

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ
KATEDRA EKONOMIKY, MANAŽERSTVÍ A HUMANITNÍCH VĚD
Obor elektrotechnika a management



Diplomová práce

Ekonomika provozu a výměny transformátorů

Praha, 2016

Jakub Hron

České vysoké učení technické v Praze
Fakulta elektrotechnická

Katedra ekonomiky, manažerství a humanitních věd

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Student: Hron Jakub

Studijní program: Elektrotechnika, energetika a management
Obor: Ekonomika a řízení energetiky

Název tématu: Ekonomika provozu a výměny transformátorů

Pokyny pro vypracování:

1. Popište technické parametry stávajících transformátorů 110/22 kV
2. Pravidla pro ekodesign
3. Ekonomické hodnocení a optimalizace provozu (vhodnost použití více transformátorů o nižším výkonu resp. jejich vypínání)
4. Výpočet ekonomické výhodnosti variant výměny transformátorů před ukončením životnosti

Seznam odborné literatury:

Směrnice 2009/125/ES - nařízení č. 548/2014 pro navrhování s ohledem na ochranu životního prostředí
P.Toman, J.Drápela, S.Mišák, J.Orságová, M.Paar, D.Topolánek a kol., Provoz distribučních soustav, Praha 2011

Vedoucí diplomové práce: Doc.Ing. Jiří Vašíček, CSc. – ČVUT FEL, K 13116

Platnost zadání: do konce letního semestru akademického roku 2016/2017

L.S.

Prof.Ing. Jaroslav Knápek, CSc.
vedoucí katedry

Prof.Ing. Pavel Ripka, CSc.
děkan

V Praze dne 11.2.2016

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

.....

Podpis

Poděkování

Děkuji vedoucímu diplomové práce doc. Ing. Jiřímu Vašíčkovi, CSc. za odborné rady, připomínky a metodické vedení práce. Mé poděkování patří též panu Ing. Davidu Růžkovi za věcné připomínky a spolupráci při získávání potřebných údajů.

Anotační list

Jméno autora: Jakub Hron
Název diplomové práce: Ekonomika provozu a výměny transformátorů
Anglický název: Operating and Replacement Cost of Transformers
Akademický rok: 2015/2016
Obor studia: Obor řízení energetiky a management
Katedra: Katedra ekonomiky, manažerství a humanitních věd

Vedoucí diplomové práce: doc. Ing. Jiří Vašíček, CSc.

Bibliografické údaje: Počet stran: 78

Klíčová slova: transformátor, výměna, ztráty
Keywords: transformer, replacement, losses

Anotace:

Diplomová práce se zabývá parametry pro návrh transformátoru, principem činnosti transformátoru a vysvětluje jeho optimální zatížení. Výstupem práce je jednak optimální velikost a počet paralelně pracujících transformátorů pro jednotlivé transformovny a jednak ekonomika výměny transformátoru před ukončením životnosti.

Annotation:

This diploma thesis looks into transformer design parameters, the principle of transformer activity and describes its optimal workload. The output of the work is to determine the optimal size and number of parallel transformers for each substation, as well as the economy of replacing the transformer before the end of its service life.

Seznam obrázků	8
1. Úvod	9
2. Elektrizací soustava	10
2.1. Přenosová soustava.....	11
2.2. Distribuční soustava	12
2.3. Skupina PRE	13
3. Transformátor	16
3.1. Definice a použití transformátoru	16
3.2. Princip transformátoru.....	16
3.3. Skutečný transformátor	17
3.4. Napěťové rovnice	17
3.5. Převod transformátoru.....	18
3.6. Spojování vinutí	18
3.7. Paralelní chod transformátorů	19
4. Konstrukce transformátorů.....	19
4.1. Magnetický obvod	20
4.2. Vinutí	21
5. Stanoviště transformátoru	23
5.1. Ukázka venkovního stanoviště	25
6. Ochrany	25
6.1. Plynové relé	26
6.2. Zemní kostrová ochrana.....	27
6.3. Rozdílová ochrana	27
6.4. Proudová zkratová ochrana.....	27
6.5. Distanční ochrana	28
6.6. Ochrana při přetížení.....	28
7. Opatření proti hluku.....	28
Korekce pro stanovení hygienických limitů hluku	31
8. Požadavky Evropské unie na transformátory.....	33
9. Rozbor zatížení	38
9.1. Rozbor současného zatížení	38
9.2. Rozbor budoucího zatížení	40
10. Hospodárnost transformátorů	42
10.1. Ztráty naprázdno (v železe)	42
10.2. Ztráty nakrátko (v mědi).....	42
10.3. Celkové ztráty transformátoru	43
10.4. Hospodárné zatížení transformátoru	46
10.5. Hospodárné zatížení paralelně pracujících skupiny transformátorů	48
11. Investiční náklady	50
11.1. Stanoviště	50
12. Provozní náklady	51
12.1. Práce údržby - těsnost a čistota	51
12.2. Údržba a zkouška kontrolních zařízení	51
12.3. Údržba / Zkouška chladících zařízení.....	51
13. Ekonomika návrhu optimální velikosti transformátoru	52

