

České vysoké učení technické v Praze

Fakulta elektrotechnická

Katedra ekonomiky, manažerství a humanitních věd



Výměna transformátorů 110/22 kV

Replacement of transformers 110/22 kV

Diplomová práce

Master's thesis

Vedoucí diplomové práce: Ing. David Růžek

Autor: Bc. Zoltán Fábik

Studijní program: Elektrotechnika, energetika a management

Obor: Ekonomika a řízení energetiky

2015

České vysoké učení technické v Praze
Fakulta elektrotechnická

Katedra ekonomiky, manažerství a humanitních věd

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Student: Zoltán Fábik

Studijní program: elektrotechnika, energetika a management
Obor: ekonomika a řízení energetiky

Název tématu: Výměna transformátorů 110/22 kV

Pokyny pro vypracování:

- technické parametry stávajících transformátorů 110/22 kV
- předpis pro snižování ztrát transformátorů EU, hlučnost
- rozbor zatížení transformátorů
- ekonomické hodnocení

Seznam odborné literatury:

Toman, P., Drápela, J., Mišák, S., Orságová, J., Paar, M., Topolánek, D. a kol.: Provoz distribučních soustav, ČVUT, Praha 2011, ISBN 978-80-01-14935-8
Voženílek, P., Novotný, V., Mindl, P.: Elektromechanické měniče, ČVUT, Praha, 2007

Vedoucí diplomové práce: Ing. David Růžek – PREdistribuce, a.s.

Platnost zadání: do konce letního semestru akademického roku 2015/2016
L.S.

Doc.Ing. Jaroslav Knápek, CSc.
vedoucí katedry

Prof.Ing. Pavel Ripka, CSc.
děkan

V Praze dne 10.2.2015

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci vypracoval samostatně a v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů pro vypracování závěrečných prací, a že jsem uvedl všechny použité informační zdroje.

V Praze dne 11. 5. 2015

.....

Poděkování

Rád bych na tomto místě poděkoval vedoucímu diplomové práce Ing. Davidu Růžkovi za poskytnutí podkladů a nezbytných informací pro vypracování diplomové práce, za ochotu, řadu cenných připomínek a věnovaný čas. Dále bych poděkoval vedoucímu diplomové semináře doc. Ing. Jaromírovi Vastlovi, CSc. za, řadu cenných připomínek a věnovaný čas.

Abstrakt

Transformátory jsou jedním ze základních vynálezů na konci 19. století, které umožnily přepravu elektrické energie na větší vzdálenosti s menšími ztrátami, a proto ve značné míře přispěly k rozšíření elektrifikaci. Jejich fyzikální princip fungování a základní konstrukční uspořádání zůstaly neměnné, ale během času jsme dosáhli zdokonalení a zlepšení technologických postupů při výrobě transformátorů. Jsou to velice účinné stroje, ale s rozumným plánováním můžeme dosáhnout lepších hodnot. Tato práce se zabývá právě tím, že nejprve jsou základní teoretické poznatky, které přibližují problematiku každému, pak porovnání průměrných ročních výrobních nákladů stávajících a nových transformátorů, a na konci navrhování hospodárného provozu transformátorů pomocí minimalizaci výrobních nákladů konkrétních transformátorů.

Klíčová slova: distribuční soustava, distribuční transformátor, ztráty v transformátorech, paralelní chod transformátorů, hlučnost, ekodesign, průměrné roční výrobní náklady, výrobní náklady

Abstract

Transformers are one of the inventions of the late 19th century, which allowed transporting electricity over longer distances with lower losses and therefore largely contributed to the expansion of electrification systems. Their physical operating principle and basic constructional arrangement remained stable, but we are improving and bettering it with modern technological processes in the manufacturing process of transformers. They are very efficient machines, but with sensible planning we can achieve even better values. The beginning of this paper deals with the basic theoretical knowledge, which identifies the issue, then comparison between the annual average production costs of existing and new transformers, and at the end suggestion for the economical operations of transformers using the minimization of production costs for specific transformers.

Key words: distribution system, distribution transformer, losses in transformers, parallel operation of transformers, noise, ecodesign, average annual production costs, production costs

Obsah

Seznam použitých symbolů	9
Úvod	10
1. Technické parametry stávajících transformátorů 110/22 kV	11
1.1. Distribuční soustava	11
1.1.1. Rozdělení distribučních soustav	12
1.1.2. Provozovatele distribučních soustav v České republice	13
1.1.3. Společnost PREDistribuce, a.s.	14
1.1.4. Prvky v distribučních soustavách	17
1.1.5. Transformátory	17
1.2. Ztráty v transformátorech	19
1.3. Paralelní chod transformátorů	21
1.3.1. Rozložení zatížení při paralelním chodu transformátorů	22
1.3.2. Ztráty při paralelním chodu transformátorů	23
1.4. Dispoziční řešení transformátorového stání	24
1.4.1. Stanoviště transformátorů (obecně)	24
1.4.2. Stání transformátorů 110/22 kV v Praze	25
1.5. Technické parametry stávajících transformátorů 110/22 kV v PREDistribuce, a.s.	26
1.5.1. Zapojení vinutí	27
2. Snižování ztrát v transformátorech a hlučnosti podle EU	28
2.1. Nařízení č. 548/2014 o zavedení Směrnice 2009/125/ES	28
2.2. Dopad nařízení č. 548/2014 na technické parametry transformátorů	30
2.3. Opatření proti hluku	32
2.3.1. Hygienické limity pro hluk a vibrace	32
2.3.2. Opatření proti hluku transformátorů	33
3. Rozbor zatížení transformátorů	35
3.1. Vývoj zatížení v Praze	37
3.2. Rozbor zatížení a ztrát stávajících transformátorů	40
4. Ekonomické hodnocení	45
4.1. Prostá výměna transformátorů	47
4.2. Použití více transformátorů o nižším výkonu	52

4.3. Porovnání výsledků	56
Závěr	62
Použitá literatura	64
Seznam obrázků	66
Seznam tabulek	67
Seznam příloh	67
Přílohy	68
1) Výpočet velikosti účinníku	68
2) CD médium	68

Seznam použitých symbolů

DS	Distribuční soustava
ES	Elektrizační soustava
vvn	Velmi vysoké napětí
vn	Vysoké napětí
PREdi	PREdistribuce, a. s.
TR	Transformovna
U [V]	Napětí
I [A]	Proud
P [W]	Činný výkon
S [VA]	Zdánlivý výkon
Q [VAr]	Jalový výkon
$\cos \varphi$ [-]	Účinník
P_o [W]	Ztráty naprázdno
P_k [W]	Ztráty nakrátko
i_o [%]	Poměrný proud naprázdno
u_k [%]	Poměrné napětí nakrátko
P_z [W]	Ztrátový výkon
W_z [Wh]	Ztrátová energie
$P_{př}$ [W]	Přechodový výkon
T_r [h]	Doba provozu za rok
T_m [h]	Doba využití maxima
T_z [h]	Doba plných ztrát
PEI [%]	Index špičkové účinnosti
$N_{vyr\phi}$ [Kč]	Průměrné roční výrobní náklady
N_{vyr} [Kč]	Výrobní náklady

Úvod

Transformátory se používají především ke zvyšování nebo snižování střídavého napětí. Při rozvodu elektrické energie vznikají určité ztráty, které musíme dodat, tj. vyrábět navíc, což samozřejmě není žádoucí. Pro snížení ztrát ve vedení při dálkovém přenosu se transformátorem zvyšuje napětí a zmenšuje proud – tím se zvětšuje přenášený výkon. Naopak pro rozvod elektrické energie se napětí snižuje na hodnotu vhodnou pro rozvod a elektrické spotřebiče.

Každá věc se časem opotřebovává, i tak poměrně spolehlivé stroje jako transformátory. Je možné, že pravidelnou údržbou by se dalo je provozovat i déle než 40 let, ale to už je spíše morální otázka vůči těm starým strojům. Druhý a výrazně větší důvod je hospodárnost provozu, protože čím jsme technologicky pokročilejší, tím můžeme vyrábět a používat také stroje, které mají větší účinnost a tím pádem i menší ztráty. Což je dobré i pro životní prostředí. Jak z několika studií víme, vyplatí se vyměnit i mladší transformátory, které mají jenom 25 let, za nové s lepšími parametry.

Tato práce se zabývá, jak i z názvu vyplývá, výměnou starých transformátorů za nové, a ještě se navrhne optimální velikost těchto transformátorů.

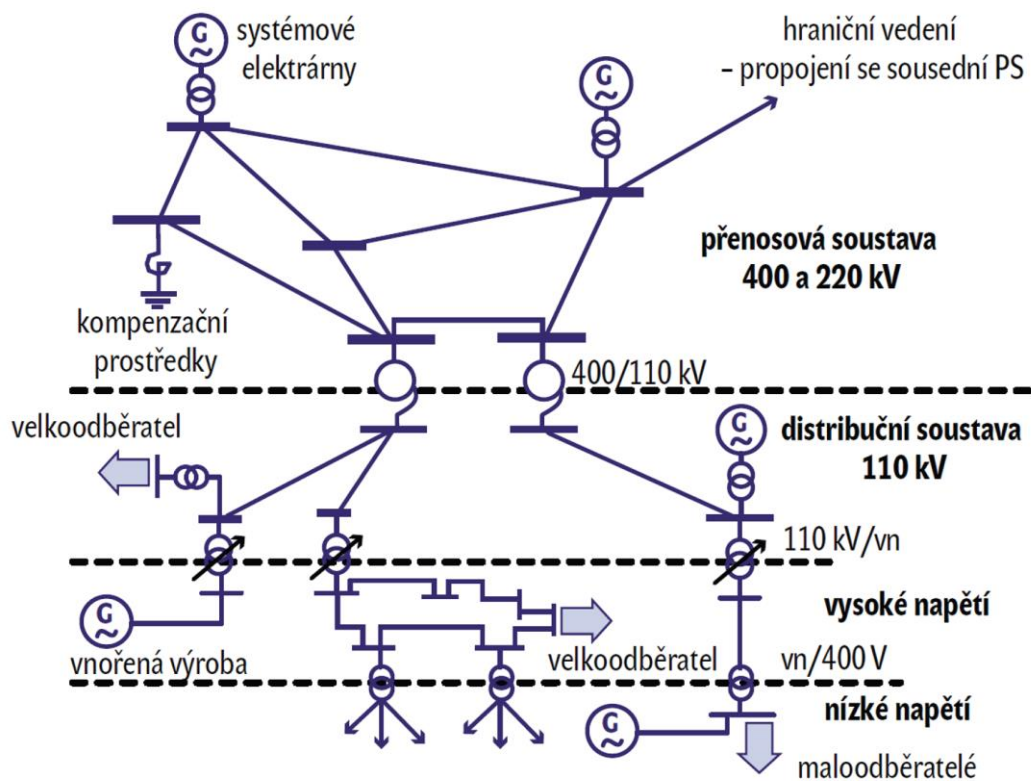
Na začátku jsou shromážděné teoretické předpoklady potřebné k lepšímu pochopení problematiky a v druhé části jsou interpretované výpočty a dosažené výsledky.

1. Technické parametry stávajících transformátorů 110/22 kV

1.1. Distribuční soustava

Distribuční soustava (DS) je součástí elektrizační soustavy (ES), která je vzájemně propojená v soubor zařízení pro výrobu, přenos, transformaci a distribuci elektřiny, včetně elektrických přípojek a přímých vedení, a systémů měřicí, ochranné, řídicí, zabezpečovací, informační a telekomunikační techniky. Základní uspořádání elektrizační soustavy je následující:

- výroba elektrické energie
- rozvod elektrické energie:
 - přenosová soustava
 - distribuční soustava
- spotřeba elektrické energie.

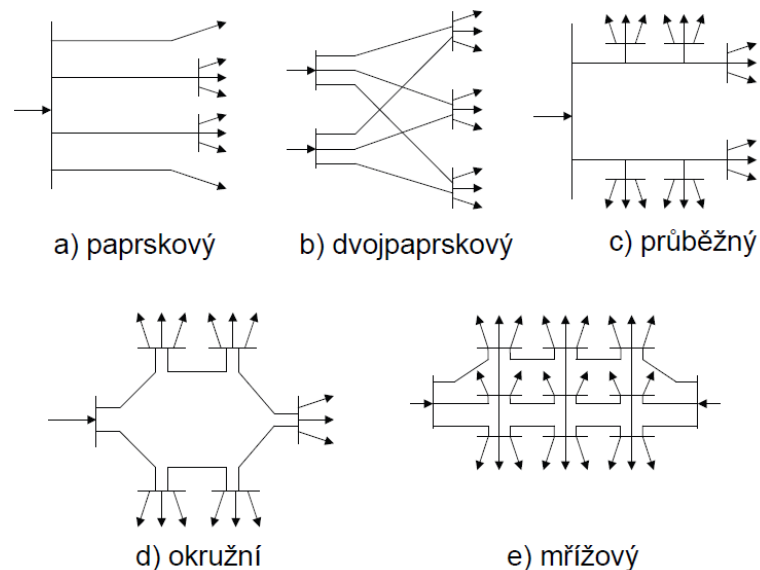


Obraz 1: Schéma elektrizační soustavy [1]

1.1.1. Rozdělení distribučních soustav

Podle [1] můžeme distribuční soustavu definovat následně. Distribuční soustava je soubor zařízení pro rozvod elektřiny z přenosové soustavy nebo ze zdrojů zapojených do ní (tj. vnořená výroba: malé vodní elektrárny, fotovoltaické elektrárny, atd.) ke koncovým uživatelům. Součástí distribuční soustavy jsou i její řídicí, ochranné a informační systémy. V podmínkách ES ČR se jedná o zařízení s napětím 110 kV a nižším. Distribuční soustava slouží k zásobování maloodběratelů (z hladiny nn 0,4 kV) i velkoodběratelů (vyšší napěťové hladiny). Distribuční sítě mohou být tvořeny venkovním i kabelovým vedením, nebo jejich kombinací (smíšené vedení).

Distribuční soustava, jako část rozvodných zařízení může být podle počtu napájecích míst a podle způsobu napájení jednotlivých míst spotřeby rozdělena na následující druhy paprskový, dvoj paprskový, průběžný, okružní, mřížový. Výše uvedené druhy rozvodů se liší rozdělením toku výkonu, hospodárností a bezpečností provozu. Distribuční sítě vvn 110 kV jsou obvykle tvořeny okružním rozvodem, vn jsou obvykle tvořeny paprskovým nebo průběžným rozvodem, sítě nn jsou většinou paprskové nebo průběžné a v husté městské zástavbě se používá mřížový rozvod.



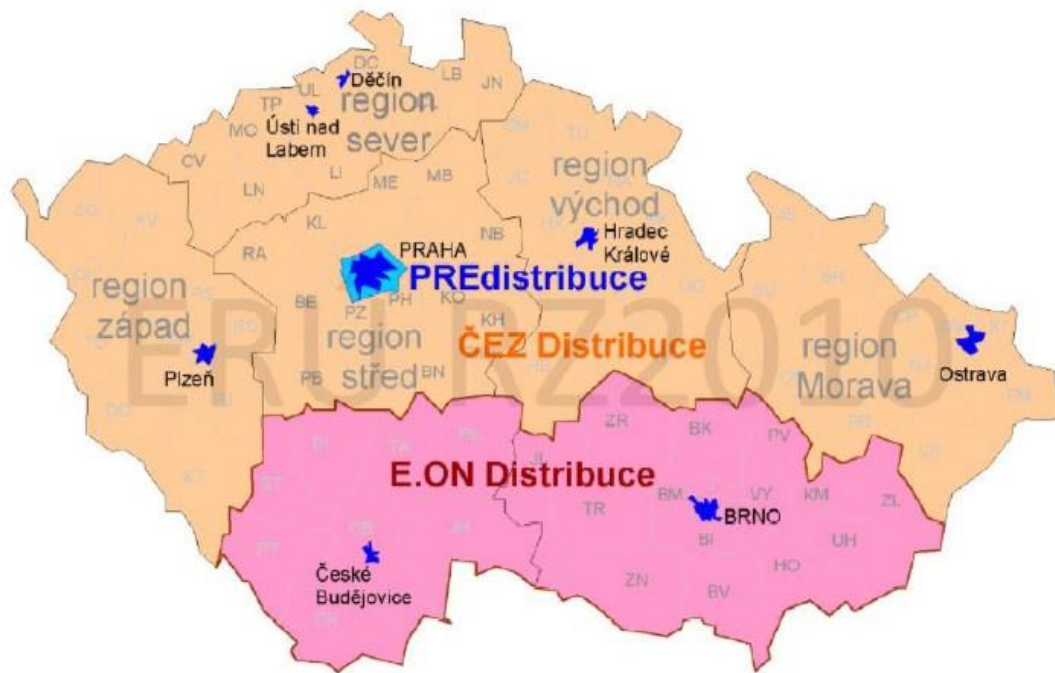
Obraz 2: Dělení DS podle topologie [1]

Další možné hledisko při rozdělení DS je podle velikosti napěťové hladiny dané soustavy. Distribuční soustava vvn (110 kV) tvoří základní pilíř distribuční soustavy. Sítě zajišťují tranzit elektřiny z uzlových transformoven zvn/vvn a vvn/vvn do transformoven 110kV/vn. Do těchto sítí je vyveden výkon řady elektráren o výkonech desítek MW a jsou provozovány zpravidla, jako okružní ke zvolenému způsobu provozu odpovídá i použitý

system chránění distančními ochranami. Vzhledem k požadavku na vyšší zajištění správného působení ochran je vedení vvn chráněno dvěma ochranami. Každý vývod z rozvodny na vedení vvn je chráněn dvěma distančními ochranami, nebo pokud existuje komunikační cesta na protější rozvodnu, tak se chrání jednou distanční a jednou srovnávací ochranou. Sítě se vyznačují spolu s vedeními zvn a vvn přenosové soustavy vysokou spolehlivostí, velice nízkou četností poruch a díky způsobu provozu a zálohování většina poruch při správném působení ochranných systémů nezpůsobí přerušení dodávky elektřiny odběratelům. Distribuční sítě vn jsou tvořeny venkovními a kabelovými vedeními provozovanými v převážné míře s napětím 22 kV, resp. 35 kV. Z minulosti jsou v provozu sítě s napětím 3, 6 a 10 kV. Tyto sítě, ale nejsou dále rozvíjeny a jsou v rámci unifikace nahrazovány napětíovou hladinou 22 kV, resp. 35 kV. Většinou jsou tyto sítě provozovány jako paprskové, případně formou průběžného rozvodu. V městských aglomeracích toto řešení většinou umožňuje řadu propojení do dvoj paprskového nebo okružního rozvodu. Městské sítě umožňují více možností propojení, ale provoz je vždy pouze paprskový. V Praze jsou převážně provozovány transformátory vvn/vn s odporíkem. V síti vn jsou osazeny jednoduché nadproudové ochrany. Tento způsob chránění neumožňuje jiný provoz než paprskový a to z důvodu selektivity ochran. Rozvodné sítě do 1 kV jsou pak sítěmi nízkého napětí. Distribuční sítě nn jsou provozovány převážně paprskovým a průběžným rozvodem, obecně husté městské sítě jsou provedeny jako mřížové. [1] V Praze již není v provozu mřížová síť. Historicky je v několika lokalitách síť nn vybudovaná jako mřížová, ale dnes se provozuje v paprskovém zapojení.

