domácností je minimální. Pro jednoduchost a názornost je zanedbána impedance TR 22/0,4 kV.



Obr. 5.13 Průběh napětí v nn síti– U_1=23,6 kV, střední odbočka a +2,5 % odbočka, zanedbatelný odběr, uvažování výrobny (FVE dle PPDS 3 % U_n)

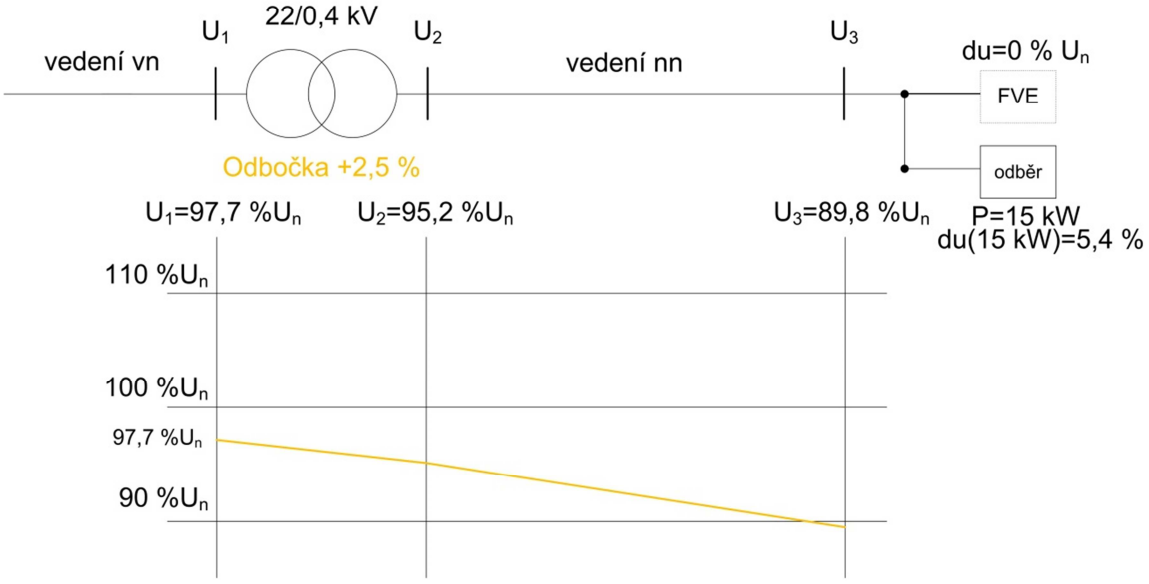
Z obr. 5.13 pro střední odbočku vyplývá, že v uzlu U3 dochází za výše uvedených předpokladů k přepětí (>110 % U_n) dle ČSN EN 50160. Situaci lze řešit přenastavením odbočky na DTR 22/0,4 kV (na polohu +2,5 % U_n).

Dále uvažujme síť bez provozu FVE. Takováto situace může nastat např. při oblačném počasí nebo v noci. Viz obr. 5.14. Uvažujme také mezní stav sítě vn, kdy minimální hodnota napětí je 21,5 kV a maximální 23,6 kV.



Obr. 5.14 Průběh napětí v nn síti– U_1=21,5 kV a U_1=23,6 kV, odbočka +2,5%, zanedbatelný odběr, bez uvažování výrobny (du=0 % U_n)

Nakonec přichází v úvahu stav sítě nn s uvažovaným odběrem dle obr. 5.15. Délka vedení nn je 600 m, typ vodiče AlFe42. Jedná se o obvyklou délku nn vývodu s průměrným průřezem venkovního vedení nn.



Obr. 5.15 Průběh napětí v nn síti– U_1=21,5 kV, odbočka +2,5%, 3f odběr 15 kW, bez uvažování výrobny (du=0 % U_n)

Z obr. 5.15 vyplývá, že v uzlu U_3 dochází k podpětí ($U<90$ % U_n). Tento stav lze očekávat v zimních měsících, kdy příkon běžného elektrického kotle je cca 12 – 15 kW. Podpětí v síti tak nastane při jakémkoli stavu zatížení sítě nn. Již u obr. 5.14 není uvažován úbytek napětí na venkovním vedení. Ten dosahuje velikosti cca 10 % U_n, na což hodnota 5,2 % nad 90 % nestačí k omezení podpětí.