13.1.	Náklady s konstantním maximálním zatížením	52
13.1.1.	Určení doby plných ztrát	53
13.2.	Náklady s konstantním přírůstkem maximálního zatížení	53
13.3.	Cena pro krytí ztrát v ES	54
13.4.	Optimální velikost a počet transformátorů pro jednotlivé transformovny	56
13.5.	Výpočet.....	58
13.6.	Výsledek optimalizace	59
13.7.	Porovnání výsledků	60
14.	Ekonomika výměny transformátoru.....	61
14.1.	Systémová metoda	65
14.2.	Pohled PREDistribuce a.s.	68
14.3.	Transformátor 40 MVA z hlediska PREDi.....	71
14.4.	Transformátor 63 MVA z hlediska PREDi.....	74
15.	Závěr	77
16.	Literatura	78

Seznam obrázků

Obr. 1 – Elektrizční soustava [5]	10
Obr. 2 – Přenosová soustava [14].....	11
Obr. 3 – Distribuční soustava	12
Obr. 4 – Počet poruch VVN a VN společnosti PREdi [19]	14
Obr. 5 – Skutečný jednofázový transformátor [4]	17
Obr. 6 – Skládání plechů transformátoru [7].....	20
Obr. 7 – Uspořádání válcového vinutí [7]	21
Obr. 8 – Ukázka olejového transformátoru ETD 50 MVA [Zdroj: konzultace u distributora]	22
Obr. 9 – Transformační stanice 110/22kV Písek-Čížovská	25
Obr. 10 – Plynové (Buchholzovo) relé [2].....	26
Obr. 11 – Zemní kostrová ochrana [2].....	27
Obr. 12 - Reflexní tlumič hluku magnetostrikce [16].....	28
Obr. 13 - Reflexní tlumič v řezu [16].....	29
Obr. 14 Počet transformátorů splňující nařízení č. 548/2014 společnosti PREdi.....	37
Obr. 15 – Roční vývoj spotřeby elektřiny v Praze [18].....	38
Obr. 16 – Zařízení PREdistribuce, a.s. [18]	39
Obr. 17 – Proteklá energie TR Střed.....	39
Obr. 18 – Proteklá energie TR Sever	40
Obr. 19 – Počet nabíjecích stanic [19]	40
Obr. 20 – Spotřeba elektřiny v Praze [18]	41
Obr. 21 – Průběhy celkových ztrát.....	45
Obr. 22 – Průběhy celkových ztrát při zanedbání jalových ztrát	45
Obr. 23 – Průběhy měrných ztrát v transformátoru	47
Obr. 24 – Přejímové výkony transformátorů	49
Obr. 25 – Vývoj ceny elektřiny za poslední roky [21]	54
Obr. 26 – Vývoj ceny elektřiny za poslední měsíce 2016 [21]	54
Obr. 27 – Odhad ceny na krytí ztrát pro rok 2017	55
Obr. 28 – Kumulované DCF pro 40 MVA	72
Obr. 29 – Tornádo diagram – vliv změna parametrů na NPV.....	72
Obr. 30 – Citlivostní analýza na změnu WACC.....	73
Obr. 31 – Citlivostní analýza na změnu ceny na ztráty.....	73
Obr. 32 – Citlivostní analýza na změnu kupní ceny transformátoru	74
Obr. 33 – Kumulované DCF pro 63 MVA	75
Obr. 34 – Kumulované DCF pro 63 MVA	75
Obr. 35 – Citlivostní analýza na změnu WACC.....	76
Obr. 36 – Citlivostní analýza na změnu zatížení v 1. roce	76

1. Úvod

V práci se zabývám problematikou ekonomického provozu transformátorů, kde výstupem práce je optimalizace počtu paralelně instalovaných transformátorů o optimální velikosti pro dané transformační stanice společnosti PREdistribuce a.s. a jednak ekonomické zhodnocení předčasné výměny transformátoru před koncem životnosti.

Začátek práce se zabývá teoretickým rozbohem funkce transformátoru, jeho parametry a konstrukcí. Zaměřil jsem se i na hlučnost spojenou s provozem transformátoru a předpis Evropské unie pro snižování ztrát.