1.1.2. Provozovatele distribučních soustav v České republice

Provozovatele distribučních soustav (PDS) na území ČR jsou tři velké regionální distribuční společnosti (ČEZ Distribuce, a. s., E. ON Distribuce, a. s. a PREdistribuce, a. s. – dále jenom PREDi), které jsou přímo připojené na přenosovou soustavu a stovky dalších lokálních provozovatelů DS, připojených na zařízení provozovatelů zmíněných tří DS. Provoz je zajištěn v souladu s „Pravidly provozování distribuční soustavy“ (PPDS) schvalovaným Energetickým regulačním úřadem (ERÚ) a další platnou legislativou (např. zákon č. 670/2004 Sb.). Hlavním úkolem provozovatelů DS je bezpečně a hospodárně zásobovat odběratele elektřinou v požadovaném množství, kvalitou v daném čase a poskytovat distribuční služby uvnitř i vně soustavy provozovatele DS. Kromě toho zajišťují systémové a podpůrné služby na úrovni DS.



Obraz 3: ES ČR Distribuce, podle [2]

1.1.3. Společnost PREdistribuce, a.s.

Skupina PRE je jedním z největších dodavatelů elektřiny s působností na celém území České republiky. Prodává ji více než sedmi stům tisícům odběratelů. Historie pražské energetiky sahá až do roku 1897, kdy ještě v rámci Elektrických podniků královského hlavního města Prahy byly položeny základy pražské veřejné elektroenergetické sítě. Po mnoha vlastnických a organizačních změnách vznikla k 1. 1. 1994 akciová společnost. Ta se od svého založení postupně přeměnila na zákaznický orientovanou společnost v oblasti obchodování, prodeje a distribuce elektřiny. [3]



Obraz 4: Logo PRE, ze stránky pre.cz

Skupinu PRE tvoří mateřská společnost Pražská energetika, a. s., a její dceřiné společnosti: PREdistribuce, a. s., PREměření, a. s., a eYello CZ, k. s.



Obraz 5: Skupina PRE, podle [3]

Podle webových stránek [4] a [5] společnosti, PREdi, byla založena v září 2005 jako dceřiná společnost Pražské energetiky, a.s. Od 1. 1. 2006 je PREdi držitelem licence Energetického regulačního úřadu na distribuci elektřiny na území hlavního města Prahy a města Rožtok. Řízení společnosti Pražská energetika, a. s., vůči společnosti PREdistribuce, a. s., jako provozovateli distribuční soustavy je uplatňováno v rozsahu dovoleném kogentními ustanoveními § 25a) zákona č. 458/2000 Sb. (energetický zákon) v platném znění. Distribuce elektřiny zahrnuje veškeré procesy a činnosti spojené s rozvojem a obnovou síťových aktivit, připojováním zákazníků, provozováním, údržbou a opravami sítě na vymezeném území.

PREdi působí na území vymezeném hlavním městem Prahou a městem Rožtoky. Tato distribuční oblast je specifická velkou koncentrací obyvatelstva a průmyslu s vysokými nároky jak na spolehlivost a kvalitu dodávky elektřiny tak na způsob provedení všech částí distribuční sítě od rozveden a transformoven až po kabelové tunely. Společnosti Skupiny PRE zásobují energií více než 2 150 velkoodběratelů a přes 720 tisíc malých a středních odběratelů. Provozují 206 km sítí velmi vysokého napětí, více než 3 700 km vedení vysokého napětí a téměř 7 700 km sítě nízkého napětí. Převážnou část sítě vn a nn tvoří kabelová vedení (pro vvn to neplatí: délka kabelů je cca 62 km).

Transformace nakupované elektrické energie je zajištěna ve 22 rozvodnách 110/22 kV.

1.1.4. Prvky v distribučních soustavách

Základní prvky v rozvodu elektrické energie jsou následující: vedení (venkovní, kabelové), tlumivky (podélné, příčné, uzlové), kondenzátory (sériové, paralelní) a transformátory. Dále prvky rozvaděčů jsou: vypínač, odpojovač, odpínač, uzemňovač, svodič přepětí, pojistky, jističe, ochrany. Důležitou součástí soustavy je i řídicí systém.

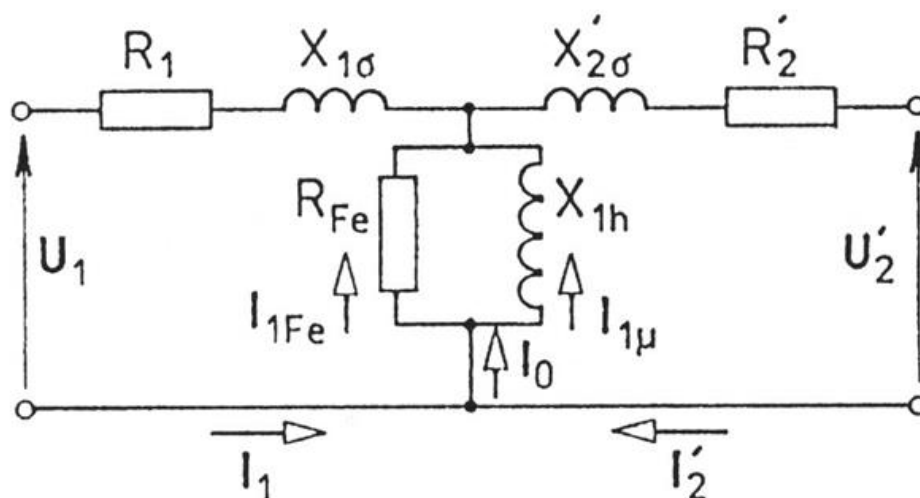
V PREDi: jsou pouze uzlové tlumivky a to jen několik kusů na okraji Prahy, kde je venkovní vedení vn. Převážně jsou používány uzlové odporníky. Kondenzátory v síti nejsou. Historicky se kompenzovala indukčnost transformátoru vn/nn, ale s postupnou kabelizací rostl kapacitní proud v síti, který způsobil překompenzování. Proto se kompenzace v distribuční síti zrušila.

V dalších kapitolách se budu zabývat podrobněji jenom s transformátorem.

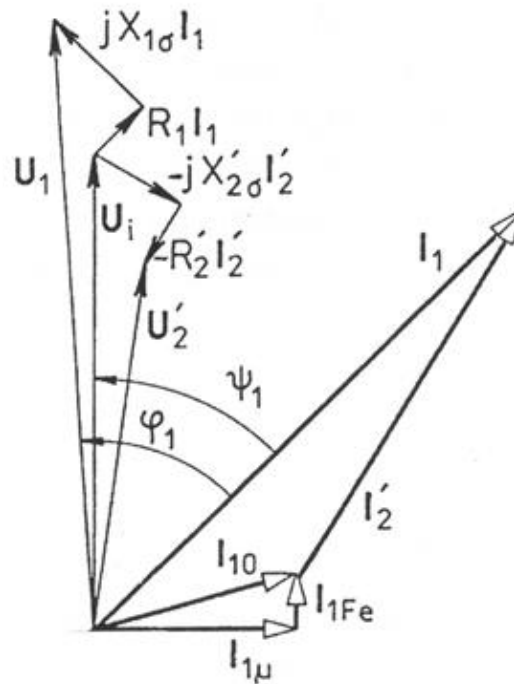
1.1.5. Transformátory

Tato podkapitola je zpracována podle literatury [7] a [8]. Transformátory jsou elektrické netočivé stroje, používané především ke zvyšování nebo snižování střídavého napětí, ale někdy se používají i pro galvanické oddělení propojených elektrických obvodů střídavého proudu. Rozhodující význam mají při přenosu a rozvodu elektrické energie. Pro přenos se jimi zvyšuje napětí a zmenšuje proud pro snížení ztrát ve vedení a tím se zvyšuje výkon, který je vedení schopno přenášet. Pro rozvod elektrické energie se napětí snižuje na hodnotu vhodnou pro rozvod a elektrické spotřebiče. Transformátory lze dělit podle:

- převodu: zvyšovací, snižovací, oddělovací;
- soustavy: jednofázové a vícefázové (obvykle trojfázové);
- chlazení: vzduchové (třída A), olejové (třída O);
- účelu: blokové, vlastní spotřeby, spojovací, průmyslové, izolační, trakční, distribuční.



Obraz 7: Úplné náhradní schéma transformátoru [7]



Obraz 8: Fázorový diagram transformátoru při zatížení [7]

Transformátory v přenosové síti (zvn/vvn) i distribuční transformátory vvn/vn jsou realizovány jako regulační při zatížení. Na vinutí vyššího napětí jsou vyvedeny odbočky nejčastěji $\pm 8 \times 2\%$ od střední odpovídající jmenovitému převodu. Číslování odboček se obvykle provádí od nejnižší, odpovídající nejmenšímu počtu závitů vstupního vinutí a tím i nejmenšímu převodu. Číslo 9 má odbočka střední. Z toho vyplývá, že zvyšování napětí na výstupní straně se dosáhne regulací na nižší číslo odbočky a naopak.



Obraz 9: Transformovna Chodov [9]

1.2. Ztráty v transformátorech

Transformátory jsou jedny z nejužívanějších zařízení používaných při dopravě elektřiny, a proto jejich hospodárny provoz může přispět velkou mírou hospodárnosti celé elektrizační soustavy. Při řešení problematiky hospodárného provozu má největší význam způsob ocenění ztrát elektrického výkonu a práce, které v transformátorech při jejich funkci vznikají. Podle [10] ztráty v transformátorech můžeme rozdělit na:

- a) ztráty naprázdno (v železe) - P_o , které se skládají z hysterezních ztrát a ztrát vířivými proudy v magnetickém obvodu transformátoru. Jsou nezávislé na výši zatížení transformátoru, a proto se také nazývají stálými ztrátami.
- b) ztráty nakrátko (v mědi) - P_k , což jsou Joulovy ztráty vznikající průtokem proudu primárním a sekundárním vinutí, které má samozřejmě určitý malý činný odpor. Závisí na druhé mocnině zatížení, a proto se nazývají též proměnnými ztrátami.

Ostatní druhy ztrát (např. dielektrické ztráty, ztráty průsakem izolací) můžeme zanedbat, a potom platí následující rovnice.

Celkové činné ztráty transformátoru lze vyjádřit takto:

$$P_z = P_{0n} + P_k \quad (1)$$

kde

$$P_k = P_{kn} \cdot \frac{S^2}{S_n^2} \quad (2)$$

po dosazení:

$$P_z = P_{0n} + P_{kn} \cdot \frac{S^2}{S_n^2} \quad (1.1)$$

kde P_{0n} ... jmenovité ztráty transformátoru naprázdno [kW]

P_{kn} ... jmenovité ztráty transformátoru nakrátko, tj. při jeho zatížení S_n [kW].

S ... zatížení transformátoru [MVA]

S_n ... jmenovitý výkon transformátoru [MVA]

Dále můžeme napsat vztah pro zatěžovatel neboli poměrný proud:

$$i = \frac{S}{S_n} = \frac{I \cdot U \cdot \sqrt{3}}{I_n \cdot U \cdot \sqrt{3}} = \frac{I}{I_n} \quad (3)$$

U velkých transformátorů je nutno počítat též s jalovými ztrátami (jalovou spotřebou) transformátoru:

$$Q_z = Q_{0n} + Q_{kn} \cdot \frac{S^2}{S_n^2} \quad (4)$$

přičemž

$$Q_{0n} = i_0 \cdot S_n \quad (5)$$

$$Q_{kn} = u_k \cdot S_n \quad (6)$$

kde i_0 ... je poměrný proud naprázdno [%]

u_k ... poměrné napětí nakrátko [%]

Poměrný proud naprázdno proud naprázdno lomeno jmenovitým proudem:

$$i_0 = \frac{I_{10}}{I_N} \quad (7)$$

Poměrné napětí nakrátko je napětí nakrátko lomeno jmenovitým napětím:

$$u_k = \frac{U_{1K}}{U_N} \quad (8)$$

Pokud dosadím a vynásobím mezi sebou, dostanu:

$$Q_z = i_0 S_n + u_k \cdot S_n \cdot \frac{S^2}{S_n^2} \quad (4.1)$$

Jalové ztráty vznikající v transformátoru je možné přepočítat pomocí měrného činitele ztrát k_Δ [kW / kVAr] na činné ztráty, které jsou způsobeny dopravou jaloviny po vedeních. Měrný činitel ztrát nám udává, jak velké ztráty činného výkonu vyvolá přenos jednotky jalového výkonu:

$$k_\Delta = \frac{P_z}{Q} \quad (9)$$

Velikost činitele k_Δ se liší podle místa připojení transformátoru. Podle [10] pro transformátory v distribuční síti 110/22 kV je velikost k_Δ 0,15. Použitím k_Δ je možno rozšířit vztah celkových činných ztrát o další dva členy respektující vliv jalové spotřeby transformátoru:

$$P_z = P_{0n} + k_\Delta Q_0 + (P_{kn} + k_\Delta Q_{kn}) \cdot \frac{S_m^2}{S_n^2} \quad (1.2)$$

Pokud chceme zjistit ztracenou energii, máme tyto vzorce vynásobit příslušným časem:

pro malé transformátory:

$$W_z = P_{0n} \cdot T_r + P_{kn} \cdot \frac{S_m^2}{S_n^2} \cdot T_z \quad (10)$$

a pro velké transformátory:

$$W_z = (P_{0n} + k_{\Delta} Q_0) \cdot T_r + (P_{kn} + k_{\Delta} Q_{kn}) \cdot \frac{S_m^2}{S_n^2} \cdot T_z \quad (10.1)$$

kde S_m ... maximální zatížení transformátoru

T_r ... doba provozu za rok

T_z ... doba plných ztrát.

1.3. Paralelní chod transformátorů

V PREdistribuce, a.s. nejsou provozovány transformátory 110/22 kV v paralelním chodu, kvůli zkratovým proudům. Úroveň kvality dodávky elektřiny v distribučních soustavách je určena ukazateli nepřetržitosti distribuce elektřiny podle vyhlášky č. 540/2005 Sb. (ukazatele: SAIFI – System Average Interruption Frequency Index, SAIDI – System Average Interruption Duration Index, CAIDI – Customer Average Interruption Duration Index). Přesto v této podkapitole popíšu teoretické předpoklady pro paralelní spolupráci transformátorů, protože ve výpočtové části budu zkoumat i možnost využití tohoto principu ekonomického provozu transformátorů.

Podle [7] a [8]. Pokud použití jediného transformátoru je technicky, nebo ekonomicky nevýhodné, tak se používají transformátory paralelně. Minimálně dva transformátory pracující současně na společné sběrnice (tzn., mají paralelně navzájem propojená, jak vstupní, tak výstupní vinutí) se nazývá paralelní chod transformátorů. Žádný z takto pracujících transformátorů nesmí být trvale přetížen.

Výhody a nevýhody paralelního chodu transformátorů:

- Výhody:
- ekonomická možnost provozu – při malém odběru možnost odpojení transformátorů;
 - vyšší spolehlivost napájení (např. porucha, revize);
- Nevýhody:
- vyšší cena skupiny transformátorů;
 - výrazné zhoršení zkratových poměrů – zvýšení zkratového proudu.

Podmínky paralelního provozu transformátorů:

- stejná jmenovitá napětí;
- stejný převod;
- stejný hodinový úhel;
- stejný úbytek napětí způsobený proudem naprázdno.

Směrnice pro paralelní spolupráci transformátorů stanovuje:

- paralelní chod transformátorů je podle normy vyhovující, je-li výkon skupiny alespoň 95% součtového výkonu;
- nespojovat k paralelní spolupráci transformátory, jejichž výkon se liší více než 1 : 3,5;
- transformátor s menším výkonem má mít poněkud větší napětí nakrátko (přípustná odchylka napětí nakrátko je až 10%);
- stejný napěťový převod transformátoru.

1.3.1. Rozložení zatížení při paralelním chodu transformátorů

Při zatížení je nejdůležitějším požadavkem správné rozložení zatížení na jednotlivé transformátory. Při paralelní práci na společné sběrnice jsou primární i sekundární napětí stejná. Pro jednoduchost se teď podíváme na případ 2 transformátorů.

V případě dvou transformátorů - výstupní napětí jsou stejné:

$$U_A = U_B \quad (11)$$

Úbytky napětí na transformátorech taky musí být stejné:

$$Z_A \cdot I_A = Z_B \cdot I_B \quad (12)$$

a tedy i:

$$Z_A \cdot i_A = Z_B \cdot i_B \quad (13)$$

$$Z_A = \frac{U_{kA}}{I_{nA}} \quad (14)$$

$$u_{kA} = \frac{U_{kA}}{U_2} \rightarrow U_{kA} = U_2 \cdot u_{kA} \quad (15)$$

$$Z_A = \frac{U_2 \cdot u_{kA}}{I_{nA}} \quad (16)$$

a podobně

$$Z_B = \frac{U_2 \cdot u_{kB}}{I_{nB}} \quad (17)$$

Po dosazení do (11) a rozšíření jmenovatelů z výkonem

$$S_n = U \cdot I_n \quad (18)$$

dostaneme:

$$\frac{S_A}{S_{nA}} \cdot u_{kA} = \frac{S_B}{S_{nB}} \cdot u_{kB} \quad (19)$$

Z toho vyplývá, že následující dva případy můžou nastat:

1. transformátory mají stejná napětí nakrátko a různé jmenovité výkony;
2. stejné jmenovité výkony a různá napětí nakrátko.

V prvním případě z rovnice (17) dostaneme: $S_A = \frac{S_{nA}}{S_{nA} + S_{nB}} \cdot S$ (18.1)

V druhém: $S_A = \frac{u_{kB}}{u_{kA} + u_{kB}} \cdot S$ (18.2)

1.3.2. Ztráty při paralelním chodu transformátorů

Všechny stroje jsou ztrátové, to znamená, že musíme na vstupní stranu přivést větší výkon, než se odeberá na straně výstupní. Z předchozí kapitoly víme, že u transformátorů nejvýraznějším jsou ztráty v železe a ztráty ve vinutí. Pro celkové ztráty platí rovnice (1.1).

Pokud pracuje jenom jeden transformátor, pak platí:

$$P_{zA} = P_{0A} + i^2 \cdot P_{kA} \quad (20)$$

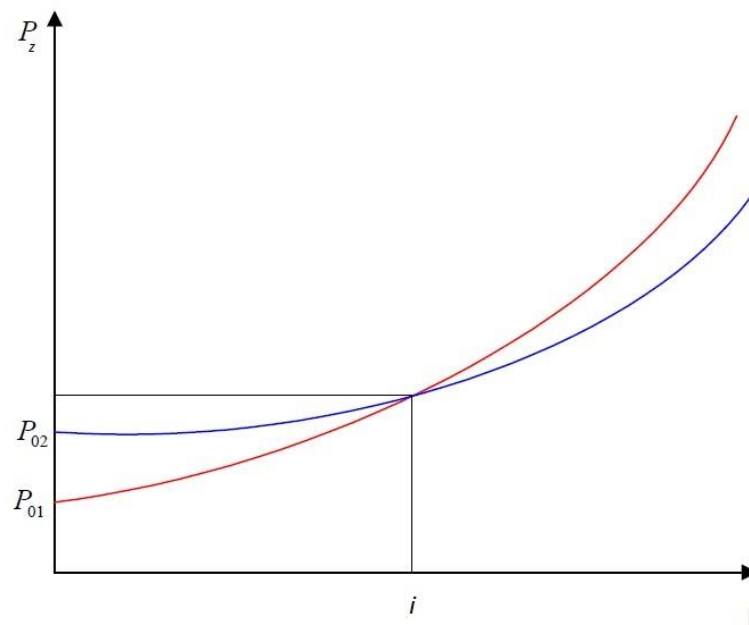
Pracují dvě transformátory paralelně, závislost pro celkové ztráty bude:

$$P_z = n \cdot P_{0A} + n \cdot \left(\frac{i}{n}\right)^2 \cdot P_{kA} = 2 \cdot P_{0A} + 2 \cdot \left(\frac{i}{2}\right)^2 \cdot P_{kA} \quad (21)$$

Z ekonomického hlediska můžeme dále zkoumat rovnice (20) a (21), kdy je vhodné z pohledu ztrát odpojit jeden transformátor. Předpokládáme, že oba transformátory mají stejné parametry, pak dostaneme:

$$P_{zA} = P_z \rightarrow P_0 + i^2 \cdot P_k = 2 \cdot P_0 + 2 \cdot \left(\frac{i}{2}\right)^2 \cdot P_k \rightarrow i = \sqrt{\frac{2 \cdot P_0}{P_k}} \quad (22)$$

Na následujícím grafu je ukázkový případ 2 transformátorů, reálný průběh závisí na konkrétním parametru daných transformátorů. Červený průběh je závislost ztrát na zatížení při použití jednoho transformátoru, a modrý průběh je při použití dvou paralelně zapojených transformátorů stejného typu, dále je vyznačen bod zatížení, při kterém nastane rovnost ztrát tzv. **přechodový výkon**. Při nulovém zatížení podle vztahů (20) a (21) dostaneme, že $P_{02} = 2 \cdot P_{01}$.