Všechny výše analyzované stavy jsou reálné a byly v DS prokázány.

Závěr

Cílem této diplomové práce bylo především vyhodnocení archivních dat z měření zatížení DTR a zpracování problematiky regulace DTR 22kV/nn v souvislosti se zvyšujícím se počtem distribuovaných zdrojů zapojených do sítí nn.
Se zvyšujícím podílem rozptýlené výroby, především z obnovitelných zdrojů el. energie, roste počet nevyhovujících sítí s ohledem na kvalitu napětí. Zajištění patřičné úrovně kvality dodávky elektřiny koncovým zákazníkům navyšuje distributorovi investiční a provozní náklady.
Účelem mé analýzy dat z měření zatížení DTR bylo zajistit a navrhnout efektivní nasazování do distribuční sítě a nahrazování stávajících DTR. Současně se jedná i o predikci zatížení plánovaného DTR nasazovaného v podobných lokalitách s identickými vlastnostmi. Pro názornost je práce doplněna grafy zobrazující procentní zatížení jednotlivých jmenovitých výkonů DTR. Díky přenosu dat do PC byl odečet hodnot bezchybný a velice rychlý.
V závěrečné kapitole poukazuji na problematiku regulace napětí. Výsledkem jsou grafické rozbory s návrhy možných opatření pro zlepšení kvality napětí ve stávajících vyhovujících i nevyhovujících sítích. Jedná se především o případ, kdy se nasazování DTR 22/0,42 kV jeví jako nevhodné a je nutné tyto stroje vyměnit za DTR 22/0,4 kV. Poté je dosaženo co nejvyššího procenta sítí, které splňují požadavky normy ČSN EN 50160.

Seznam literatury a informačních zdrojů

[1] TESAŘOVÁ, Miloslava a Milada ŠTROBLOVÁ. *Průmyslová elektroenergetika*. 1.vyd. Plzeň: Západočeská univerzita, 2000, 154 s. ISBN 80-708-2703-3.

[2] PETROV, G.N. *Elektrické stroje 1*. Praha : Academia, 1980. 652s.

[3] BARTOŠ, Václav . *Teorie elektrických strojů*. Plzeň : Západočeská univerzita v Plzni, 2009. 230s.

[4] MENTLÍK, Václav, et al. *Diagnostika elektrických zařízení*. Praha : BEN, 2008. 440s.

[5] KAŠPÍREK, Martin a Michal VOGEL. Analýza zatížení transformátorů 22/0,4kV, 110/22kV a vvn/110kV. *Tábor: Referáty konference ČK CIRED, 2011.*

[6] KAŠPÍREK, Martin. Dopad OZE na provoz distribučních nn sítí. *Tábor: Referáty konference ČK CIRED, 2011.*

[7] KAŠPÍREK, Martin. Dopad provozu OZE na garantované standardy kvality napětí. *Brno: Referáty konference ERU, 2012.*

[8] KAŠPÍREK, Martin. Praktické možnosti eliminace vlivu rozptýlené výroby na kvalitu napětí. *Brno: Referáty konference ERU, 2012.*

[9] BARTELSEN, Martin. Diplomová práce: Posouzení možnosti snížení ztrát elektrické energie v transformaci vn/nn ve vybrané oblasti distribuční sítě. *Plzeň, 2008.*

[10] PŘIBYL, Petr. Diplomová práce: Zatížení v distribučních transformačních stanicích na hladině nízkého napětí v obytné zástavbě. *Plzeň, 2011.*

[11] Konstrukce suchých zalévaných transformátorů. Dostupné z: http://www.trasfor.cz/documents/Konstrukce.pdf