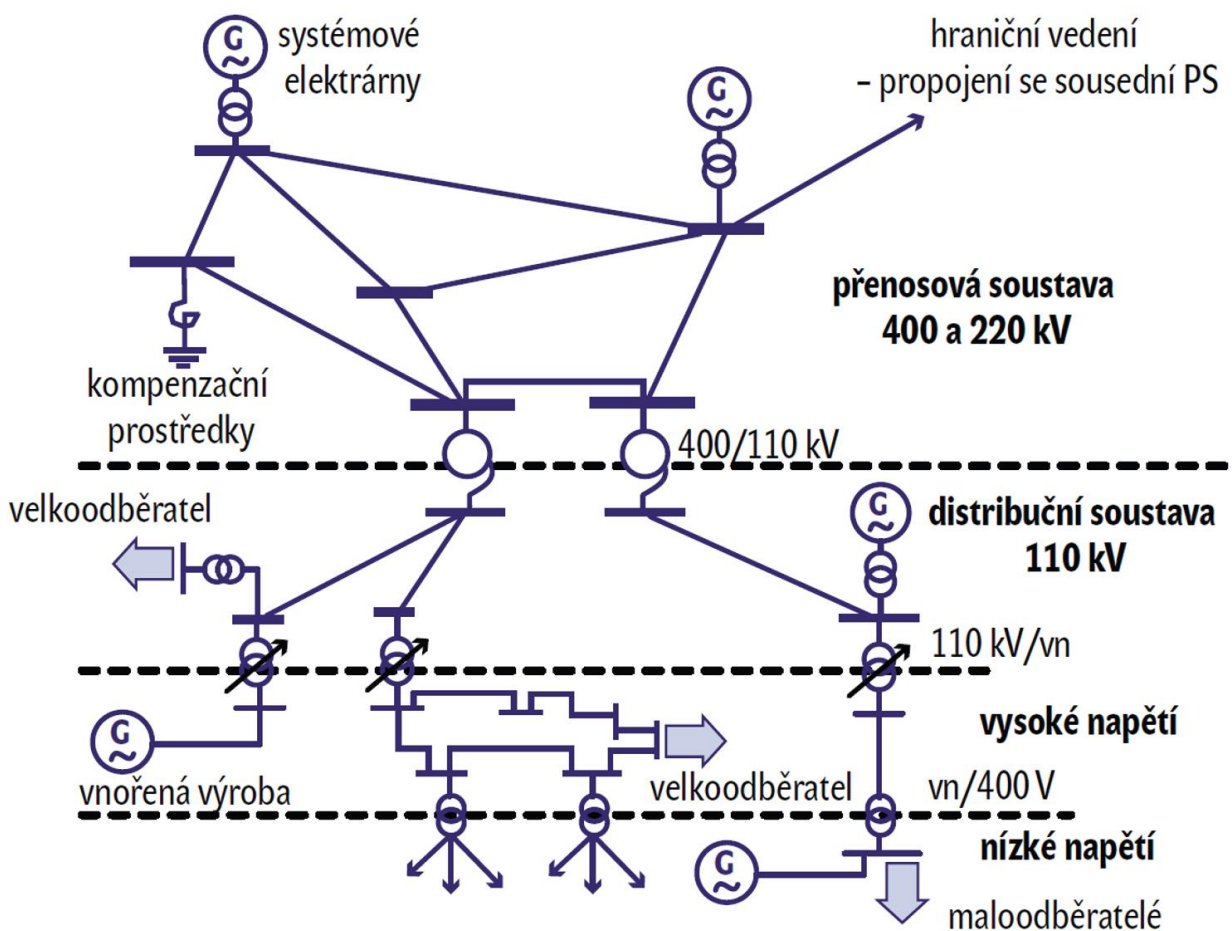
Další část je věnována hospodárnosti transformátoru, kde popisují, jaké ztráty vznikají a jakým způsobem lze docílit jejich snížení při paralelním chodu, tedy při jakém výkonu je vhodné připojit, resp. odpojit další paralelně pracující transformátor.

V ekonomické části stanovuji náklady spojené s instalací a provozem transformátoru. S pomocí kritéria minimálních výrobních nákladů jsem stanovil optimální velikost transformátorů a počet paralelně instalovaných transformátorů pro dané transformační stanice.

V poslední části práce jsem se zaměřil na již účetně odepsané transformátory společnosti PREdistribuce a.s., které připadají v úvahu pro předčasnou výměnu a pomocí systémové metody a metody z pohledu regulované společnosti, jakou je společnost PREdi, jsem stanovil ekonomické zhodnocení předčasné výměny pomocí kritéria čisté současné hodnoty.

2. Elektrizační soustava

Elektrizační soustava je jednotný propojený energetický systém zajišťující výrobu, přenos, transformaci a distribuci elektřiny. Základní uspořádání elektrizační soustavy je zobrazeno na Obr. 1. Elektrizační soustava je rozdělena na přenosovou soustavu (PS) a transformační vazbou na napětí 110kV se dostaneme na soustavu distribuční (DS), která zajišťuje rozvod elektrické energie koncovým uživatelům.



Obr. 1 – Elektrizační soustava [5]

2.1. Přenosová soustava

V České republice působí jako výhradní provozovatel elektroenergetické přenosové soustavy společnost ČEPS, a.s. na základě výlučné licence na přenos elektřiny, která byla udělena Energetickým regulačním úřadem podle energetického zákona (zákon č. 458/2000 Sb. ve znění pozdějších předpisů). ČEPS, a.s. spolupracuje s ostatními provozovateli v rámci propojených přenosových soustav v Evropě (ENTSO-E), jediným akcionářem je stát ČR, správu jeho majetku vykonává MPO ČR.

ČEPS, a.s. zajišťuje přenos elektřiny od výrobce do místa odběru v rámci přenosové soustavy, dispečersky zajišťuje rovnováhu mezi výrobou a spotřebou a zajišťuje podpůrné služby (vyrovnání výkonové nerovnováhy).

Přenosová soustava tedy propojuje výrobce elektrické energie k velkým rozvodnám a spojuje nás do soustav zahraničních států. V předacích bodech se napětí transformuje na distribučních 110kV.