Obraz 10: Závislost ztrát na zatížení (proud)

Jak na začátku této kapitoly už bylo zmíněno to, že v praxi je zásadním problémem při paralelním chodu transformátorů dodržení zkratových poměrů. Transformátory za normálního provozu nejsou na straně nižšího napětí propojeny z důvodu zvýšení zkratového proudu a vyrovnávacích proudů, fungují jako paprsková síť a napájejí svou vlastní oblast. Pokud jeden transformátor vypadne, propojí se síť na straně nižšího napětí a můžeme napájet oblast jediným transformátorem. Taková situace se vyřeší mnohem rychleji, pokud jsou oba transformátory v provozu. Kdyby oba transformátory napájely stejnou oblast sítě a provozovali bychom pouze jediný transformátor, pak by v případě poruchy nastal delší výpadek. Do bodu přechodového výkonu z pohledu ztrát je lepší provozovat jeden transformátor. Z hlediska ztrát transformátoru je paralelní chod transformátorů do jedné oblasti stejný jako tuto jednu oblast rovnoměrně rozdělit do více oblastí, které budou napájené jen jedním transformátorem. V dalších kapitolách bude zkoumaná i možnost použití více než 2 transformátorů, v tom případě do rovnice (21) dosadíme za n počet použitých transformátorů.

1.4. Dispoziční řešení transformátorového stání

1.4.1. Stanoviště transformátorů (obecně)

Obecné provedení stanoviště transformátoru závisí na velikosti a provedení transformátoru a na okolním zařízení. Podle provedení rozeznáváme transformátory suché se silikonovou izolací a transformátory olejové. Suché transformátory se používají převážně v průmyslu a lze je umísťovat přímo do skříní ve výrobních halách, jsou to transformátory vn/nn. Větší skupinu tvoří transformátory olejové, které lze umísťovat do skříňových rozváděčů s olejovou jímkou, do transformátorových komor, na venkovní stanoviště a na stožáry. Takto jsou řešeny všechny transformátory zvn/vvn, **vvn/vn**, vn/vn a v převážné většině vn/nn. Tato podkapitola byla zpracována podle literatury [1] a [8].

Transformovna musí být umísťována tak, aby neohrozila bezprostřední kontaminací podzemních a povrchových vod (vodoteči, nádrží, rybníku) ani studní a to i v případě havárie transformátoru. Transformovnu nelze umísťovat v 1. a 2. hygienickém pásmu ochrany vodních zdrojů. Umístění transformovny musí být odsouhlaseno příslušným hygienikem dané oblasti. [8]

Vnitřní olejové transformátory se umísťují s ohledem na požární bezpečnost do samostatných větraných komor, jejichž stěny, strop a dveře jsou z nehořlavého materiálu. Transformátorové komory se řeší tak, aby plameny, plyny apod. při havárii transformátoru neznemožnily používání schodišť a východu. Komory se umísťují na severní, případně východní stranu budovy, aby na větrání působily, co nejméně sluneční paprsky. Větrání v transformátorových komorách může být provedeno buď přirozeným tahem,

nebo umělé. V obou případech je transformátor v komoře umístěn tak, aby byl v proudu chladícího vzduchu. Otvor pod transformátorem se provádí pokud možno stejný nebo menší než je půdorys transformátoru. Vývod ohřátého vzduchu z komory se umísťuje do nejvyšší části, pokud možno v protilehlém směru vstupního vzduchu. [8]

Stanoviště venkovních transformátorů se skládá z betonového základu, jehož výška závisí na způsobu dopravy transformátoru. Je opatřeno jímkou nebo štěrkovým ložem pro zachycení popř. odvedení oleje. Půdorysné rozměry jámky musí přesahovat na všech stranách půdorys transformátoru asi o 1 m. [8]

1.4.2. Stání transformátorů 110/22 kV v Praze

V Praze stání transformátorů 110/22 kV jsou navrženy pro transformátory se jmenovitým výkonem 63 MVA, tzn., že menší stroje (např. 40 MVA) se bez problémů dají umístit. Zpracováno podle podnikového materiálu PREdi.

Stání jsou společné pro transformátor a odporník, u vnitřního stání i tlumivku. Tlumivky u venkovního stání jsou umístěny samostatně. Základy transformovny jsou umístěny o 1 m nad komunikací. Ve vrchní části základů jsou osazeny kotevní prvky kolejnic. Do betonové jámky (která je záchytná i havarijní v jednom) i do stěny transformovny (do výšky 1 m) je napuštěna izolace xypex (to je materiál a technologie krystalizace, která způsobí, že betonové konstrukce jsou pro kapaliny nepropustné), nebo obdobný izolační materiál. Jámký jsou dimenzovány tak, aby udržely 1,5 krát celkového objemového množství transformátorového oleje (100 % objem transformátorového oleje a minimálně k tomu 50 % pro hasební hmotu). Obvodové zdivo tvoří boční a zadní stěny a jsou provedeny jako i protipožární stěny z železobetonu. V zadní stěně venkovního stání transformátoru je umístěn otvor pro připojení technologie rozvodny R 110 kV. Přední strana je orientována k obslužné komunikaci. V případě, že protihlukové opatření vycházející se z dobře umístěných budov nestačí na eliminaci hluku, pak jsou řešeny další možnosti.

Stanovené limity hluku jsou probírané v další části práce. Veškerá elektrická zařízení transformoven jsou v souladu s platnými norem, to platí i pro hromosvody a uzemnění. Standardy požadavků specifikací pro zařízení transformoven 110/22 kV jsou definované v podnikové normě PREdi č. PN KT301 1a, která nabyla účinnost 16. 12. 2009.



Obraz 11: Rozvodna Smíchov

1.5. Technické parametry stávajících transformátorů 110/22 kV v PREdistribuce, a.s.

Na území působení PREdistribuce, a.s. je v provozu celkem 57 transformátorů 110/22 kV v 22 rozvodnách (data k 1. 6. 2014). Všechny transformátory jsou olejové. Fyzická životnost transformátorů je určena na 40 let. Kromě základních informačních údajů (např. výrobce, číslo stroje, rok výroby apod.), jsou na štítku stroje uvedena technická data vymezující použití stroje, tzv. jmenovité, či štítkové hodnoty. U transformátoru jsou to zejména: jmenovitý zdánlivý výkon, napětí, proudy, jmenovitý kmitočet a druh zatížení. Používané jmenovité výkony jsou 40 MVA (31 ks) a 63 MVA (26 ks). Poměrné napětí nakrátko (hodnoty mezi 9,5 % a 18,9 %), ztráty naprázdno (hodnoty mezi 14,3 kW a 61,6 kW) a ztráty nakrátko (hodnoty mezi 139 kW a 362 kW) a obsah oleje v nádobě (hodnoty mezi 12,8 t a 24,4 t) jsou odlišné podle výrobce a typu transformátoru. Drtivá většina transformátorů je od firmy ETD Transformátory, a. s. Plzeň, potom jsou čtyři od firmy Siemens a tři od SGB – SMIT Group (dole na obrázku). Tyto hodnoty podrobněji budou analyzovány v dalších kapitolách této práce.



Obraz 12: Transformátor SGB 110/23 kV, 40 MVA, podle PREDi

1.5.1. Zapojení vinutí

Vinutí trojfázových transformátorů lze uspořádat do hvězdy, trojúhelníka nebo lomené hvězdy. Zapojení na straně vyššího napětí se značí velkým písmenem a na straně nižšího napětí s malými písmeny. Různým spojením vstupních a výstupních vinutí lze dosáhnout různého vzájemného posunutí výstupních svorkových napětí ve vztahu k odpovídajícím napětím vstupním. Definice hodinového úhlu, podle [7] je následující: hodinový úhel je fázový posun odpovídajících si napětí, měřený od fázoru vyššího napětí k fázoru nižšího napětí ve smyslu hodinových ručiček (značení) fází.

Všechny transformátory mají: stejný převod napětí 110/23/6,3 kV a spojení vinutí YNyn0/d1. V PREDi je standardně terciální vinutí využito pro měřící účely. U jednoho transformátoru v TR Třeboradice je třetí vinutí vyvedeno pro záložní napájení Pražské teplárny.

2. Snižování ztrát v transformátorech a hlučnosti podle EU

Ohledy na životní prostředí jsou v dnešní době čím více důležitým aspektem v jakékoli oblasti života. Od toho nejsou výjimkami ani transformátory, když pomineme velké poruchy s transformátorovým olejem, dva největší problémy jsou ztráty a hlučnost.

2.1. Nařízení č. 548/2014 o zavedení Směrnice 2009/125/ES

Podle nařízení č. 548/2014 stanovení požadavků na ekodesign pro střední a velké výkonové transformátory je nezbytné k tomu, aby na trh více pronikly technologie a konstrukční varianty zlepšující jejich energetickou účinnost nebo výkon. Celkové ztráty všech transformátorů v zemích EU27 v roce 2008 dosáhly 93,4 TWh/rok. Potenciál ke zlepšení nákladové efektivnosti prostřednictvím účinnější konstrukce se odhaduje na asi 16,2 TWh/rok v roce 2025, což odpovídá 3,7 milionu tun emisí CO₂.

Definice některých důležitých pojmů z nařízení č. 548/2014:

„ekodesign – začlenění environmentálních aspektů do návrhu výrobku s cílem zlepšit vliv výrobku na životní prostředí během celého životního cyklu.“

„Požadavek na ekodesign – požadavek na výrobek nebo na jeho návrh, který má zlepšit vliv tohoto výrobku na životní prostředí, nebo požadavek na poskytování informací o environmentálních aspektech výrobku.“

„Výkonový transformátor – statické zařízení se dvěma nebo více vinutími, které pomocí elektromagnetické indukce mění systém střídavého napětí a proudu na jiný systém střídavého napětí a proudu obvykle s jinými hodnotami a ve stejném kmitočtu za účelem přenosu elektrické energie.“

„Velký výkonový transformátor – výkonový transformátor s nejvyšším napětím pro zařízení přesahujícím 36 kV a jmenovitým výkonem rovným 5 kVA nebo vyšším nebo jmenovitým výkonem rovným 40 MVA nebo vyšším bez ohledu na nejvyšší napětí pro zařízení.“

Dne 22. 5. 2014 v celé EU vstoupilo v platnost nařízení č. 548/2014 (tzv. přímo použitelný právní předpis na úrovni zákona), který předepisuje u distribučních a výkonových transformátorů větších než 1 kV nejvyšší možné ztráty nebo index špičkové účinnosti (PEI – Peak Efficiency Index). Z nařízení: „Metody výpočtu indexu špičkové účinnosti (PEI) pro střední a velké výkonové transformátory jsou založeny na poměru přenášeného zdánlivého výkonu transformátoru po odečtení elektrické ztráty k přenášenému zdánlivému výkonu transformátoru.“

Vztah pro výpočet:

$$PEI = 1 - \frac{2 \cdot (P_0 + P_{c0})}{S_n \cdot \sqrt{\frac{P_0 + P_{c0}}{P_k}}} \quad (23)$$

kde:

P_0 – je míra ztrát při chodu naprázdno při jmenovitém napětí a jmenovitém kmitočtu na jmenovité odbočce.

P_{c0} – je elektrický výkon vyžadovaný chladicím systémem pro provoz při chodu naprázdno.

P_k – je naměřená ztráta pod zatížením při jmenovitém proudu a jmenovitém kmitočtu na jmenovité odbočce upravená s ohledem na referenční teplotu.

S_n – je jmenovitý výkon transformátoru nebo autotransformátoru, na němž je P_k založen.

Konkrétní hodnoty jsou uvedeny v následujících tabulkách:

Transformátory ponořené do kapaliny		
Jmenovitý výkon (MVA)	Minimální index špičkové účinnosti (%)	
	Stupeň 1 (1. 7. 2015)	Stupeň 2 (1. 7. 2021)
25	99,657	99,700
31,5	99,671	99,712
40	99,684	99,724
50	99,696	99,734
63	99,709	99,745

Tabulka 1 [11]

Transformátory suchého typu		
Jmenovitý výkon (MVA)	Minimální index špičkové účinnosti (%)	
	Stupeň 1 (1. 7. 2015)	Stupeň 2 (1. 7. 2021)
25	99,521	99,564
31,5	99,551	99,592
40	99,567	99,607
50	99,585	99,623
63	99,590	99,626

Tabulka 2 [11]

Výrobci transformátorů od 1. 7. 2015 nemohou do EU prodávat transformátor se ztrátami horšími, než je definováno v tomto předpise, zákazníci nesmí koupit a uvést do provozu transformátor se ztrátami horšími než je definováno v tomto předpise. Za porušení předpisu hrozí pokuta až 5 milionů Kč. Dohled nad trhem v této oblasti má Státní energetická inspekce, která je kompetentní provádět kontrolní činnost a v případě pochybení udělit sankci [12].

2.2. Dopad nařízení č. 548/2014 na technické parametry transformátorů

Historie: designu a ekodesignu. Pojem ekodesign je převzatý výraz z angličtiny (ecodesign) a označuje začleňování požadavku ochrany životního prostředí do vývoje a konstrukce produktu. Proces navrhování a vývoje výrobku, kde se vedle klasických vlastností jako je funkčnost, ekonomičnost, bezpečnost, ergonomičnost, technická proveditelnost, estetičnost apod., klade stejně velký důraz na dosažení minimálního negativního dopadu výrobku na životní prostředí, a to z hlediska jeho celého životního cyklu. [13] První principy a pokusy, abychom vytěžili, co nejvíce s nejméně materiálu, byly už od začátku 20. století. U navrhování budov se to aplikovalo v 20. letech architektem Richardem Fullerm. Čím více jsme využívali zdroje bez jakéhokoli rozumného plánování dopředu, na naši planetě se začaly objevovat ekologické problémy (ubývání přírodních zdrojů, globální oteplování, apod.), proto bylo nutné, abychom zmíněný princip aplikovali nejen na budovy, ale i na každodenní věci (tužky, židle, atd.). Environmentálně orientovaný design se začal rozvíjet v 70. a 80. letech minulého století, jako reakce na prohlubující se ekologické problémy.

Hlavní zásady ekodesignu jsou např. prosazování bezpečných produktů a služeb, ochrana biosféry, udržitelné užívání přírodních zdrojů, snižování odpadů a zvyšování recyklace, úspora energie, snižování environmentálních a zdravotních rizik. Strategie ekodesignu rozlišujeme především podle toho, zda jde o vývoj zcela nové koncepce výrobku, nebo pouze o změnu konstrukce stávajícího výrobku. Hlavní význam ekodesignu spočívá v tom, že jde o nástroj preventivní strategie, který posuzuje dopad výrobku na životní prostředí v celém jeho životním cyklu a výsledky zahrnuje už od návrhu a konstrukce výrobku.

Po nástupu Evropské unie se ekodesign začal řešit a aplikovat i na legislativní úrovni. Rozsah směrnice v současné době zahrnuje více než 40 skupin výrobků (např. kotle, žárovky, televize, lednice, transformátory, atd.), které jsou zodpovědné za přibližně 40 % všech emisí skleníkových plynů v EU28.

Podle mého názoru v případě transformátorů není vliv na tento efekt celkem jednoznačný.

Podle zprávy VITO [14] pro Evropské Komise. Zlepšení energetické účinnosti transformátorů je často výsledkem mixu mezi použitím více materiálu, oceli vyšší kvality, amorfní oceli, a nahrazení hliníku s měděným vinutím. Rovnováha a kombinace těchto parametrů je na výběr každého výrobce, a proto jsou na trhu různé poskytnuté návrhy. Všechny možnosti jsou podobné v tom, že předpokládáme zvýšení spotřeby materiálu, který vede ke zlepšení energetické náročnosti. Nicméně toto vytváří změnu na snižování dopadů na životní prostředí.

Avšak tato změna je způsobena dvěma protichůdnými faktory:

- 1) Snížení spotřeby energie vede ke snížení jiných dopadů na životní prostředí, jako je použití vody, emise skleníkových plynů a emise acidifikace;
- 2) Zvýšení vloženého materiálu do transformátoru vede k vyšším dopadům na životní prostředí, a to zejména s odpady, polycyklické aromatické uhlovodíky (PAU), pevných částic a eutrofizace (eutrofizace je proces zvyšování obsahu živin v povrchových vodách a půdách).

Rovnováha mezi snížením spotřeby energie a zvýšením množství materiálu znamená největší zlepšení energetické náročnosti a nejmenší dopad na životní prostředí.

2.3. Opatření proti hluku

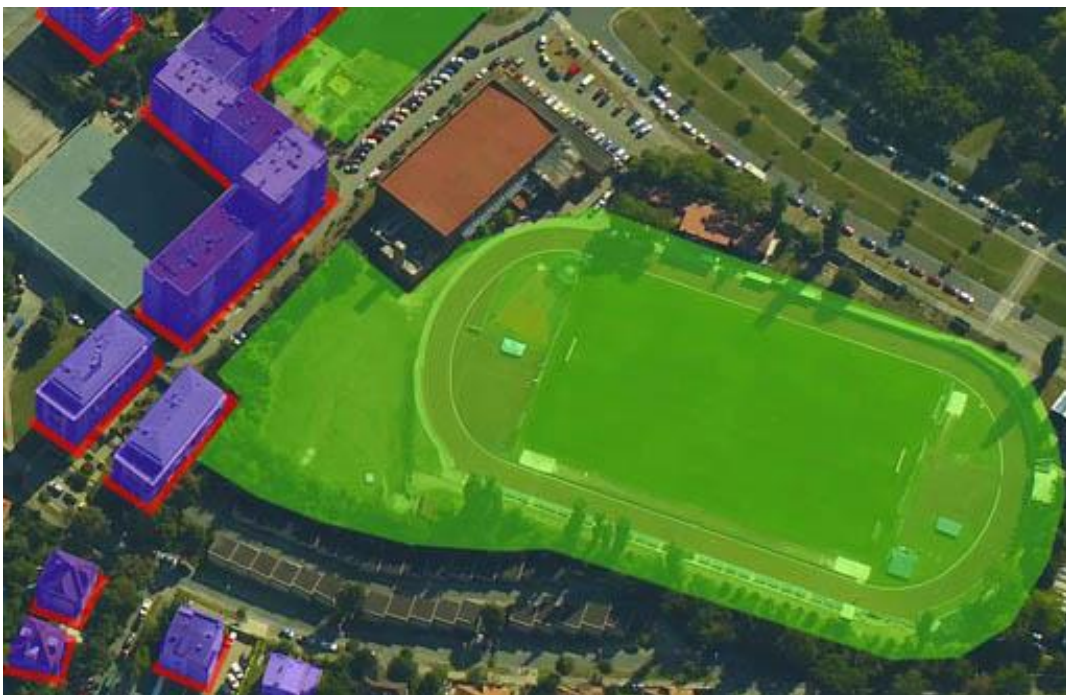
2.3.1. Hygienické limity pro hluk a vibrace

V dnešní době hygienické limity jsou stanoveny pro všechny známé a objektivně stanovitelné faktory, které mohou mít negativní vliv na zdraví člověka. Tyto limity pro hluk a vibrace jsou v České republice stanoveny v nařízení vlády č. 272/2011 Sb. Praha v tomto ohledu není výjimkou. Hygienické limity hluku jsou stanoveny pro následující prostory:

- chráněný venkovní prostor
- chráněný venkovní prostor staveb
- chráněný vnitřní prostor staveb
- pracoviště. [16]

Podle nařízení vlády č. 272/2011 Sb. za chráněný venkovní prostor se považují nezastavěné pozemky, které se používají k rekreaci, sportu, léčení a výuce (obr. 13 vyznačený zeleně). Mezi tyto prostory nepatří pozemky určené pro zemědělské účely, lesy a venkovní pracoviště. Chráněným venkovním prostorem staveb představuje prostor do 2 m okolo bytových a rodinných domů (obr. 13 vyznačený červeně), staveb pro školní a předškolní výchovu a pro zdravotní a sociální účely.