[12] [cit. 2012-10-29]. Obrázek ve formátu JPG. Dostupné z: http://www.dofa.sk/transformatory.phtml?id5=7653

[13] [cit. 2012-10-29]. Obrázek ve formátu JPG. Dostupné z: http://www.transformatory.cz/nove-transformatory/kategorie/2#prettyPhoto

[14] [cit. 2012-11-29] http://www.trasfor.sk/documents/Naklady1.pdf

[15] [cit. 2012-11-29] http://www.trasfor.sk/documents/Paralelnichod.pdf

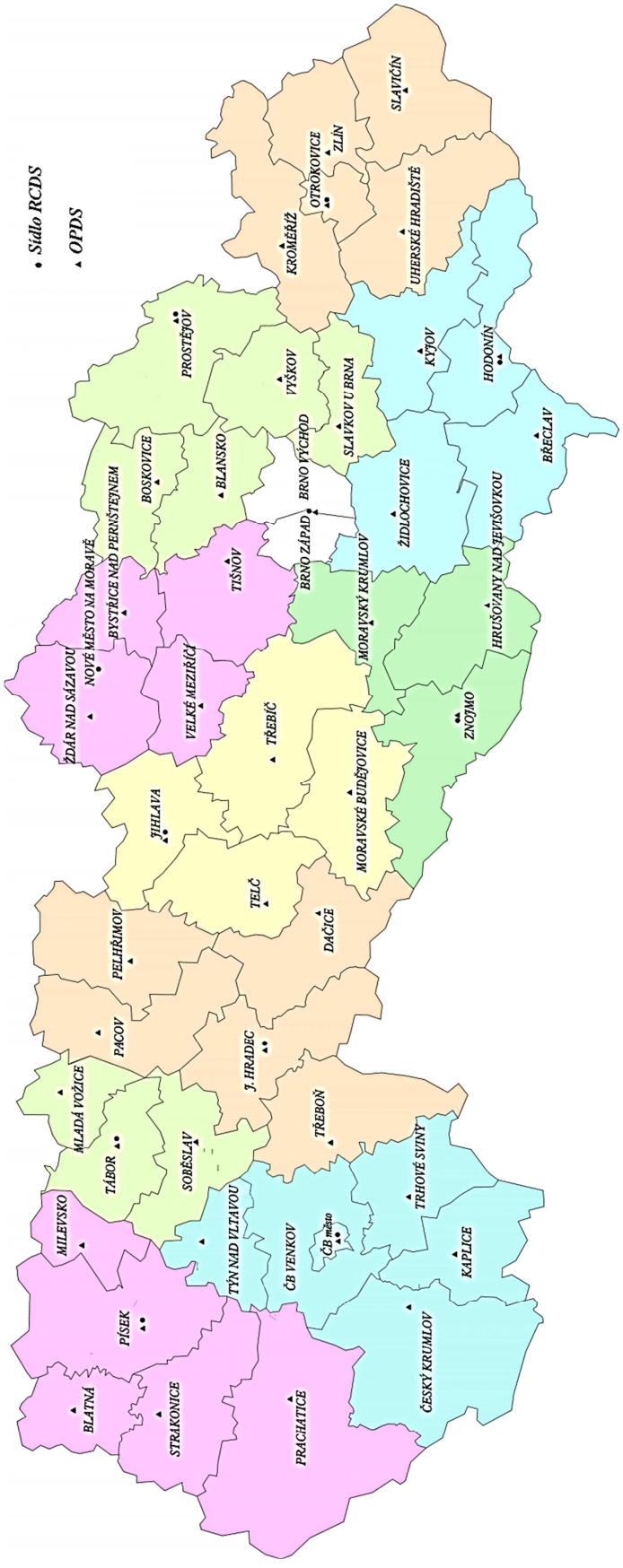
[16] ČSN 33 0120

[17] ČSN 33 0121

[18] ČSN IEC 60076-7

[19] Archiv E.ON Česká republika, s.r.o.

Přílohy



Obr. Zásobované území společnosti E.ON Česká republika, s.r.o.