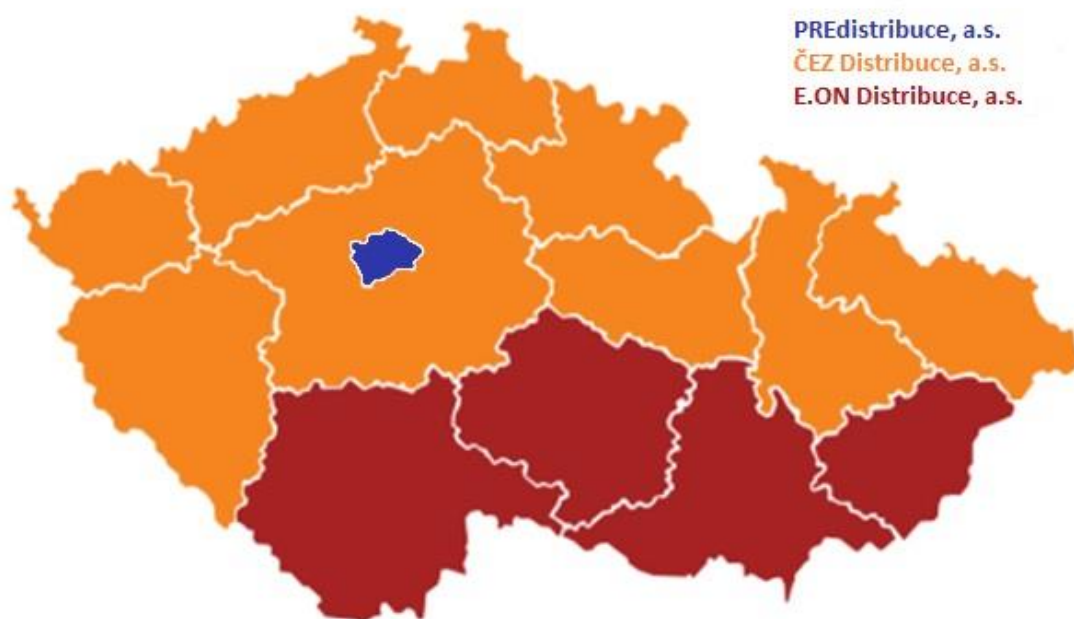


Obr. 2 – Přenosová soustava [14]

2.2. Distribuční soustava

Distribuční soustava rozvádí elektrickou energii z přenosové soustavy, ale připojuje k síti i elektrárny malých výkonů (až desítky MW). Využitím distribučních transformátorů jsme schopni snížit napěťovou hladinu pro potřeby koncového zákazníka.

Jedná se o soubor vedení 110 kV, která se transformují na 22 kV resp. 35 kV (používané ve východních Čechách a částečně v severních Čechách) a pro maloodběratele na 400/230V.



Obr. 3 – Distribuční soustava

Z Obr. 3 je patrné, že na českém trhu působí tři distribuční společnosti. Provozovatelem distribuční soustavy v České republice jsou podle územního rozdělení společnosti:

1. ČEZ Distribuce, a.s. - působící ve středních, západních, severních, východních Čechách a na severní Moravě
2. PREDistribuce, a.s. - působící na území hlavního města Prahy a v Roztokách u Prahy
3. E.ON Distribuce, a.s. - působící v jižních Čechách a na Moravě

Poplatky za distribuci elektřiny reguluje energetický regulační úřad (ERÚ). Ceny jsou regulovány z důvodu, že v dané oblasti neexistuje konkurence (jeden distributor působí na konkrétním území). ERÚ určuje ceny za distribuci formou cenových rozhodnutí.

ČEZ Distribuce, a.s. je největším distributorem elektřiny v České republice, jedná se dceřinou společností energetické firmy ČEZ, a.s.

	2015
Počet transformačních stanic vn/nn	58 259
Z toho: vlastní	45 412
cizí	12 847
Počet transformačních stanic vvn/vn	239

Tab. 1 Počet transformačních stanic společnosti ČEZ Distribuce, a.s. [12]

E.ON Distribuce, a.s. je dceřinou společností E.ON Czech Holding Verwaltungs-GmbH (100% podíl). Společnost E.ON Czech Holding Verwaltungs-GmbH je dceřinou společností E.ON Czech Holding AG (podíl 99.999%) a společností E.ON Energie AG (podíl 0,001%).

Společnost E.ON Czech Holding AG je dceřinou společností E.ON Energie AG (100% podíl). E.ON Energie AG je osoba ovládající společnost E.ON Distribuce, a. s.

Transformovny VVN/VN	78 ks
Instalovaný výkon transformace VVN/VN	4 575 MVA
Počet transformátorů VVN/VN	145 ks

Tab. 2 Transformovny společnosti E.ON Distribuce, a. s.

2.3. Skupina PRE

V práci se zabývám transformátory VVN/VN právě společnosti PREdistribuce, a.s. a proto skupině PRE věnuji širší pozornost.

Skupina PRE je třetím největším dodavatelem elektrické energie v České republice, v roce 2014 distribuovala cca 6,1 TWh elektřiny. K hlavním činnostem patří prodej a obchodování v oblasti elektřiny a plynu, distribuce elektřiny, výroba elektrické energie z obnovitelných zdrojů a poskytování doplňkových služeb.

Skupinu PRE tvoří mateřská společnost Pražská energetika, a.s., která je držitelem licence pro obchod s elektřinou a plynem. Mezi dceřiné společnosti patří:

PREdistribuce, a. s., jenž je vlastníkem a provozovatelem distribuční soustavy v hlavním městě Praze a městě Rožtoky. PREdistribuce, a. s. obdržela od ERÚ licenci na distribuci elektřiny.

PRE měření, a.s., zajišťující montáže a odečty elektroměrů, energetické služby, servisní produkty a výrobu elektřiny z obnovitelných zdrojů. Je držitelem licence na výrobu elektřiny.

100% dceřiné společnosti od 1.12.2004

PRE FVE Dačice, s.r.o. výroba elektřiny, pronájem nemovitostí, bytů a nebytových prostor.

PRE FVE Mikulov, s.r.o. výroba elektřiny, pronájem nemovitostí, bytů a nebytových prostor.