Do chráněného vnitřního prostoru staveb patří obytné a pobytové místnosti (obr. 13 vyznačený modře) definované ve vyhlášce č. 268/2009 Sb. Nepatří sem místnosti ve stavbách pro individuální rekreaci a ve stavbách pro výrobu a skladování.



Obraz 13: Příklad chráněných prostorů [16]

Doba	Chráněný prostor	Hygienický limit hluku [dB]			
		1	2	3	4
Denní i noční	Chráněný venkovní prostor lůžkových zdravotnických zařízení včetně lázní	50	50	55	65
	Chráněný ostatní venkovní prostor	50	55	60	70
Denní	Chráněný venkovní prostor staveb lůžkových zdravotnických zařízení včetně lázní	45	50	55	65
	Chráněný venkovní prostor ostatních staveb	50	55	60	70
Noční, železniční doprava	Chráněný venkovní prostor staveb lůžkových zdravotnických zařízení včetně lázní	40	45	50	60
	Chráněný venkovní prostor ostatních staveb	45	50	55	65
Noční, ostatní	Chráněný venkovní prostor staveb lůžkových zdravotnických zařízení včetně lázní	35	40	45	55
	Chráněný venkovní prostor ostatních staveb	40	45	50	60

Tabulka 3: Hygienický limity hluku [16]

2.3.2. Opatření proti hluku transformátorů

Podle PNE 38 1755 hluk vvn transformátorů má dvě zcela odlišné části. Daleko nejzávažnější částí je **tónový hluk**, vznikající v jádře transformátoru magnetostrickými plechů. Sestává z řady sudých násobků frekvence sítě a ve větších vzdálenostech se uplatňuje v různé míře jen prvních sedm (tedy frekvence 100, 200, 300, 400, 500, 600, 700 Hz). Ty tvoří charakteristický brum transformátoru, jehož intenzita je úměrná sycení jádra (a je tedy na zatížení nepřetíženého transformátoru nezávislá, ovšem je závislá na případných změnách napětí), a který při konstantním napětí je ustálený a působí nepřetržitě ve dne i v noci. Druhou část představuje **hluk ventilátorů**, ofukující radiátory transformátorového oleje. Je svou fyzikální podstatou širokopásmový, občas přerušovaný, denní (ofukování není obvykle v provozu v noci). U novějších transformátorů je tento hluk konstrukčně potlačen (pomaluběžné ventilátory). Zajistí-li se na daném místě dodržení přípustné noční hladiny tónového magnetostrickčního hluku, je tím obvykle automaticky zajištěno i dodržení přípustné hladiny hluku ventilátorů chlazení oleje.

Jestliže magnetostrickční hluk transformátorů překračuje na daném místě vně stanice hygienicky přípustnou hladinu, jsou nezbytná protihluková opatření. Toto opatření můžeme rozdělit na dvě skupiny: snížení hluku skutečného zdroje a snížení hluku zrcadlového zdroje.

2.3.2.1. Snížení hluku skutečného zdroje

Dispoziční řešení: U projektované elektrické stanice se vždy musí nejprve ověřit, jestli se ochrana proti jejímu hluku nedá řešit vhodným dispozičním řešením. Kupříkladu správně situovaná provozní budova slouží jako protihluková zástěna a dokonale ochrání před hlukem ze stanice vnější objekty stejně vysoké jako ona sama. I orientace transformátorů může být významným protihlukovým opatřením, když protipožární stěny slouží v potřebném směru jako protihlukové zástěny.

Protihlukové zástěny: Protihlukový efekt zástěny je tím větší, čím je blíže zdroji nebo zahlučenému místu. Proto je často možné využívat protipožární stěnu u transformátoru, k tomu účelu rozměrově zvětšenou tak, aby co nejméně přesahovala obrys transformátoru. Zástěna u zahlučeného místa je však opatření často nevhodné urbanisticky, esteticky i psychologicky. Materiál zástěny nesmí mít plošnou hmotnost menší než 10 kg/m². V zástěně nesmí být žádné otvory, mezery u země apod. Absorpční obložení, nejlépe z cihlových nebo keramických rezonátorů, má být selektivně laděné na maximální absorpci při frekvenci 300 Hz.

Anti hluk: V některých situacích, kdy jiný způsob ochrany není možný, lze jednotlivé objekty za hranicemi stanice nebo i jen jejich části aktivně chránit řízenou interferencí hluku z transformátoru s hlukem vysílaným v proti fázi z reproduktoru u transformátoru (tzv. anti hlukem). V kuželu s vrcholovým úhlem až 15° se tak může snížit hluk transformátoru.

2.3.2.2. Snížení hluku zrcadlového zdroje

Umístění provozních budov: K šíření hluku na dané místo odrazem od fasády budovy nedochází, je-li fasáda vhodně orientována vzhledem k transformátoru nebo k danému místu. Pokud není možno budovu využít jako protihlukovou zástěnu, musí se ověřit, není-li možno ji umístit či natočit tak, aby alespoň na dané místo neodrážela hluk.

Protihlukové zástěny: I hluk ze zrcadlového zdroje lze snížit nebo úplně potlačit, když se mu do cesty postaví protihluková zástěna. Nejvhodnější zástěnou je i v tomto případě k tomu účelu využitá protipožární stěna u transformátoru, zástěny ve větší vzdálenosti mohou již samy způsobit další nevídané odrazy.

Absorpční obklady na odrazových plochách: Hluk odražený přes fasádu budovy na zahlučené místo vně stanice lze snížit tak, že se fasáda obloží absorpčním obkladem z keramických nebo cihelných rezonátorů, majících pro frekvence 100 až 400 Hz koeficient akustické pohltivosti větší než 0,6. Pokud má být před odraženým hlukem chráněn jen jednotlivý objekt nebo omezená oblast, je zbytečné obkládat fasádu celou a stačí obložit jen tu její část, odkud přicházejí odrazy na dané místo. Tuto část na fasádě vymezují spojnice okrajů zrcadlového zdroje s okraji oblasti, která má být chráněna.

Podle podnikové normy PNE 38 1755, třetí vydání.

3. Rozbor zatížení transformátorů

Při posouzení jednotlivých možností, které máme pro výměnu transformátorů, musíme znát i velikost zatížení, průběh zatížení v čase a v rozumném rozpětí kde máme predikovat budoucí vývoj zatížení. Stávající transformátory jsou provozovány nepřetržitě. Důležitým parametrem jsou ztráty nakrátko, které závisí na velikosti zatížení. Další část ztrát tvoří ztráty naprázdno, nové transformátory mají až poloviční ztráty naprázdno. Oba tyto faktory pak velmi značně působí na hospodárnost transformátoru.

V této kapitole bude podrobněji rozebrán současný stav zatížení transformátorů na hladině 110/22 kV. Výměna všech transformátorů před ukončením jejich fyzické životnosti by byla nemožná, kvůli obrovským investičním nákladům a v tomto případě možná ani by úspory nebyly jednoznačné. Vzhledem k velkým finančním nárokům na realizaci projektu musí být transformačních stanic naprojektováno na aktuální a plánované zatížení. Při plánování vývoje zatížení musíme brát v úvahu možnosti další výstavby rodinných domů, posílení jiného vedení nebo průmyslových zón, které budou napájeny z transformačních stanic, ale i makroekonomické vlivy. Z tohoto důvodu predikce vývoje zatížení je velice nejednoznačné.

Nejprve budu zkoumat celkové zatížení transformátorů 110/22 kV, poté vývoj zatížení v Praze a ke konci této kapitoly jednotlivě za dané transformační stanice, abych objasnil problematiku, na začátek některé důležité pojmy a vztahy.

Spotřeba elektrické energie má časově proměnný charakter a je přímo závislá na pracovní aktivitě a klimatických podmínkách. Grafickým znázorněním požadavků na spotřebu elektrické energie za určité časové období je diagram zatížení. Rozlišujeme:

- roční diagram zatížení (RDZ), je ovlivňován především přírodními cykly,
- týdenní diagram zatížení (TDZ), je charakterizován střídáním pracovních a nepracovních dnů,
- denní diagram zatížení (DDZ), je ovlivňován střídáním dne a noci, a střídáním pracovní a nepracovní doby.

Charakteristické ukazatele a vztahy pro jejich výpočet z diagramu zatížení:

- Maximální zatížení (P_{\max}) je největší hodnota zatížení dosažená ve zkoumaném časovém intervalu.
- Minimální zatížení (P_{\min}) je nejmenší hodnota zatížení dosažená ve zkoumaném časovém intervalu.
- Průměrné zatížení ($P_{\text{stř}}$) je průměrná hodnota zatížení ve zkoumaném časovém intervalu.
- Zatěžovatel (k_z) je poměr průměrného zatížení k maximálnímu zatížení.

Mezi dobou využití maxima a dobou plných ztrát dle ČSN platí vztah:

$$T_z = \left[0.2 \cdot \frac{T_m}{T_r} + 0.8 \cdot \left(\frac{T_m}{T_r} \right)^2 \right] \cdot T_r \quad (24)$$

kde T_m je doba využití maxima,

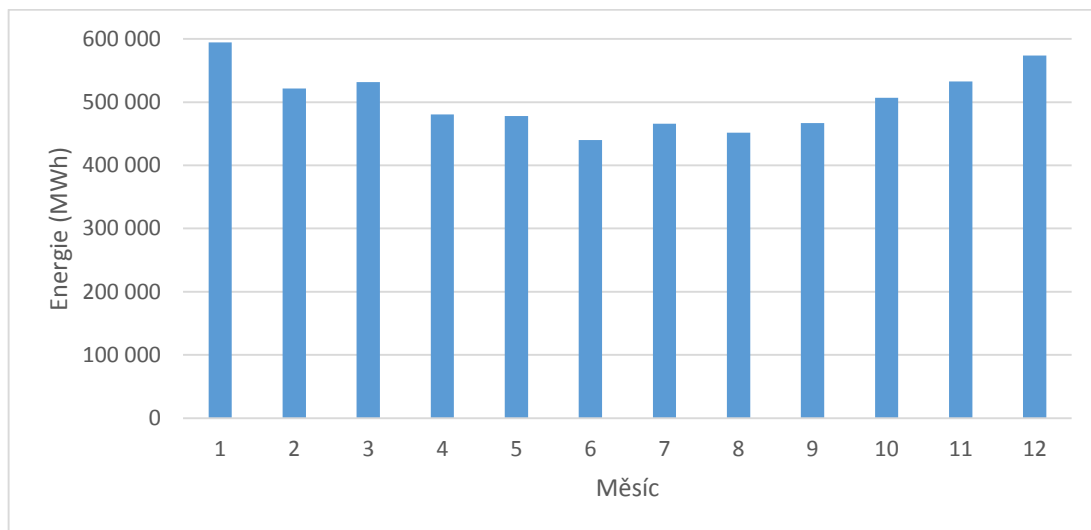
T_r je doba provozu za rok.

Platí následující vztah mezi jednotlivými ukazateli z diagramu zatížení:

$$W_{celk} = P_{stř} \cdot T_r = P_{max} \cdot T_m \quad (25)$$

Výpočty, diagramy a grafy jsou vytvořeny v programu MS Excel 2013. Veškerá data a výpočty jsou v příloženém souboru MS Excel.

V PREDi jsou transformátory 110/22 kV provozovány nepřetržitě během celého roku, jejich krátkodobé vypnutí z důvodu údržby je možné zanedbat při výpočtech. Celkové pro-
teklé energie $W_{celk} = 6\,044\,356$ MWh, v roce 2014 přes transformátory 110/22 kV, můžeme vidět v jednotlivých měsících v následujícím diagramu:



Obraz 14: Diagram proteklé energie přes transformátorů 110/22 kV za rok 2014, (podle dat PREDi)

Z obrazu 14 je zřejmé, že spotřeba je větší v zimních měsících než v letních, avšak můžeme konstatovat, že mezi těmito dvěma obdobími není tak velký rozdíl a proto budeme hodnotit celý rok a ne každý měsíc zvlášť. Hodnotu maximálního zatížení máme z měření a je vypočtena následujícím způsobem. Z měření energetického dispečinku systémem Lancelot víme, že technické maximum spotřeby bylo dosaženo dne 28. 1. 2014 ve 12 hodin $P = 1149,0$ MW. Což je veškerá spotřeba elektrické energie na území PREDi. Od toho je nutné odečíst ztráty v síti vvn $P_z = 7,8$ MW a odběry ze sítě vvn (například Ce-

mentárna Lochkov, Pražská teplárenská, měnárna SŽDC Rostoky) $P_{odb} = 27,5$ MW. Výsledná hodnota je potom hodnota maximálního výkonu $P_{max} = 1113,7$ MW proteklý přes transformátory 110/22 kV. Doba využití maxima je potom $T_m = 5427$ h. Velikost účinníku používaná při výpočtech bylo $\cos \varphi = 1$. Hodnoty vyplývající z diagramu zatížení transformátorů 110/22 kV pro rok 2014 jsou potom v následující tabulce.

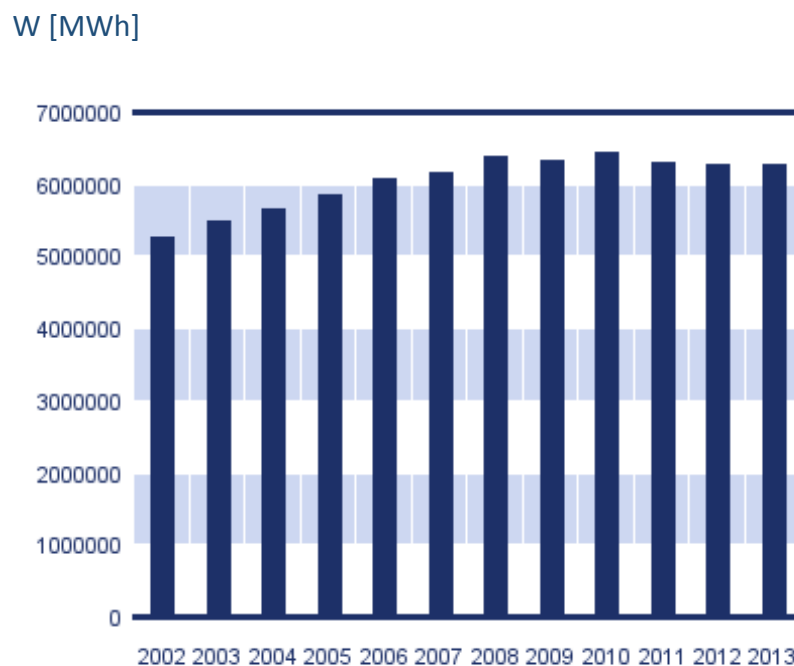
Název	W_{celk} [MWh]	P_{max} [MW]	$P_{stř}$ [MW]	k_z [-]	T_r [h]	T_m [h]	T_z [h]
Velikost	6 044 356	1113,7	690	0,62	8760	5427	3775

Tabulka 4: Ukazatele z diagramu zatížení

3.1. Vývoj zatížení v Praze

Odhad na budoucí vývoj zatížení, je nutné nejdříve zkoumat vývoj těchto údajů z minulosti. Žádný postup není sto procentně spolehlivý, protože technologické pokroky, postoje a zvyky spotřebitelů, ale i mezinárodní vztahy mají určitý vliv na velikost a vývoj konečné spotřeby elektrické energie, a tyto parametry se můžou změnit velice rychle.

Z následujícího grafu je patrný nárůst spotřeby elektrické energie na území hlavního města Prahy v posledních letech až do roku 2008. Vliv krize 2008: v letech 2008, 2009 je vidět určitou stagnaci a následný pokles ve spotřebě.



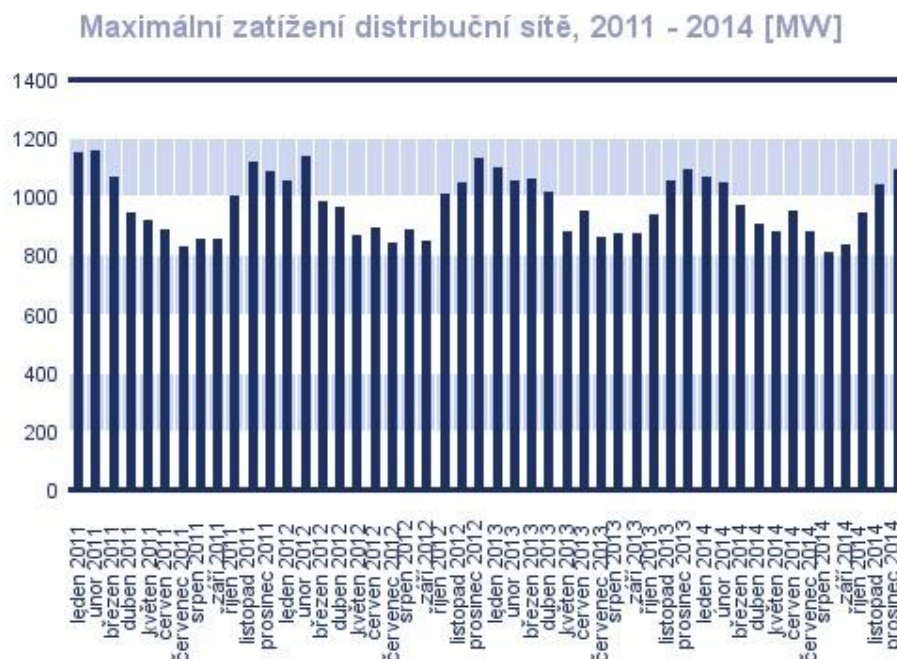
Obraz 15: Vývoj spotřeby elektrické energie v Praze, ze stránky pre.cz

Společné výzkumné centrum Evropské komise zveřejnilo studii, podle níž mezi lety 1999-2004 rostla spotřeba elektrické energie stejným tempem jako hospodářský růst. Tím je z větší části kompenzován efekt opatření přijatých na zvyšování energetické účinnosti. V uvedeném období došlo k vzestupu spotřeby elektrické energie o 11 % v domácnostech, o 16 % v sektoru služeb a o necelých 10 % v průmyslu [19].

Podle zprávy OTE, a. s. [20]: „Pro horizont roku 2020 dojde podle nejnovějších predikcí k navýšení spotřeby elektřiny o přibližně 8 %, v horizontu roku 2050 pak k navýšení o 29 %. Predikce počítá s výraznými úsporami, jak ve výrobním sektoru (v horizontu roku 2050 dojde k poklesu elektroenergetické náročnosti tvorby přidané hodnoty o přibližně 44 %), tak v sektoru domácností (průměrné roční úspory elektřiny domácností v horizontu roku 2050 činí přibližně 1,5 % roční hodnoty spotřeby sektoru). Představeny byly rovněž predikce spotřeby sektoru elektrovozidel. Pro horizont roku 2050 lze očekávat dle aktuálních predikcí spotřebu sektoru elektrovozidel ve výši přibližně 7 % tuzemské čisté spotřeby.“

Z těchto dvou studií vyplývá, že spotřeba elektřiny bude neustále růst, a když počítáme, s meziročním růstem 1 % nedopustíme se značně velké chyby.

Co se týká průběhu diagramu zatížení, z hodnot měsíční spotřeby elektrické energie za poslední tři roky je patrné, že k meziročnímu nárůstu spotřeby dochází převážně v letních měsících, což s největší pravděpodobností souvisí s rozšířeným použitím klimatizace. V zimních měsících je spotřeba za poslední roky poměrně stabilní, kterou můžeme vidět v následujícím diagramu.

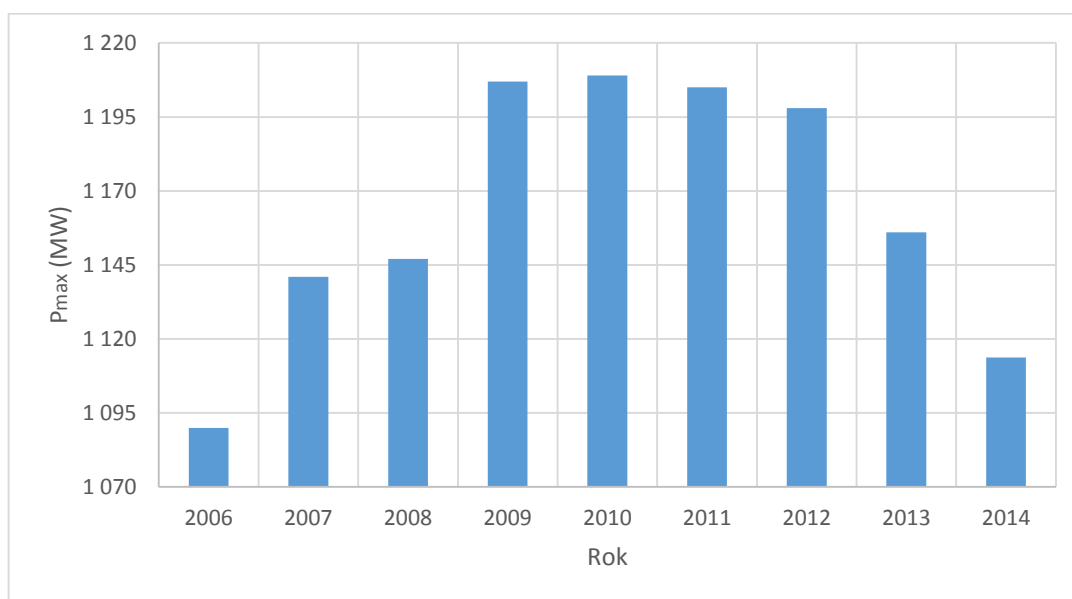


Obraz 16: Maximální zatížení distribuční sítě měsíčně (2011-2014), ze stránky pre.cz

Konkrétní hodnoty maximálního zatížení sítě za posledních let můžeme vidět v následujícím diagramu a tabulce. Z hodnot je patrné, že minimum zatížení bylo v roce 2006 a maximum zatížení v roce 2011, potom tato hodnota mírně klesala. Za poslední léta hodnota maximálního zatížení byla v intervalu kolem 1100 MW a 1200 MW.

Rok	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014
P_{\max} [MW]	1090	1141	1147	1207	1209	1205	1198	1156	1114

Tabulka 5: Maximální zatížení sítě, podle dat PREdi



Obraz 17: Maximální zatížení distribuční sítě, podle dat PREdi

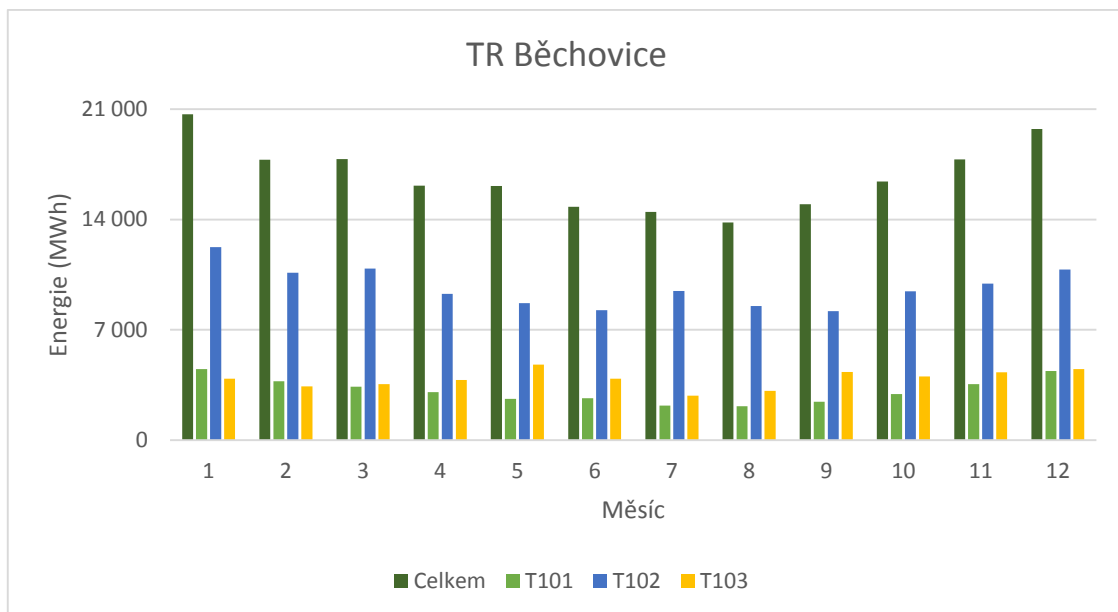
3.2. Rozbor zatížení a ztrát stávajících transformátorů

Při porovnání starých transformátorů s novými, musíme nejprve zjistit velikost maximální zatížení, a potom z toho počítat velikost ztrát jednotlivých transformátorů.

Analýzu zatížení jsem provedl pro všechny transformátory v TR 110/22 kV a potom pro ztráty jenom pro transformátory, které jsou starší než 25 let. Pro výpočet jsem používal už zmíněné vzorce (viz. Kapitola 1.2). Rozbor zatížení jednotlivých stanic probíhal následujícím způsobem. Maximální zatížení jednotlivých transformátorů a doba plných ztrát, jak se používaly při výpočtu velikosti ztrát za rok 2014. Veškeré výpočty jsou v příloze, a nyní v této kapitole, kde bude krátké shrnutí průběhu a výsledku výpočtů.

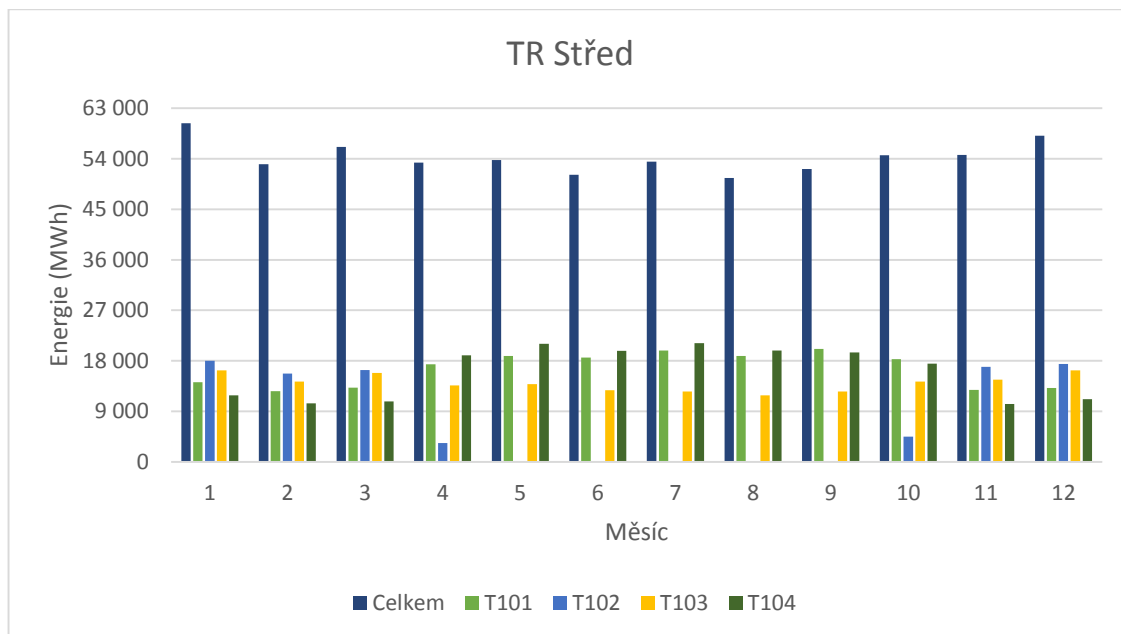
Jak už bylo dříve uvedeno, průběh diagramu spotřeby elektrické energie (zatížení) hodně závisí na počasí, na střídání pracovních a nepracovních období, na charakteru odběru dané oblasti. Z tohoto hlediska jsou zajímavé následující diagramy zatížení za rok 2014 pro některé vybrané transformovny z celkového počtu dvacet dva stanic. Tyto diagramy jsou důležité pro další postup, abychom mohli analyzovat, jestli navrhované změny budou i v budoucnosti stačit na pokrytí spotřeby jednotlivých území.

Můžeme na nich vidět různé průběhy, například zatížení na území napájené z TR Běchovice podobné charakteru zatížení celkovému, které můžeme vidět na obrázku 14.



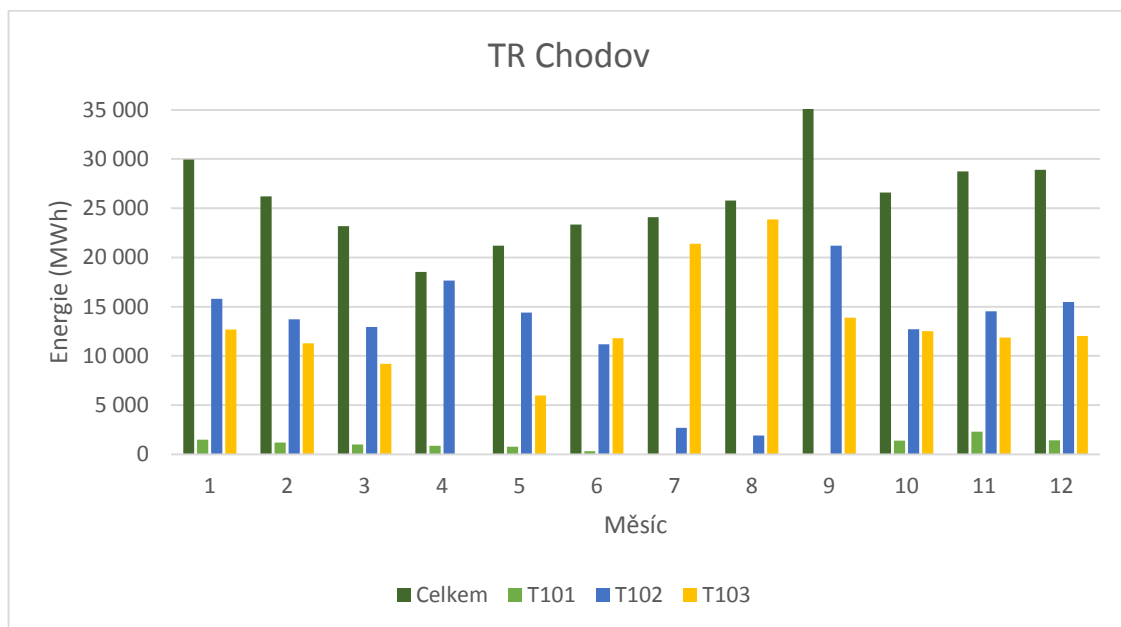
Obraz 18: Diagram spotřeby energie TR Běchovice

Z dalšího diagramu můžeme konstatovat to, že sice průběh ukazuje sezónové změny ne tak důrazně, jako v předchozím případě.



Obraz 19: Diagram spotřeby energie TR Střed

Třetím příkladem je diagram zatížení TR Chodov, který nesleduje přírodní cykly tak jednoznačně, je na něm vidět začátek školního roku.



Obraz 20: Diagram spotřeby energie TR Chodov

V následující tabulce jsou hodnoty instalovaných výkonů a maximální zatížení jednotlivých transformoven vvn/vn v Praze, z podnikových materiálů PREDi. Maxima zatížení jednotlivých TR jsou nesoudobé hodnoty. Jejich součet není maximem zatížení PREDi, proto není uváděn. Využití transformace vypočteno při $\cos \varphi = 0,95$.

Název TR vvn/vn	Instalovaný výkon [MVA]	Maximum zatížení TR [MW]	Využití transformace [%]
Běchovice	120	44,0	38,60
Černý Most	80	37,0	48,68
Červený Vrch	80	47,0	61,84
Holešovice	252	120,0	50,13
Chodov	143	60,0	44,17
Jih	189	110,0	61,26
Jinonice	143	64,0	47,11
Karlov	126	42,0	35,09
Letňany	80	35,0	46,05
Lhotka	120	59,0	51,75
Malešice	120	56,0	49,12
Měcholupy	80	46,0	60,53
Pankrác	126	42,0	35,09
Pražáčka	189	100,0	55,69
Sever	80	37,0	48,68
Smíchov	126	50,0	41,77
Střed	252	125,0	52,21
Třeboradice *	80	18,0	23,68
Východ	80	6,5	8,55
Západ	189	72,0	40,10
Zbraslav	80	27,0	35,53
Zličín	80	35,0	46,05
Celkem	2 815	X	X

* včetně transformátoru 1x40 MVA T102, který je používán pro potřeby VO(Teplárna)

Tabulka 6: Využití instalovaného výkonu transformátorů vvn/vn – PREDi, (podle dat PREDi)

Jako u analýzy všech TR dohromady i při zkoumání jednotlivých transformátorů hodnotíme zatížení za celý rok a ne pro každý měsíc zvlášť. Vycházíme za vztahu (25). Pro jednotlivé transformátory potom P_{\max} spočítáme rozdělením maximální zatížení transformovny z tabulky 5, v poměru proteklé energie přes daný transformátor za rok 2014. Potom vypočítáme T_m pro každý transformátor a pomocí toho určíme T_z pro další výpočet. Pár doplňující informace o TR na území PREDi. TR Roztoky je drážní měřna v majetku

SŽDC. Pro PREdi to je odběratel z hladiny 110 kV. Dále, u TR Třeboradice jsou odběratelé z hladiny 110 kV: ČEZ vlastní transformátor T104, Pražská teplárenská vlastní transformátor T103. Transformátor T102 (110/6 kV) je v majetku PREdi, ale slouží pouze pro napájení Pražské teplárenské. Proto v práci u TR Třeboradice je zkoumán pouze transformátor T101. Vypočtené hodnoty pro stávající transformátory 110/22 kV za rok 2014, které jsou, straší než 25 let. Data pro všechny TR jsou v příloženém souboru MS Excel, a pro vybrané transformátory v následující tabulce.

	W_{celk} [MWh]	P_{max} [MW]	T_m [h]	T_z [h]	P_z [MW]	W_z [MWh]
Běchovice						
T101	37 639	8,26	4558	2809	0,08	514,19
T102	116 329	25,52	4558	2809	0,39	1390,09
Holešovice						
T101	91 285	22,39	4076	2333	0,31	1088,03
T102	143 487	35,20	4076	2333	0,68	1979,78
T103	129 040	31,66	4076	2333	0,56	1659,04
T104	125 339	30,75	4076	2333	0,53	1595,05
Chodov						
T101	10 864	2,80	3885	2620	0,06	358,91
T102	154 256	29,70	5195	3503	0,54	2180,97
T103	146 559	30,74	4768	3215	0,51	1939,55
Jinonice						
T101	115 259	20,86	5525	3893	0,27	1329,37
Pražička						
T101	172 161	34,69	4962	3241	0,65	2401,56
T102	141 443	28,50	4962	3241	0,45	1782,39
Sever						
T101	83 786	18,46	4539	2789	0,25	1016,70
T102	84 160	18,54	4539	2789	0,25	1010,59
Střed						
T102	92 339	30,51	3027	2046	0,52	1300,40
Třeboradice						
T101	72 474	16,25	4460	2708	0,18	818,67
Východ						
T101	963	1,24	774	774	0,05	78,07
T102	29 134	6,29	4630	4630	0,08	528,56
Celkem	1 746 516	X	X	X	6,37	22 972

Tabulka 7: Vypočtené hodnoty pro transformátorů starších než 25 let

Podle mého názoru obecně stav pokrytí města s transformačními stanicemi 110/22 kV je velice dobrý. Lze na něm vidět, že výkonová rezerva transformátorů je taky dobrá a beze změny, celkového instalovaného výkonu by se dalo pokrýt i do budoucí zvýšeného zatížení. Avšak toto tvrzení budu dále ještě při výpočtech potvrzovat. Z těchto údajů lze vidět i to, že transformovny jsou poměrně hodně naddimenzované, což je dobré z technického hlediska a při dodržení požadavku spolehlivosti dodávky. Na druhé straně jejich provoz by bylo možné využít efektivněji, co se týká hospodárnosti. Náklady na ztráty by se daly ušetřit u mnoha těchto strojů. V dalších kapitolách budu zkoumat právě to, které transformátory by se vyplatilo vyměnit před ukončením jejich životnosti, a to jak by se dal navrhnout pro ně hospodárnější provoz.

Optimální velikost pro nové transformátory bude vypočtena, pomocí stávajícího zatížení transformátorů a kontrolována budoucím růstem spotřeby elektrické energie.

4. Ekonomické hodnocení

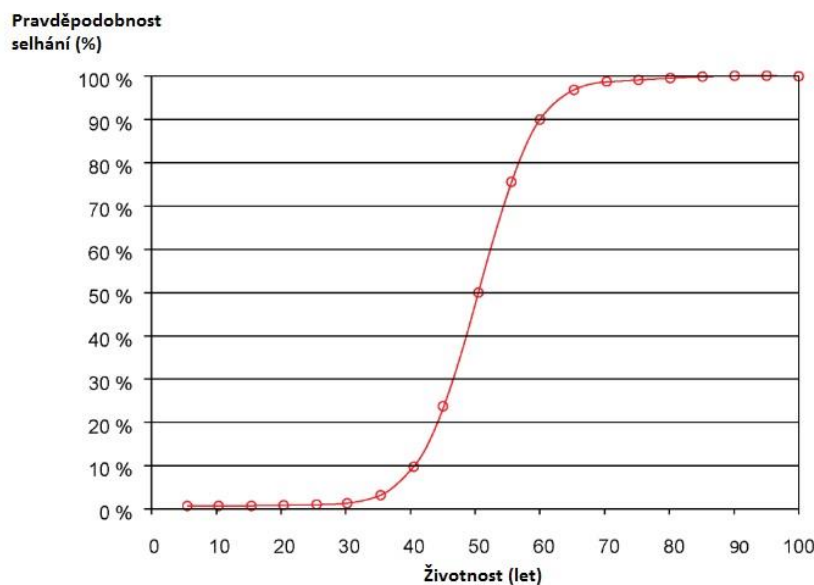
Důvody pro předčasnou výměnu transformátorů mohou být různé, například podle [21] jsou to:

- 1) Zlepšit účinnost transformátorů.
- 2) Zlepšit spolehlivost dodávky elektrické energie.
- 3) Změna profilu zatížení dané oblasti.
- 4) Změna napěťových poměrů sítě.
- 5) Dodržení ekologických a protipožárních předpisů.