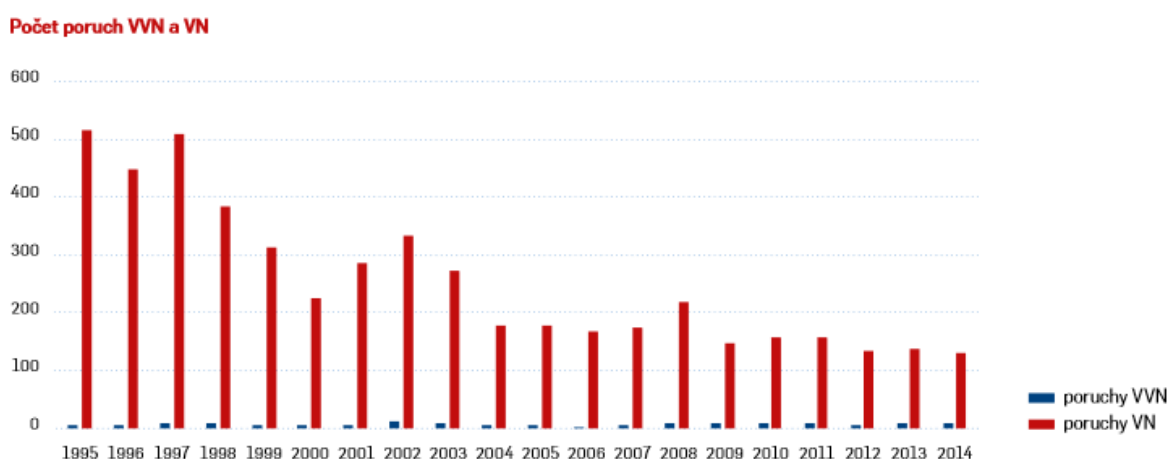
eYello CZ, k. s., prodej elektřiny a plynu převážně domácnostem a podnikatelům. Je držitelem licence na obchod s elektřinou a plynem.

PREdistribuce, a. s., představuje nejvýznamnější dceřinou společnost Skupiny PRE.

Hospodářský výsledek PREdi po zdanění činil v roce 2014 1 093 mil. Kč. Na úrovni EBITDA společnost docílila výsledku 2 804 mil. Kč.

Společnost PREdi investovala v roce 2014 do distribuční soustavy celkem 1 431 mil. Kč.

Objem prostředků investovaných do rozvodné sítě se odráží ve vysoké spolehlivosti a kvalitě dodávek elektřiny. Síť PREdi patří z pohledu kvality a bezpečnosti dodávek ke špičce mezi evropskými velkoměsty, nedochází k žádným systémovým poruchám ani k významným výpadkům dodávky elektřiny, které by měly svůj původ v síti PREdi. Provozní výsledky celé distribuční sítě potvrzují trend snižování poruchovosti.



Obr. 4 - Počet poruch VVN a VN společnosti PREdi [19]

PREdistribuce, a. s. tvoří distribuční oblast, jenž je specifická velkou koncentrací obyvatelstva a průmyslu s vysokými nároky na spolehlivost a kvalitu.

NÁZEV TR VVN / VN	INSTALOVANÝ VÝKON [MVA]	MAXIMUM ZATÍŽENÍ TR [MW]	VYUŽITÍ TRANSFORMACE [%]
BĚCHOVICE	120	44,0	38,60
ČERNÝ MOST	80	41,0	53,95
ČERVENÝ VRCH	80	47,0	61,84
HOLEŠOVICE	252	105,0	43,86
CHODOV	143	65,0	47,85
JIH	189	110,0	61,26
JINONICE	143	64,0	47,11
KARLOV	126	40,0	33,42
LETŇANY	80	38,0	50,00
LHOTKA	120	66,0	57,89
MALEŠICE	120	54,0	47,37
MĚCHOLUPY	80	51,0	67,11
PANKRÁC	126	49,0	40,94
PRAŽAČKA	189	114,0	63,49
SEVER	80	34,0	44,74
SMÍCHOV	126	51,0	42,61
STŘED	252	130,0	54,30
TŘEBORADICE *	80	17,0	22,37
VÝCHOD	80	6	7,89
ZÁPAD	189	79,0	44,00
ZBRASLAV	80	36,0	47,37
ZLIČÍN	80	34,0	44,74

Tab. 3 Transformační stanice společnosti PREdistribuce

3. Transformátor

3.1. Definice a použití transformátoru

Transformátor je elektrický netočivý stroj, který pomocí elektromagnetické indukce mění střídavé napětí při nezměněné frekvenci.

Transformátory mají zásadní význam v elektroenergetické soustavě, kde se využívají pro účely přenosu a distribuce elektrické energie za ekonomicky výhodnějších podmínek. Pomocí transformátoru zvýšíme elektrické napětí a tím při zachování stejného výkonu zmenšíme elektrický proud, který způsobí menší Joulovy ztráty ve vedení. U spotřebitelů je naopak nutné pro potřeby rozvodu napětí snížit.