V našem případě je to první důvod, zlepšit účinnost a tím ušetřit na nákladech na ztrátách, které jsou mnohem větší u starších strojů, protože spolehlivost dodávky v Praze je velice dobrá, neplánuje se žádná změna v blízké budoucnosti, a všechny předpisy jsou dodržovány. Podle [14] a [21] se vyplatí vyměnit staré transformátory za nové s lepší účinností, a návratnost takových investic je jen na několik let, ale to se ve skutečnosti zřídka, kdy stává, aby bylo příčinou výměny právě tento případ.

Při hodnocení investice musíme brát do úvahy následující faktory: náklady na energetické ztráty, náklady na údržbu, riziko selhání, investiční náklady a zůstatkovou cenu u starých transformátorů. Krátký úvod, než uvedu konkrétní čísla, v daném případě:

- Riziko selhání je tím větší, čím jsou transformátory starší, po nárůstu náhle až po 40 leté životnosti. V našem případě tento aspekt problému je možno zanedbat kvůli dobrému pokrytí města.



Obraz 21: Typická funkce míry selhání distribučních transformátorů, podle [21]

- Investiční náklady zahrnují: pořizovací cena strojů, náklady na dopravu a montáž nových transformátorů. Demontáž stávajících transformátorů a nastavení řídicího systému pro změněné podmínky.
- Zůstatková cena je nulová v tomto případě, a vlastně jenom zahrnuje cenu, kterou můžeme dostat za materiál strojů, až po ekologické likvidaci oleje.
- Náklady na ztráty jsou mnohem menší u novějších strojů. Jedna z hlavních položek při porovnání různých variant.
- Náklady na údržbu jsou menší u novějších transformátorů. Avšak jejich velikost je zanedbatelná vůči investičním nákladům a nákladům na ztráty, proto podle [21] počítáme s 1 % z investičních nákladů u nových transformátorů a u starších s 4 %.

Podle výpočtů bychom měli zjistit, které transformátory se vyplatí vyměnit před ukončením životnosti a ještě navrhnout optimální výkon náhradních transformátorů, které nemusí odpovídat používané velikosti dosavadních strojů. Při výpočtech jsem používal teoretické předpoklady, které jsou podrobně popsány v předchozích kapitolách této práce a všechny výpočty jsou k prohlédnutí v příloze.

Vycházíme z analýzy dat za rok 2014, proto otázkou je, které transformátory by se vyplatilo vyměnit v roce 2015 z těch, které mají životnost větší než 25 let. Předpoklady při výpočtech jsou následující:

- Předpokládá se, že investorem tohoto projektu bude PŘEdi.
- Doba odepisování transformátorů u PŘEdi je stanovena na 25 let, proto zkoumám jenom transformátory starší než 25 let.
- Doba nutné výměny transformátorů je stanovena na 40 let.
- Životnost všech posuzovaných variant je stejná pro jakýkoliv zvolený jmenovitý výkon, proto můžu zvolit dobu porovnání rovnou době životnosti a použít jako kritéria minimum diskontovaného toku výdajů, kumulovaného za dobu životnosti – minimum výrobních nákladů za dobu životnosti.
- Cena elektrické energie za ztráty byla pro rok 2014 určena od ERÚ na základě výkazů ve výši 1243,51 Kč/MWh.
- WACC (Weighted average cost of capital – Vážené průměrné náklady kapitálu) PŘEdi pro rok 2014 byl 5,5 %.
- Zůstatková cena transformátorů starších než 25 let po ekologické likvidaci je odhadnutá na následující hodnoty: pro transformátory o jmenovitém výkonu 40 MVA 50 tisíc Kč, pro transformátory o výkonu 63 MVA 100 tisíc Kč.

4.1. Prostá výměna transformátorů

Prostá výměna transformátorů znamená v našem případě to, že zkoumáme možnost výměny těch transformátorů, na transformátory stejného jmenovitého výkonu, které ještě nedosáhly stanovenou hodnotu nutné výměny 40 let, ale už jsou starší než 25 let.

Na začátku této kapitoly je přehled parametrů nových transformátorů, které plní podmínky nařízení 548/2014, a jsou od firmy ETD Transformátory a.s. Dále je podobná analýza zatížení a ztrát těchto transformátorů podle dat z roku 2014 jako je v předchozí části této práce pro stávající transformátory. Následně je uvedeno porovnání stávajících a nových transformátorů, na němž záleží i samotný závěr.

V následující tabulce jsou uvedeny technické parametry distribučních transformátorů ETD o jmenovitém výkonu 25 až 63 MVA.

Výkon [MVA]	Převod [kV]	u_k [%]	i_o [%]	P_o [kW]	P_k [kW]
25	115±8x1,25%/22	11,0	0,1	11	106,5
25	115±8x1,25%/16,5	11,0	0,1	11	111
25/(8)	110±8x2%/23/(6,3)	11,0	0,2	15	81
25/25/25	115±11x1%/22±2x2,5/6,6	10,5	0,1	15,5	93,5
31,5/(10)	110±8x2%/23/(6,3)	11,0	0,2	17,5	102,5
40/20/20	115±9x1,78%/11/11	10,5	0,1	23	128
40	115±13x1,22%/21,5	15,0	0,1	13,5	134
40/(12,5)	110±8x2%/23/(6,3)	11,0	0,1	17,5	118,5
40	110±8x2%/23±1x5%/6,3	9,6	0,1	19	164,5
50/25/25	115±8x1,25%/22±2x2,5%/6,6	11,0	0,1	17	78,5
50/(16)	110±8x2%/23/(6,3)	11,5	0,1	20	131
63/(21)	110±8x2%/23/(6,3)	17,5	0,1	23,5	175

Tabulka 8: Technické parametry nových transformátorů, podle dat ETD

Orientační ceny nových transformátorů, s tučným písmenem označené v tabulce 8, včetně nákladů na dopravu a montáž, používané při výpočtech:

Výkon [MVA]	25	31,5	40	50	63
Cena [mil. Kč]	12,1	13,7	13,9	16,6	16,8

Tabulka 9: Investiční náklady nových transformátorů

Při výpočtu průměrných ročních výrobních nákladů jsem používal následující teoretická východiska a vztahy, podle literatury [10] a [21].

Podle literatury [21] optimální výměnný cyklus je počet let n , při kterém průměrné roční výrobní náklady jsou minimální. Pro výpočet se musí odhadnout hodnota provozních nákladů v celém průběhu životního cyklu transformátoru. To je velice obtížný úkol, který vyžaduje stanovení mnoho předpokladů o budoucnosti a minulosti, dalším problémem je určení doby porovnání. Proto používáme následující přístup při porovnání: který je lepší ze dvou možností, vyměnit stávající transformátor hned, nebo nechat to ve funkci pro (prozatím) jeden rok. Tímto způsobem pouze průměrné roční výrobní náklady za následující rok musíme vzít v úvahu.

Vztah pro výpočet průměrných ročních výrobních nákladů, které potom porovnáme pro staré a nové stroje. Při instalaci nového transformátoru, jeho průměrný roční výrobní náklad za následující rok bude:

$$N_{vyr\phi} = a_{T\dot{z}} \cdot N_{inv} - N_{zc} + N_z + N_{ps} \quad (26)$$

kde N_{ps} jsou roční stálé provozní náklady,

N_{zc} je zůstatková cena stávajících transformátorů po ekologické likvidaci,

N_{inv} jsou investiční náklady,

$a_{T\dot{z}}$ je poměrná roční anuita:

$$a_{T\dot{z}} = p_0 + p_a = \frac{(1+r)^{T\dot{z}} \cdot r}{(1+r)^{T\dot{z}} - 1} \quad (27)$$

kde p_0 je poměrný účetní odpis

p_a je poměrný anuitní úrok

$T\dot{z}$ je doba ekonomické životnosti

r je diskontní míra,

N_z jsou roční náklady na ztráty:

$$N_z = W_z \cdot c_{ztr} \quad (28)$$

kde W_z ztrátové energie,

c_{ztr} cena elektrické energie za ztráty.

Vztah pro přesunutí zahájení provozu nových transformátorů o jeden rok, včetně provozních nákladů pro stávající stroje:

$$N'_{vyr\phi} = \frac{a_{T\dot{z}} \cdot N_{inv} - N_{zc}}{1+r} + N'_z + N'_{ps} \quad (29).$$

V této části jsou výpočty a porovnání možnosti výměny starých transformátorů nad 25 let za nové transformátory se stejně velkým jmenovitým výkonem, pro porovnání ztrát. Používaná data pro zatížení za rok 2014 vynásobené odhadované růstem 1 %.

Následuje příklad postupu při porovnání starých a nových transformátorů na výpočtu pro transformátor T101 v TR Holešovice, pro ostatní transformátory výpočet je analogický. Všechny výpočty a data jsou v příloženém souboru MS Excel.

Stávající transformátor sloužící ještě jeden rok:

- Ztráty starších transformátorů jsou mnohem větší, než nových transformátorů. Podle data za rok 2014 velikost ztrátové energie pro transformátor T101 v TR Holešovice činily 1088,03 MWh a 87,60 MWh za chlazení pomocí oběhových čerpadel, když počítáme s růstem 1 %, potom to dává celkem 1187,36 MWh. Cena elektrické energie za ztráty byla pro rok 2014 určená 1243,51 Kč/MWh, a to používáme i pro další rok. Z toho náklady na ztráty by byly 1 476 496,73 Kč.
- Údržba u starších transformátorů je vyšší, jejich hodnota by byla počítána jako 4 % z průměrné roční hodnoty investice nového stroje. Pro transformátor T101 je to 50 097,17 Kč.
- Velikost průměrné roční investice, čekání ještě jeden rok za výměnu by bylo: 1 187 136,62 Kč.
- Za rok cena za starý stroj by bylo: 94 786,73 Kč.
- Celkem to dává:
(1 187 136,62 – 94 786,73 + 1 476 496,73 + 50 097,17) Kč = 2 618 943,78 Kč.

Nový transformátor, který je okamžitě uváděn do provozu:

- Zůstatková cena transformátorů starších než 25 let je nulová. Cena starého stroje po ekologické likvidaci oleje je 100 000,00 Kč.
- Průměrná roční hodnota investice je pro transformátor o jmenovitém výkoně 63 MVA: $16\,800\,000 \cdot 0,075 = 1\,252\,429,13$ Kč.
- Náklady na ztráty, kdyby byl nainstalován nový transformátor o stejném jmenovitém výkonu než stávající transformátor, byly by následující údaje:
 $838,49 \text{ MWh} \cdot 1243,51 \text{ Kč/MWh} = 1\,042\,673,97$ Kč.
- Údržba u nových transformátorů byla počítána jako 1 % z průměrné roční hodnoty investice. Pro transformátor T101 je to 12 524,29 Kč.
- Celkem to dává:
(1 252 429,13 – 100 000,00 + 1 042 673,97 + 12 524,29) Kč = 2 207 627,39 Kč.

Porovnání: Možná úspora je rozdíl těchto dvou hodnot, což je:

$$(2\,618\,943,78 - 2\,207\,627,39) \text{ Kč} = 411\,316,39 \text{ Kč}.$$

To znamená, že kdybychom vyměnili transformátor T101 hned, za nový transformátor, a ne za jeden rok, mohli bychom ušetřit za příští rok 411,3 tisíc Kč.

Výsledky porovnání pro všechny stávající transformátory starší než 25 let jsou k prohlédnutí v následující tabulce.

Název transformátorů	Stávající transformátory ještě jeden rok	Nové transformátory hned	Rozdíl průměrných ročních výrobních nákladů
	$N'_{\text{vyr}\phi}$ [Kč]	$N_{\text{vyr}\phi}$ [Kč]	$\Delta N_{\text{vyr}\phi}$ [Kč]
Běchovice			
T101	1 618 221	1 381 380	236 841
T102	2 729 265	2 343 087	386 178
Holešovice			
T101	2 618 944	2 207 627	411 316
T102	3 748 967	3 213 235	535 732
T103	3 343 520	2 890 181	453 339
T104	3 262 353	2 812 925	449 428
Chodov			
T101	1 422 864	1 212 312	210 552
T102	3 731 208	3 082 527	648 680
T103	3 590 881	3 270 208	320 673
Jinonice			
T101	2 817 088	2 514 045	303 043
Pražáčka			
T101	4 285 566	3 804 150	481 416
T102	3 500 098	3 013 994	486 103
Sever			
T101	2 253 911	1 826 900	427 011
T102	2 246 394	1 831 888	414 506
Střed			
T102	2 568 808	2 267 913	300 894
Třeboradice			
T101	2 003 145	1 688 826	314 319
Východ			
T101	1 073 359	1 042 549	30 810
T102	1 635 132	1 335 958	299 174
Celkem	48 449 725	41 739 708	6 710 017

Tabulka 10: Vypočtené hodnoty pro staré a nové transformátory

U všech transformátorů by bylo lepší vyměnit stávající transformátory za nové okamžitě, a nečekat ani ne jeden rok s výměnou. Na druhou stranu je dost nepravděpodobné, abychom vyměnili všech osmnáct transformátorů najednou. Čtyři stroje jsou nyní na konci životnosti, výměna je nutná. Co se týká ostatních stávajících transformátorů, největší rozdíly jsou u těch, které mají největší zatížení – úspory na ztráty by byly větší.

4.2. Použití více transformátorů o nižším výkonu

V této části práce je zkoumán problém výměny transformátorů z trochu jiného hlediska. V předchozí kapitole byly analyzovány data zatížení a následné porovnání, co se stane, když nyní vyměníme staré stroje za nové o stejném výkonu. To znamená, že nebyla zkoumána možnost, vyhledání optimální velikosti a počet transformátorů, a právě teď bude následovat.

Při této části výpočtů, když optimalizujeme velikost a počet nainstalovaných transformátorů, je třeba změnit a rozšířit kritéria výrobních nákladů. V této části budu porovnávat transformátory různé velikosti, a hledat minimum jejich výrobních nákladů za dobu celkové životnosti 40 let. To znamená při respektování růstu zatížení a paralelního chodu transformátorů. Podle [10] při posuzování ekonomické efektivity projektovaných transformačních stanic s více transformátory (při optimalizaci počtu a velikosti instalovaných transformátorů) je třeba rozšířit kritérium výrobních nákladů o respektování hospodárného paralelního chodu více transformátorů. Při porovnání možností používání transformátorů o různé velikosti, zůstatková cena stávajících transformátorů je stejná pro všechny posuzované varianty, proto není počítáno při optimalizaci. Doba plných ztrát se uvažuje za nezměněné za celkovou životnost.

$$N_{vyrTz} = N_{inv} + N_z + N_{ps} \rightarrow MIN \quad (30),$$

kde při výpočtu nákladů na ztráty zahrneme i růst zatížení a předpokládáme, že doba plných ztrát se nebude měnit:

$$N_z = c_{ztr} \cdot \left[\left(n \cdot \frac{1}{a_{Tz}} \cdot P_n \cdot T_r \right) + \left(\frac{1}{n} \cdot k_N \cdot P_{kn} \cdot \left(\frac{S_m}{S_n} \right)^2 \cdot T_z \right) \right] \quad (31)$$

kde n je počet stejných transformátorů,

k_N je složený zásobitel druhého řádu za dobu T_z :

$$k_N = \frac{(1+\chi)^{2 \cdot T_z} - (1+r)^{T_z}}{(1+r)^{T_z} \cdot [(1+\chi)^2 - (1+r)]} \quad (32).$$

χ je konstantní míra růstu zatížení.

V předchozí kapitole bylo při výpočtu uvedeno, že nové transformátory mají lepší vlastnosti, menší ztráty a jsou šetrnější než staré transformátory. Vyplatí se vyměnit stávající transformátory za nové, o stejném jmenovitém výkonu, teď budeme zkoumat možnost nainstalování transformátorů o jiném jmenovitém výkonu. K investičním nákladům za transformátor je nutné připočítat: pole v rozvodně 110 kV za 7 mil. Kč (v ceně ochrany, řídicí systém), pole v rozvodně 22 kV za 1,5 mil. Kč (v ceně ochrany, řídicí systém) a stání

transformátoru za 13 mil. Kč (v ceně stavební a technologická část). Celkem to dává 21,5 mil. Kč.

TR Holešovice a TR Chodov všechny transformátory jsou již starší než 25 let. TR Sever a TR Východ mimo rezervní transformátory pro ostatní transformátory byla vypočtena hodnota průměrných výrobních nákladů. TR Běchovice a TR Pražačka u obou transformoven ze tří transformátorů již dva jsou starší více než 25 let, proto byl proveden výpočet i u dvou transformoven. Veškerá data a výpočty jsou v příloženém souboru MS Excel.

Obdobnou analýzu by bylo možné provést pro všechny TR zvlášť, při respektování požadavků a průběhu zatížení jednotlivých oblastí. Návrh na optimalizaci záleží na různých faktorech, podle mého názoru jeden z nejdůležitějších, je velikost a průběh zatížení, které ve značné míře působí na konečný výsledek. Při projektovaném růstu zatížení můžeme zjistit minimální počet potřebných transformátorů. Z hlediska spolehlivosti počítáme maximální zatížení TR tak, že jeden transformátor je v poruše a zbylé mohou přetížit, v případě PREDi je to: že transformátory mohou přetížit o 25% po dobu 2 hodin. Hodnoty vypočtené pomocí této úvahy budou mít omezující pro konečný výpočet.

Název TR	Maximální zatížení (2014) P_{\max} [MW]	Odhad maximálního zatížení (2054) P'_{\max} [MW]
Běchovice	44,0	65,5
Holešovice	120,0	178,7
Chodov	60,0	89,3
Pražička	100,0	148,9
Sever	37,0	55,1
Východ	6,5	9,7

Tabulka 11: Maximální a předpokládaný maximální zatížení zkoumaných TR

Jmenovitý výkon S_n [MVA]	25	31,5	40	50	63
Název TR	Minimální počet transformátorů [kus]				
Běchovice	4	3	3	3	2
Holešovice	7	6	5	4	4
Chodov	4	4	3	3	3
Pražička	6	5	4	4	3
Sever	3	3	3	2	2
Východ	2	2	2	2	2

Tabulka 12: Minimální počet možných nainstalovaných transformátorů při odhadnutém maximálním zatížení

Shrnutí výsledků výpočtu pro zkoumané transformovny:

TR Běchovice, u této transformovny podle výpočtu vychází z nejmenších výrobních nákladů následující případ: vyměnit dvě stávající starší transformátory o výkonu 40 MVA za nové o velikosti 63 MVA. Třetí transformátor, který je nainstalovaný a nebyl zahrnut do výpočtu, by byl ponechán jako rezervní.

TR Holešovice stávající stav: jsou v provozu čtyři transformátory o výkonu 63 MVA, které mají zbytkovou životnost ještě pět let. Podle výpočtů výrobních nákladů, při respektování odhadnutého růstu zatížení, vychází nejlépe nainstalovat čtyři transformátory o výkonu 50 MVA.

TR Chodov: stávající stav je následující dva transformátory o výkonu 40 MVA a jeden o výkonu 63 MVA, všechny tři jsou starší než 25 let. Návrh podle výpočtů, by bylo nainstalovat tři transformátory o jmenovitém výkonu 40 MVA.

TR Pražáčka stávající stav: tři transformátory o jmenovitém výkonu 63 MVA, dva jsou starší než 25 let, třetímu je jenom 11 let. Podle výpočtů minimalizaci výrobních nákladů vychází nejlépe nainstalovat a provozovat u této rozvodny tři transformátory o výkonu 63 MVA.

TR Sever stávající jeden transformátor o výkonu 63 MVA jako rezerva. Podle výpočtu vychází, že nejmenší výrobní náklady na celkovou životnost by měli být dva transformátory o jmenovitém výkonu 50 MVA.

TR Východ má nejmenší zatížení mezi 22 transformoven, i při meziročním růstu 3 % maximální zatížení hodnota maximálního zatížení nedosáhne velké čísla, proto bych tady doporučil nainstalovat dva transformátory o jmenovitém výkonu 25 MVA, a to tak, že jeden transformátor běží nepřetržitě a druhý slouží jako rezerva, protože výrobní náklady jsou pro transformátory o jmenovitém výkonu 25 MVA nejmenší a přechodový výkon pro připojení druhého transformátoru je až 15,21 MVA a to nedosáhne. Předpokládané maximální zatížení nedosáhne ani do 40 let tady, při předpokládaném meziročním růstu zatížení 1 %. Pořizovací cena transformátorů o jmenovitém výkonu 25 MVA je menší než ceny transformátorů o jiných jmenovitých výkonech.

S_n [MVA]	25	31,5	40	50	63
Název TR	Počet doporučených transformátorů [kus]				
Běchovice					2
Holešovice				4	
Chodov			3		
Pražáčka					3
Sever				2	
Východ	2				

Tabulka 13: Optimální počet možných nainstalovaných transformátorů

Při zobecnění situace a odklonu od konkrétních TR. Při výpočtu nákladů a ztrát zahrnují i dobu plných ztrát, které nelze dosáhnout při úplném zobecnění problému, ale při úvaze v dalším výpočtu s celou systémovou hodnotou za rok 2014, což bylo $T_z = 3775$ h. Ostatní čísla a postup výpočtu je stejný, jako předtím v této kapitole. Otázkou je, když známe maximální zatížení na začátku období, kolik a jak velké transformátory nainstalované by měly mít nejmenší výrobní náklady na zkoumané období, při dodržení minimálního počtu transformátorů na spolehlivost provozu při odhadnutém budoucím maximálním zatížení za 40 let. Odpověď na tuto otázku je následující: ohledně relativně malých rozdílů mezi ztrátami nových transformátorů různých jmenovitých výkonů, a větších rozdílů investičních nákladů, když musíme nainstalovat jeden stroj navíc, vždy je lepší mít nainstalovaný co nejmenší možný počet transformátorů.

S_n [MVA]	25	31,5	40	50	63
Počet [kus]	S_m [MVA]				
2	31,25	39,38	50,00	62,50	78,75
3	62,50	78,75	100,00	125,00	157,50
4	93,75	118,13	150,00	187,50	236,25
5	125,00	157,50	200,00	250,00	315,00
6	156,25	196,88	250,00	312,50	393,75
7	187,50	236,25	300,00	375,00	472,50

Tabulka 14: Maximální zatížení z hlediska spolehlivosti

V následující tabulce jsou uvedeny výsledky výpočtu při $T_z = 3775$ h. Když na začátku zkoumaného období je maximální zatížení do 52,89 MW, které vychází na nejmenší výrobní náklady nainstalovat na dva transformátory, od 52,89 MW do 105,79 MW tři transformátory, a mezi 105,79 MW a 125,93 MW čtyři transformátory, další hranici jsem neuváděl, protože na území PREDi v roce 2014 největší zatížení na jednu transformovnu bylo 125 MW. Optimální jmenovité výkony vždy rostly v daném intervalu tak, aby odpovídaly maximálnímu zatížení z hlediska spolehlivosti na konci zkoumaného období.

0 let	40 let	Optimální počet a výkon	
P_{max} [MW]	P'_{max} [MW]	Počet [kus]	S_n [MVA]
20,99	31,25	2	25
26,45	39,38		31,5
33,58	50,00		40
41,98	62,50		50
52,89	78,75		63
67,17	100,00	3	40
83,96	125,00		50
105,79	157,50		63
125,93	187,50	4	50

Tabulka 15: Optimální počet a výkon transformátorů

4.3. Porovnání výsledků

V kapitole 4.2, podle vztahu 30 a 31 byl určen optimální počet transformátorů při předpokládaném meziročním růstu zatížení o 1 %, tím pádem bylo provedené určité zjednodušení situace, to znamená, že bez ohledu na časový vývoj zatížení a možnosti aplikování paralelního provozu transformátorů postupně, byla zvolena optimální velikost nových transformátorů tak, aby od začátku odpovídaly maximálnímu odhadnutému zatížení. Nebyla brána do úvahy možnost postupné přidání jednotlivých transformátorů během životnosti, ale najednou na začátku. Pro úplné prozkoumání problematiky rozšíříme původní vztah 30 o tyto fakty, a potom na příkladu **TR Chodov** porovnáme výsledky těchto dvou pohledů.

Podle [10] při paralelním provozu skupiny transformátorů pokud je zatížení nízké, potom lze ušetřit odpojením některých transformátorů jejich ztráty naprázdno případně, pokud je zatížení vysoké připojením optimálního počtu transformátorů lze snížit celkové ztráty nakrátko. Ne vždy je připojování a odpojování velkých transformátorů účelné. Je-li přepojování časté a na krátkou dobu, je možné, že snížení ztrát nevyváží opotřebení spínačů a riziko poruchy je při často opakovaných manipulacích. Jak už bylo dříve uvedeno na konci kapitoly 1.3, z hlediska ztrát transformátorů je paralelní chod transformátorů do jedné oblasti stejný jako, když tuto jednu oblast rovnoměrně rozdělíme do více oblastí, které budou napájené jen jedním transformátorem.

Minimální počet potřebných transformátorů na začátku zkoumaného období lze zjistit podobně, jako v předchozí kapitole pro odhadnuté maximální zatížení: Z hlediska spolehlivosti počítáme maximální zatížení TR tak, že jeden transformátor je v poruše a zbylý mohou přetížít, v případě PREdi je to: že transformátory mohou přetížít o 25% po dobu dvou hodin. Pro $S_m = 60$ MVA to nám dává:

Jmenovitý výkon S_n [MVA]	25	31,5	40	50	63
Název TR	Minimální počet transformátorů [kus]				
Chodov	3	3	3	2	2

Tabulka 16: : Minimální počet možných nainstalovaných transformátorů na začátku zkoumaného období

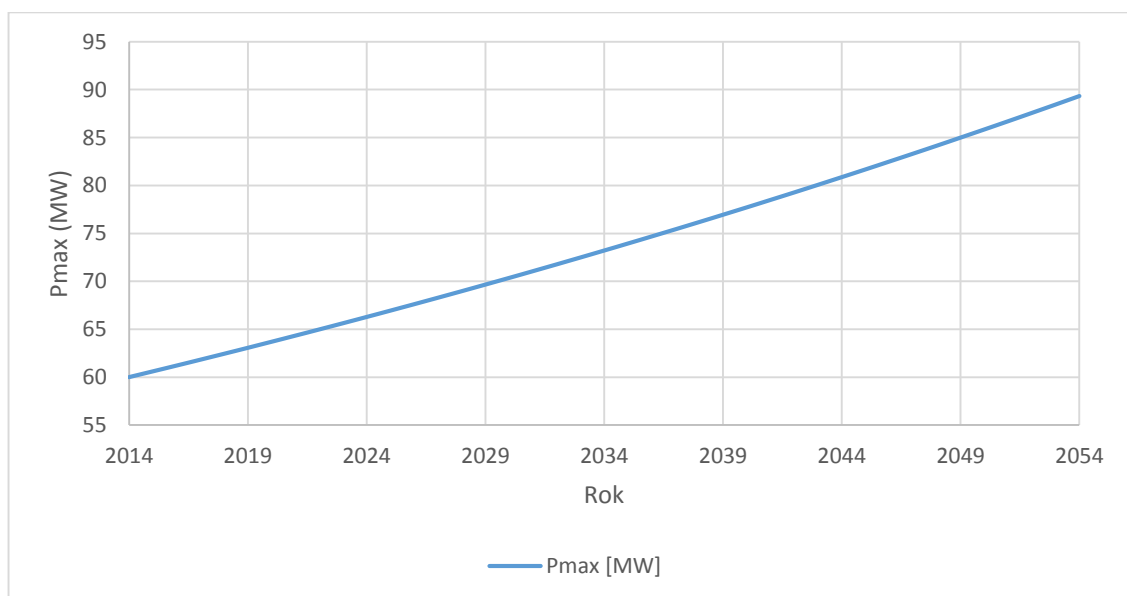
V následující tabulce lze vidět zatížení, při kterém je vhodné připojit k n-1 transformátorům n-tý při rostoucím zatížení anebo naopak jeden transformátor odpojit, když zatížení klesá. Vypočtené hodnoty pomocí vztahů už uvedených v kapitole 1.3, a použitím technických parametrů transformátorů ETD Transformátory. Z toho však nemůžeme vidět absolutní velikost ztrát při daném zatížení, to bude následovat až dále, na příslušných grafech (obrazy 23 až 27). Minimální počet potřebných transformátorů je označený jak

na začátku (zelená barva), tak na konci (tmavé modré) zkoumané období v následující tabulce. Počet potřebných transformátorů na paralelní provoz při daném maximálním výkonu na začátku daného období je označen žlutě, a šedou barvou na konci zkoumaného časového období. Protože je značný rozdíl mezi těmito dvěma čísly, budu zkoumat vždy minimální potřebný počet pro transformátory různých jmenovitých výkonů.

S_n [MVA]	25	31,5	40	50	63
Počet [kus]	Přechodový výkon $P_{př}$ [MW]				
2	15,21	18,41	19,23	27,63	32,65
3	26,35	31,88	33,30	47,85	56,55
4	37,27	45,09	47,09	67,68	79,97
5	48,11	58,21	60,80	87,37	103,25
6	58,93	71,29	74,46	107,01	126,45
7	69,72	84,35	88,10	126,61	149,62
8	80,51	97,40	101,73	146,20	172,76
9	91,29	110,44	115,35	165,77	195,89

Tabulka 17: Konkrétní hodnoty přechodových výkonů transformátorů ETD

Maximální zatížení TR Chodov v roce 2014 bylo 60 MW, a podle dat spotřeby elektrické energie střední výkon za stejný rok vycházel na 35,6 MW. Z obrázku 20. můžeme vidět, že zatížení oblasti napájené z TR Chodov během roku není konstantní (viz. Kapitola 3.2, str. 41), proto uvažujeme s tím, že nový stroj připojíme, až přesáhne hranice potřebného minimálního počtu při dosaženém daném maximálním zatížení. Dále jsem předpokládal, že charakter průběhu zatížení se nebude výrazným způsobem měnit po čase zkoumání. Na následujícím diagramu je potom používán odhad vývoje maximálního zatížení TR Chodov v čase.



Obraz 22: Odhad vývoje maximální zatížení TR Chodov

Podle mého názoru při tomto rozšířeném pohledu na daný problém, nelze uvést jeden obecný vztah, do kterého dáme všechny vstupní údaje a potom dostaneme konečný výsledek pro všechny případy, protože pro jednotlivé varianty se může lišit, jak počet, tak i čas provedení nových transformátorů do provozu. Proto budeme prozkoumávat všechny možnosti zvlášť (pro různé jmenovité výkony). Investiční náklady na nové transformátory jsou totožné tou hodnotou, kterou jsem používal v předchozích kapitolách, výrobní náklady budou vztažené k začátku zkoumaného období. Všechny výpočty jsou k nahlédnutí v přiloženém souboru MS Excel.

Následující vztah je pro případ, když k n transformátorů nainstalovaný na začátku, připojíme další stroj až za t let:

$$N_{vyrTz} = n \cdot N_{inv} + \frac{N_{zb} + \frac{N_{zb}}{(1+r)^{(T_z-t)}}}{(1+r)^t} + \sum_{j=1}^t \left(\frac{N_{zrj}}{(1+r)^{T_j}} \right) + \sum_{j=t}^{T_z} \left(\frac{N_{zr(n+1)j}}{(1+r)^{T_j}} \right) + N_{psc} \rightarrow MIN \quad (33)$$

kde n počet stejných transformátorů nainstalovaných na začátku zkoumaného období,

N_{inv} je velikost investičních nákladů na jeden transformátor,

r je diskontní míra,

t je počet let, po který připojíme $(n + 1)$ - ní transformátor,

T_z je ekonomická životnost,

N_{zb} je zbytková hodnota později připojeného transformátoru na konci zkoumané období, pokud platí: $(T_z - t) < 25$ let,

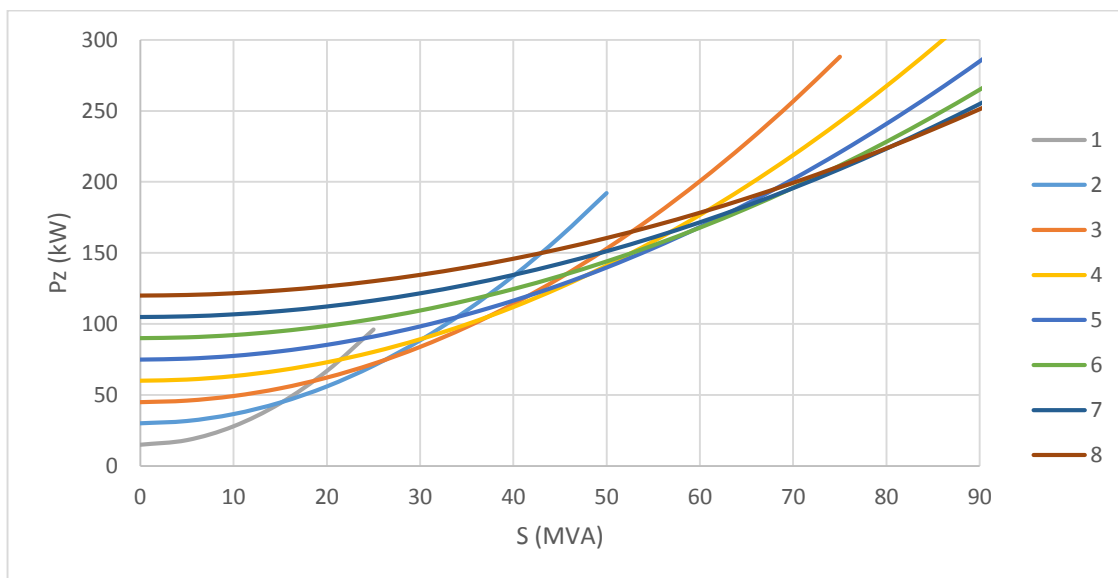
N_{zr} jsou roční náklady na ztráty,

N_{psc} jsou celkové stálé provozní náklady.

Po výpočtech výrobních nákladů vychází nejlépe varianta používání transformátorů o jmenovitém výkonu 63 MVA a to tak, že na začátku nainstalujeme dva, potom po 27 let třetí transformátor, přitom transformátory provozujeme paralelně, aby ztráty byly co nejmenší. V předchozí kapitole, kde v optimalizaci bylo zahrnuto maximální zatížení již na začátku, a s možností odložení investice by se nepočítalo, optimální počet transformátorů pro TR Chodov vycházel na tři transformátory o jmenovitém výkonu 40 MVA. Z tohoto důvodu můžeme konstatovat, že i malá změna v pohledu na daný problém může způsobit značné odlišnosti v dosažených výsledcích. Podle mého názoru, bez ještě hlubší analýzy se nemůžeme jednoznačně vyjádřit, který ze dvou uvedených postupů je lepší, protože obě úvahy zahrnují určité zjednodušení a mají různá rizika.

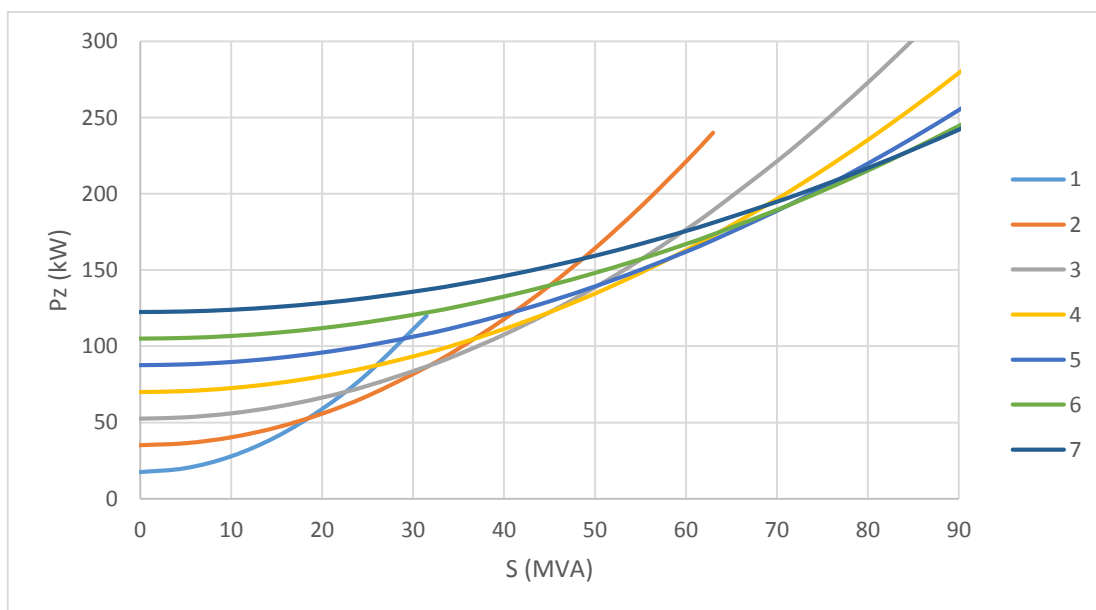
U každého z následujících diagramů (obrazy 23 až 27) je průběh ztrát na zatížení při paralelním provozu daného počtu transformátorů potřebné na pokrytí zatížení v TR Chodov.

Na následujícím diagramu je vidět průběh ztrát na zatížení transformátorů ETD při paralelním chodu, transformátory o jmenovitém výkonu 25 MVA.



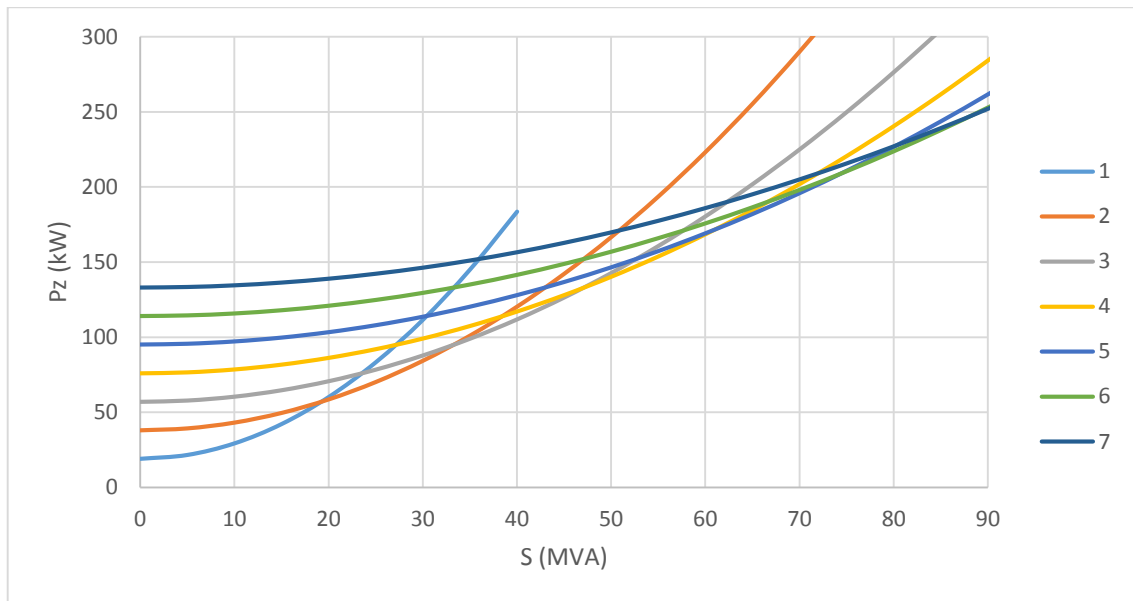
Obraz 23: Průběh ztrát na zatížení

Na následujícím diagramu je vidět průběh ztrát na zatížení transformátorů ETD při paralelním chodu, transformátory o jmenovitém výkonu 31,5 MVA.