3.2. Princip transformátoru

Princip funkce transformátoru plyne z Maxwell-Faradayova zákona o indukovaném napětí

$$-e = u_i = \frac{d\psi}{dt} = N \frac{d\phi}{dt} \quad (3.1)$$

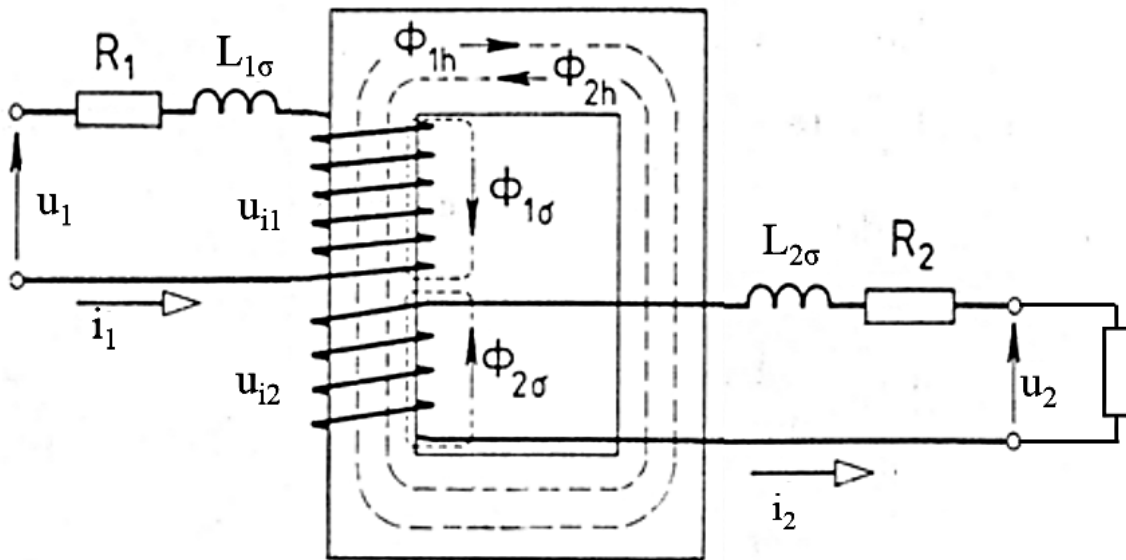
Kde	e	je	elektromotorické napětí [V]
	u_i		indukované napětí [V]
	ψ		spřažený magnetický tok [Wb]
	N		počet závitů [-]
	ϕ		magnetický tok [Wb]

Připojíme-li vstupní (primární) vinutí na střídavé napětí U_1 , pak tímto vinutím poteče proud, který vyvolá v magnetickém obvodu transformátoru střídavý magnetický tok ϕ . Za předpokladu dokonale magnetického obvodu a rozpojeného výstupního (sekundárního) vinutí je celý magnetický tok ϕ spřažen s výstupním (sekundárním) vinutím, případně s dalšími vinutími. Časovou změnou spřaženého magnetického toku ψ dochází ve výstupním vinutí k indukci napětí dle rovnice (3.1).

3.3. Skutečný transformátor

Připojíme-li vstupní vinutí na střídavé napětí u_1 , vinutím prochází střídavý proud i_1 , ten vybudí střídavý magnetický tok Φ_1 , který se ale celý neuzavře v magnetickém jádru. Magnetický tok Φ_1 je rozdělen na hlavní rozptylový tok Φ_{1h} (uzavírá se železným jádrem transformátoru o malém magnetickém odporu a je magneticky spřažen s výstupním vinutím) a rozptylový tok $\Phi_{1\sigma}$ (uzavírá se vzduchem mimo jádro a částečně i nádobou nebo nosnou konstrukcí transformátoru). Jestliže připojíme zátěž s impedancí na svorky výstupního vinutí, bude na těchto svorkách napětí u_2 takové polarity, aby proud i_2 podle Lenzova zákona vytvořil magnetický tok Φ_2 , který působí proti magnetickému toku Φ_1 . V každém transformátoru vznikají při zatížení úbytky napětí způsobené činným odporem a reaktancí vinutí - označujeme je R_1 a R_2 viz Obr. 5.

$L_{1\sigma}$ a $L_{2\sigma}$ představují rozptylové indukčnosti, protože rozptylové toky $\Phi_{\sigma 1}$ a $\Phi_{\sigma 2}$ navzájem nepůsobí.



Obr. 5 – Skutečný jednofázový transformátor [4]

3.4. Napěťové rovnice

Vydeme-li z druhého Kirchhoffova zákona platí:

$$u_1 = R_1 \cdot i_1 + L_{1\sigma} \cdot \frac{di_1}{dt} + N_1 \cdot \frac{d(\Phi_{1h} + \Phi_{2h})}{dt} = R_1 \cdot i_1 + L_{1\sigma} \cdot \frac{di_1}{dt} + u_{i1} \quad (3.2)$$

$$u_2 = R_2 \cdot i_2 + L_{2\sigma} \cdot \frac{di_2}{dt} + N_2 \cdot \frac{d(\Phi_{1h} + \Phi_{2h})}{dt} = R_2 \cdot i_2 + L_{2\sigma} \cdot \frac{di_2}{dt} + u_{i2} \quad (3.3)$$

3.5. Převod transformátoru

U ideálního transformátoru (tj. transformátor kde zanedbáváme ztráty) se zdánlivý příkon S_1 ($S_1=U_1I_1$) rovná zdánlivému výkonu S_2 ($S_2=U_2I_2$), převod je dán i poměrem závitů vyšší napěťové strany a nižší napěťové strany, potom pro převod transformátoru p platí:

$$p = \frac{U_1}{U_2} = \frac{I_2}{I_1} = \frac{N_1}{N_2} \quad (3.4)$$

3.6. Spojování vinutí

U trojfázového transformátoru jsou tři vstupní a tři výstupní vinutí. Každá fáze (vinutí) je vyvedena na svorky tak, že jsou proti sobě vždy stejné fáze vyššího a nižšího napětí. Svorky vyššího napětí jsou označovány velkým písmenem, svorky nižšího malými písmenem. Trojfázové vinutí můžeme zapojit do hvězdy, trojúhelníku nebo do lomené hvězdy. Spojení vinutí je vždy vyznačeno na štítku transformátoru.