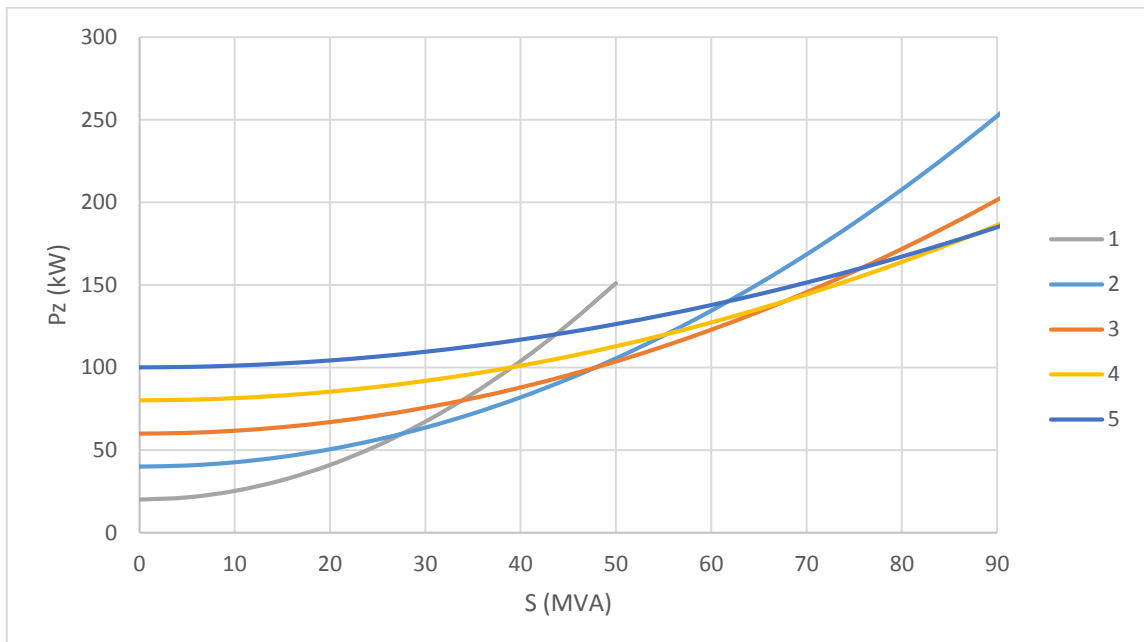
Obraz 24: Průběh ztrát na zatížení

Na následujícím diagramu je vidět průběh ztrát na zatížení transformátorů ETD při paralelním chodu, transformátory o jmenovitém výkonu 40 MVA.



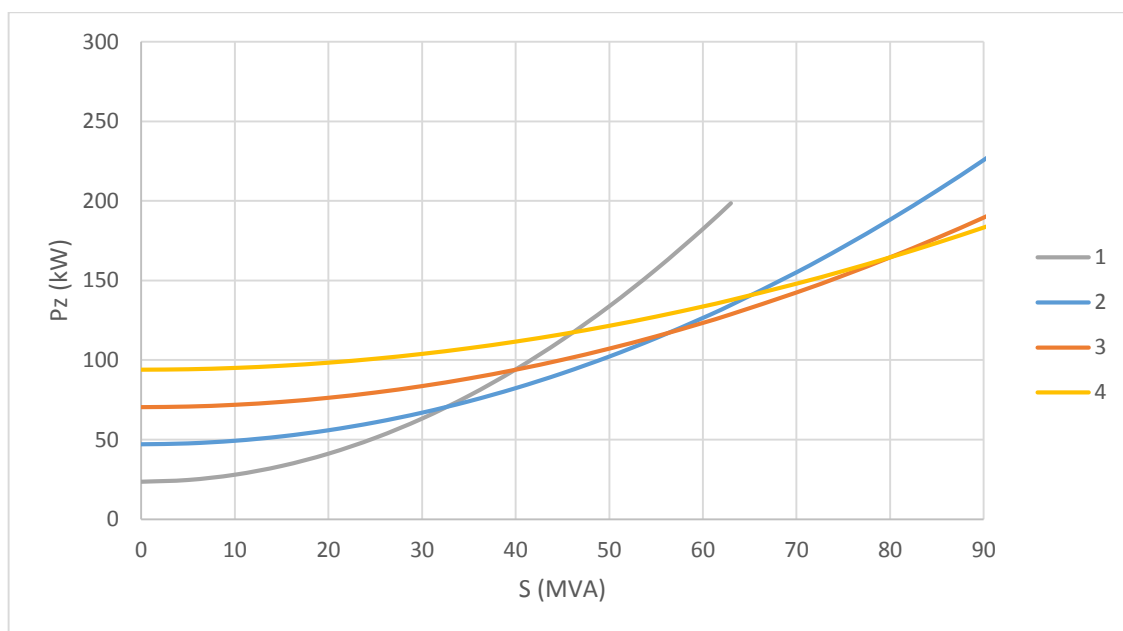
Obraz 25: Průběh ztrát na zatížení

Na následujícím diagramu je vidět průběh ztrát na zatížení transformátorů ETD při paralelním chodu, transformátory o jmenovitém výkonu 50 MVA.



Obraz 26: Průběh ztrát na zatížení

Na následujícím diagramu je vidět průběh ztrát na zatížení transformátorů ETD při paralelním chodu, transformátory o jmenovitém výkonu 63 MVA.



Obraz 27: Průběh ztrát na zatížení

Závěr

Transformátory jsou velice účinné stroje, v této práci však bylo poukázáno na fakt, že s plánováním hospodárneho provozu se dá vylepšit i jejich provoz.

Po teoretickém úvodu do problematiky distribučních transformátorů, jejich konstrukční řešení, ztrát, a legislativních změn, které působí na jejich design, nejprve byl analyzován současný stav transformátorů 110/22 kV na území PREDi. Rozborem jejich zatížení a ztrát se ukázalo, že stávající stav je velice dobrý z hlediska pokrytí potřeby zatížení, avšak je možné, že jsou poněkud předimenzované a je větší rezerva v systému, než by bylo potřeba.

Na základě odhadu průměrných ročních výrobních nákladů na následující rok je možné posoudit, zda stojí v úvahu nechat starší distribuční transformátor na místě, alespoň jeden rok, nebo bude lepší nahradit jej novým, účinnějším a spolehlivějším modelem již nyní. Nařízení č. 548/2014 Evropské komise stanoví požadavky na ekodesign pro střední a velké výkonové transformátory, aby na trh více pronikly technologie a konstrukční varianty zlepšující jejich energetickou účinnost. Otázkou je především to, jestli energetická účinnost může být zlepšena dostatečně ke snížení nákladů během životního cyklu transformátorů. Následně se to výpočtem potvrdilo, u všech osmnácti stávajících transformátorů starších než 25 let, že by bylo výhodné vyměnit za nový transformátor nyní, než nechat starší transformátory běžet ještě další jeden rok. Šest z osmnácti transformátorů je už téměř na konci fyzické životnosti 40 let, takže u nich výměna je nutná. Jak lze očekávat, z ostatních transformátorů největší úspory jsou u těch, které měly největší zatížení, to znamená, že úspory na ztráty elektrické energie by byly větší.

Další výpočet, minimalizace celkových výrobních nákladů za ekonomickou životnost transformátorů při zahrnutí odhadnutého vývoje zatížení, se ukázal právě tak, jak velké transformátory by bylo nejvýhodnější nainstalovat na začátku zkoumaného období do šesti vybraných transformoven. Navrhnutý model by byl použitelný i pro optimalizaci velikosti transformátorů u ostatních, v této práci nezkoumaných transformoven. Optimální počet a velikost transformátorů nelze určit obecně, protože výpočet hodně záleží na různých faktorech: na konkrétní parametry daných transformátorů, na velikosti maximálního zatížení, na průběhu a vývoji zatížení dané oblasti, na způsobu provozu, atd. Proto je třeba odlišnosti jednotlivých parametrů zahrnout do výpočtu již na začátku. Podle výpočtu vychází následující počet a jmenovitý výkon transformátorů pro zkoumané transformovny.

S_n [MVA]	25	31,5	40	50	63
Název TR	Počet doporučených transformátorů [kus]				
Běchovice					2
Holešovice				4	
Chodov			3		
Pražáčka					3
Sever				2	
Východ	2				

V tomto modelu je vývoj zatížení zahrnut jenom v tom smyslu, aby projektovaný počet transformátorů vyhověl odhadnutému maximálnímu zatížení na konci zkoumaného období, již od začátku. Proto byl v další části rozšířen a trošku zmodifikován tento výpočet optimalizace velikosti a počtu transformátorů, o respektování možnosti paralelního chodu transformátorů a o připojení potřebného počtu transformátoru následně v budoucnosti. Na příkladu TR Chodov bylo rozvinuté toto hledisko. Použití paralelního chodu transformátorů je však v praxi dost nepravděpodobné, ale z hlediska ztrát je paralelní provoz stejný jako rozdělení jedné napájené oblasti na více (podle počtu transformátorů) s rovnoměrným rozdělením výkonu (transformátory stejně zatížená). Při tomto postupu vychází na nejmenší výrobní náklady transformátorů o jmenovitém výkonu 63 MVA a to tak, že na začátku nainstalujeme dva, potom po 27 letech třetí transformátor. Tento výsledek je zcela odlišný od výsledků prvního výpočtu, kdy pro TR Chodov měly nejmenší výrobní náklady tři transformátory o jmenovitém výkonu 40 MVA. Porovnání rozdílů a výsledků z těchto dvou hledisek bylo naznačeno, že další rozšíření problematiky dá jiný výsledek. Například u prvního, když na začátku nainstalujeme potřebné transformátory na pokrytí odhadnutého maximálního zatížení na konci období, potom až do konce životnosti nemusíme manipulovat s transformátorem, ale máme menší možnosti reagovat na předem neočekávané změny. U druhého hlediska je možné, že když zatížení neporoste tak vysoko, tak ani nemusíme na zkoumané území dát další transformátor, ale potom je možné, že od začátku by stačily i méně výkonné transformátory s menšími výrobními náklady. Proto je třeba určit dopředu, které předpoklady zvažujeme za nejdůležitější při výpočtu pro výběr konečné varianty.

Použitá literatura

- [1] Toman, P., Drápela, J., Mišák, S., Orságová, J., Paar, M., Topolánek, D. a kol. *Provoz distribučních soustav*. Praha: České vysoké učení technické. 2011. ISBN 978-80-01-04935-8
- [2] *Roční zpráva o provozu ES ČR 2013*. [online]. Oddělení statistiky a sledování kvality ERÚ. Praha: 2014. Dostupné z: <http://www.eru.cz/cs/elektrina/statistika-a-sledovani-kvality/rocni-zpravy-o-provozu>
- [3] *Skupina PRE*. [online]. © 2014 Pražská energetika, a.s. Praha. [cit. 27. 11. 2014]. Dostupné z: <https://www.pre.cz/cs/profil-spolecnosti/o-nas/skupina-pre/>
- [4] *O společnosti, Kdo jsme*. [online]. Pražská energetika, a.s. [2008]. Dostupné z: <https://www.predistribuce.cz/distribuce/o-spolecnosti.html>
- [5] *Životní prostředí, Politika ochrany životního prostředí společností Skupiny PRE*. [online]. Pražská energetika, a.s. Praha. [únor 2011]. Dostupné z: <https://www.predistribuce.cz/distribuce/o-spolecnosti/vice-o-predistribuce/zivotni-prostredi.html>
- [6] *Polohopisné schéma vedení 110 kV*. [online]. © 2014 Pražská energetika, a.s. Praha. [cit. 28. 2. 2015]. Dostupné z: <https://www.predistribuce.cz/distribuce/distribucni-sit/technicke-informace/polohopisne-schema-vedeni-110-kv.html>
- [7] Voženílek, P., Novotný, V., Mindl, P. *Elektromechanické měniče*. 2. vyd. Praha: České vysoké učení technické. 2011. ISBN 978-80-01-04875-7
- [8] Orságová, J. *Elektrické stanice a vedení*. Brno: Vysoké učení technické. 2006.
- [9] Transformovna Chodov. Na: *Eltodo, a.s.* [online]. © 2008 Eltodo, a.s. [cit. 10. 10. 2014]. Dostupné z: <http://www.eltodo.cz/informacni-servis/fotogalerie/fotogalerie-energetika.html#>
- [10] Vítek, M. *Ekonomika dopravních energetických systémů*. 2. vyd. Praha: České vysoké učení technické. 2008. ISBN 978-80-01-04181-9
- [11] Evropská komise. Nařízení komise (EU) č. 548/2014. *Úřední věstník Evropské unie L 152/2014*. Svazek 57. 22. května 2014. Str. 1. – 15. ISSN 1977-0626
- [12] *Ekodesign transformátorů*. [online]. Elpro – Energo, s.r.o. [2014]. Dostupné z: <http://www.elpro-energo.cz/>
- [13] Remtová, K. *Výkladový slovník základních pojmů z oblasti udržitelného rozvoje*. 1. vyd. Praha: Ministerstvo životního prostředí ČR. 2009. ISBN 978-80-7212-506-7
- [14] *LOT 2: Distribution and power transformers, Tasks 1-7, Final report*. [online] © VITO. BIO IS. [vyd. leden 2011]. [cit. 28. 2. 2015]. Dostupné z: http://www.eceee.org/ecodesign/products/distribution_power_transformers/Final_report_Feb2011

- [15] Waide, P. Scholand, M. *The potential for global energy savings from high-efficiency distribution transformers. Beta version of final report.* [online] © Waide Strategic Efficiency Limited and N14 Energy Limited. [2014]. [cit. 28. 2. 2015]. Dostupné z: http://www.leonardo-energy.org/sites/leonardo-energy/files/documents-and-links/prophet_ii_final_report_beta_version.pdf
- [16] Pešta, J., Zwiener, V. *Hlukové limity, měření hluku a hlukové studie.* Na: atelier-dek.cz [online]. © 2014. DEK, a.s. [vyd. 2012]. [cit. 23. 11. 2014]. Dostupné z: <http://atelier-dek.cz/hlukove-limity-mereni-hluku-hlukove-studie-194>
- [17] PNE 38 1755, třetí vydání. 2005: *Venkovní zařízení elektrických stanic vvn a zvn – opatření proti hluku.* Praha: 1. 12. 2005.
- [18] PNE 38 1753, třetí vydání. 2005: *Vnitřní stanoviště transformátorů – opatření proti hluku.* Praha: 1. 12. 2005.
- [19] Haluza, M., Macháček, J. *Spotřeba elektrické energie domácností, predikce a potenciální úspory pomocí BACS.* [online]. © Topinfo, s.r.o. 2001-2015. [vyd. 7. 5. 2012]. [cit. 28. 2. 2015]. Dostupné z: <http://elektro.tzb-info.cz/8570-spotreba-elektricke-energie-domacnosti-predikce-a-potencialni-uspory-pomoci-bacspomoci-bacs>
- [20] *Predikce očekávaného dlouhodobého vývoje spotřeby elektřiny ČR.* [online]. © OTE, a. s. 2010. [vyd. 2014]. [cit. 28. 2. 2015]. Dostupné z: http://www.ote-cr.cz/o-spolecnosti/Zpravy_OTE/predikce-ocekavaneho-dlouhodobeho-vyvoje-spotreby-elektřiny-cr
- [21] De Wachter, B. *Application Note Transformer Replacement.* [online] © European Copper Institute. [vyd. listopad 2013]. [cit. 9. 3. 2015]. Dostupné z: http://www.leonardo-energy.org/sites/leonardo-energy/files/documents-and-links/Cu0185%20AN%20Transformer%20Replacement_v1.pdf
- [22] Podnikové materiály, Plzeň: ETD Transformátory, a.s., 2015
- [23] Podnikové materiály, Praha: PREDistribuce, a.s., 2015

Seznam obrázků

1)	Schéma elektrizační soustavy	11
2)	Dělení DS podle topologie	12
3)	ES ČR Distribuce	14
4)	Logo PRE	14
5)	Skupina PRE	15
6)	Schéma sítě 110 kV v Praze	16
7)	Úplné náhradní schéma transformátoru	17
8)	Fázorový diagram transformátoru při zatížení	18
9)	Transformovna Chodov	18
10)	Závislost ztrát na zatížení (proud)	23
11)	Rozvodna Smíchov	26
12)	Transformátor SGB 110/23 kV, 40 MVA	27
13)	Příklad chráněných prostorů	32
14)	Diagram zatížení transformátorů 110/22 kV za rok 2014	36
15)	Vývoj spotřeby elektrické energie v Praze	37
16)	Maximální zatížení distribuční sítě měsíčně (2011-2014)	38
17)	Maximální zatížení distribuční sítě	39
18)	Diagram spotřeby energie TR Běchovice	40
19)	Diagram spotřeby energie TR Střed	41
20)	Diagram spotřeby energie TR Chodov	41
21)	Typická funkce míry selhání distribučních transformátorů	45
22)	Odhad vývoje maximální zatížení TR Chodov	57
23)	Průběh ztrát na zatížení	59
24)	Průběh ztrát na zatížení	59
25)	Průběh ztrát na zatížení	60
26)	Průběh ztrát na zatížení	60
27)	Průběh ztrát na zatížení	61

Seznam tabulek

1)	Minimální index špičkové účinnosti	29
2)	Minimální index špičkové účinnosti	29
3)	Hygienický limity hluku	33
4)	Ukazatele z diagramu zatížení	37
5)	Maximální zatížení sítě	39
6)	Využití instalovaného výkonu transformátorů vvn/vn – PREDi	42
7)	Vypočtené hodnoty pro transformátorů starších než 25 let	43
8)	Technické parametry nových transformátorů	47
9)	Investiční náklady nových transformátorů	47
10)	Vypočtené hodnoty pro staré a nové transformátory	50
11)	Maximální a předpokládaný maximální zatížení zkoumaných TR	53
12)	Minimální počet možných nainstalovaných transformátorů při odhadnutém maximálním zatížení	53
13)	Optimální počet možných nainstalovaných transformátorů	54
14)	Maximální zatížení z hlediska spolehlivosti	55
15)	Optimální počet a výkon transformátorů	55
16)	Minimální počet možných nainstalovaných transformátorů na začátku zkoumaného období	56
17)	Konkrétní hodnoty přechodových výkonů transformátorů ETD	57

Seznam příloh

- 1) Výpočet velikosti účiničku
- 2) CD médium

Přílohy

1) Výpočet velikosti účinníku

$$\text{Činný výkon:} \quad P = U \cdot I \cdot \cos \varphi \quad [\text{W}]$$

$$\text{Jalový výkon:} \quad Q = U \cdot I \cdot \sin \varphi \quad [\text{var}]$$

$$\text{Zdánlivý výkon:} \quad S = U \cdot I \quad [\text{VA}]$$

$$\text{Účinník:} \quad \cos \varphi = \cos \left(\tan^{-1} \frac{P}{Q} \right) \quad [-]$$

Velikost účinníku je vypočtena z dat měření PREdi pro P a Q za den 15. 1. 2014. Její velikost byla v určitém rozmezí, avšak po vypočtení více hodnot je možné konstatovat to, že její rozdíl od jedné nebyl tak výrazný a když používám při výpočtech hodnotu $\cos \varphi = 1$, tak se nedopustím velké chyby.

2) CD médium