Spojení (Y,y) vznikne, spojíme-li vstupní i výstupní vinutí do hvězdy. Při vyvedení uzlu poskytuje dvojí napětí, napětí fázové U_f a sdružené (sítové) U_s . $U_s=\sqrt{3}U_f$. Používá se pro transformaci VVN/VN. Spojení Yy je výrobně nejlevnější, má pro určité napětí nejmenší počet závitů. Nehodí se pro nesouměrné zatížení např. pro světelné sítě.

Spojení do trojúhelníku (D,d) dostaneme, zapojíme-li konec vinutí jedné fáze na začátek sousední fáze. Napětí mezi sousedními svorkami se rovná fázovému napětí.

Spojení do lomené hvězdy (Z,z) vznikne, pokud je vinutí každé fáze rozděleno na polovinu a obě poloviny jsou umístěny na dvou sousedních jádrech. Vinutí spojené do lomené hvězdy potřebuje pro totéž napětí o 15 % více závitů než vinutí spojené do hvězdy. Jeho výhodou je, že zmenšuje nerovnost napětí v soustavách s nerovnoměrným zatížením jednotlivých fází.

Spojení Yz s vyvedeným uzlem se používá do výkonu 315kVA. Snese nestejně zatížení jednotlivých fází, ale bude mít při nesouměrném zatížení různá napětí jednotlivých fází. Počet závitů u lomené hvězdy je asi o 15,5% větší než u spojení do hvězdy při stejném napětí.

Spojení Dy je dražší než Yy, protože vinutí do D potřebuje o 73% více závitů a lépe izolovaných. Snáší dobře nestejná zatížení jednotlivých fází. V ČR se používá pro transformaci vn/400/230 V.

Spojení Yd je vhodné pro velké transformátory v elektrárnách.

Právě pro transformátory vvn/vn se s výhodou používá spojení Yyd, kde třetí vinutí je využito pro kompenzování nesymetrie. Je řešeno na úrovni napětí vn, dosti často je nevyužito. Někdy je přes něj napájena vlastní spotřeba elektrické stanice nebo je na něj připojen kompenzátor. V PREdi je třetí vinutí standardně využito pro měřící účely, u TR Třeboradice je použito pro záložní napájení teplárny. [6][5][8]

3.7. Paralelní chod transformátorů

Při paralelním chodu musí být splněny následující podmínky:

1) Jmenovitá napětí obou transformátorů na vstupní a výstupní straně musí být stejná, to znamená, že jsou stejné i převody transformátorů. Kdyby nebyly převody stejné, vznikly by při chodu naprázdno velké vyrovnávací proudy.

2) Spojení transformátorů může být různé, avšak transformátory musí mít stejný hodinový úhel. Např. transformátor 1 může mít spojení Dy, transformátor 2 Yz, ale oba musí mít stejný hodinový úhel, např. 11.

3) Aby se zatížení transformátorů rozdělilo v poměru jejich výkonů, musí mít transformátory stejné procentní napětí nakrátko u_k . Nejsou-li napětí u_k obou transformátorů stejná, pak transformátor s nižším u_k převezme vyšší poměrné zatížení a může se stát, že transformátor s menším výkonem bude přetížen. Proto je výhodné, když má menší transformátor větší napětí u_k .

4) Aby se rozdělilo zatížení v poměru svých výkonů, i když jsou napětí u_k obou transformátorů stejná, je nutné, aby se výkony paralelně pracujících transformátorů od sebe nelišily více než v poměru 1:3.

4. Konstrukce transformátorů

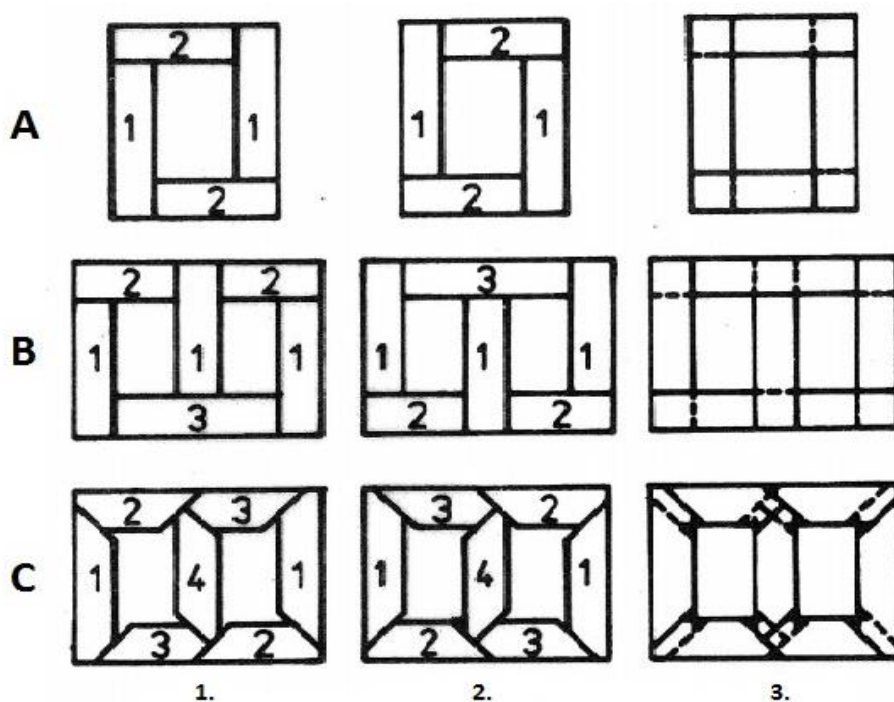
Z hlediska konstrukce je důležité rozdělení transformátorů na olejové a vzduchové (dříve zvané „suché“). Hlavní izolační materiály olejových transformátorů patří do třídy A (nejvyšší přípustná teplota 105°C), tj. papír, lepenka, bavlna, hedvábí, dřevo a jiné podobné organické látky napuštěné, tj. impregnované nebo trvale ponořené do oleje. Impregnace chrání vinutí před účinky vlhkosti, zpevňuje vinutí a zlepšuje odvod tepla.

Vzduchové transformátory jsou izolovány materiály vyšších tříd. Velkou výhodou je, že neohrožují požárem vnitřní prostory budov a lze je použít i mimo transformační stanice a to např. ve výškových budovách, nemocnicích, tunelech pro tramvaje a metra, námořních a důlních zařízeních. V dnešní době ale např. firma ABB vyrábí olejové transformátory pro lodní rozvody, kde jsou tyto transformátory naplněny silikonovým nebo modelovým olejem. Vinutí moderních vzduchových transformátorů s izolací třídy H je izolováno skelným vláknem prosyceným silikonovým lakem.

4.1. Magnetický obvod

Magnetický obvod se navrhuje tak, aby byl při zadaných magnetických vlastnostech co nejmenší a nejlehčí s nejlepšími magnetickými vlastnostmi, proto se používají orientované plechy válcované za studena s velmi nízkým obsahem uhlíku max. 0,05% (snižuje se žíháním) a poměrně velkým obsahem křemíku (3-5%) tloušťky 0,35-0,5mm, kdy $\Delta p_{1,0} = 0,5W/kg$ (to znamená, že vzorek plechu vykazuje při magnetické indukci 1 Tesla na 1 kilogram své hmoty ztráty v železe 0,5 W. Plechy jsou od sebe izolovány hedvábným papírem, vrstvou laku nebo oxidační vrstvou. Celý magnetický obvod musí být pevný. U větších transformátorů se plechy stahují pomocí příložných desek, rámu nebo svorníků, které musí být dobře izolovány, aby nevznikly závity nakrátko. [6]

Na Obr. 6 je naznačen postup A) skládání jednofázového jádrového transformátoru, B) trojfázového jádrového transformátoru, C) trojfázového jádrového transformátoru s řezy po 45° . Jsou zde zobrazeny první dvě polohy a poloha po přelátování.

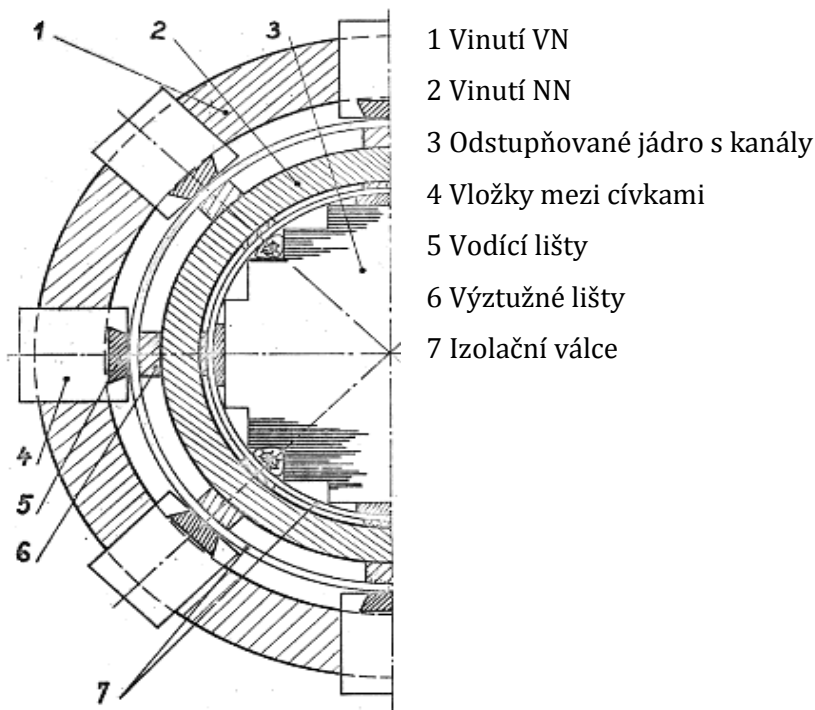


Obr. 6 – Skládání plechů transformátoru [7]

4.2. Vinutí

Vinutí je navíjeno na válce z tvrzeného papíru. Podle provedení rozlišujeme sousé vinutí a prostřídané vinutí. U sousého vinutí jsou cívky nižšího i vyššího napětí uloženy soustředně jedna uvnitř druhé. Vinutí pro nižší napětí je zpravidla blíže k magnetickému obvodu. Prostřídané vinutí se dělá tak, že cívky nižšího a vyššího napětí jsou uloženy střídavě na jádře. Pro dosažení magnetické souměrnosti se umísťují na začátek a konec jádra poloviční cívky nižšího napětí. [6][14]

Na Obr. 7 je znázorněno uspořádání válcového vinutí transformátoru



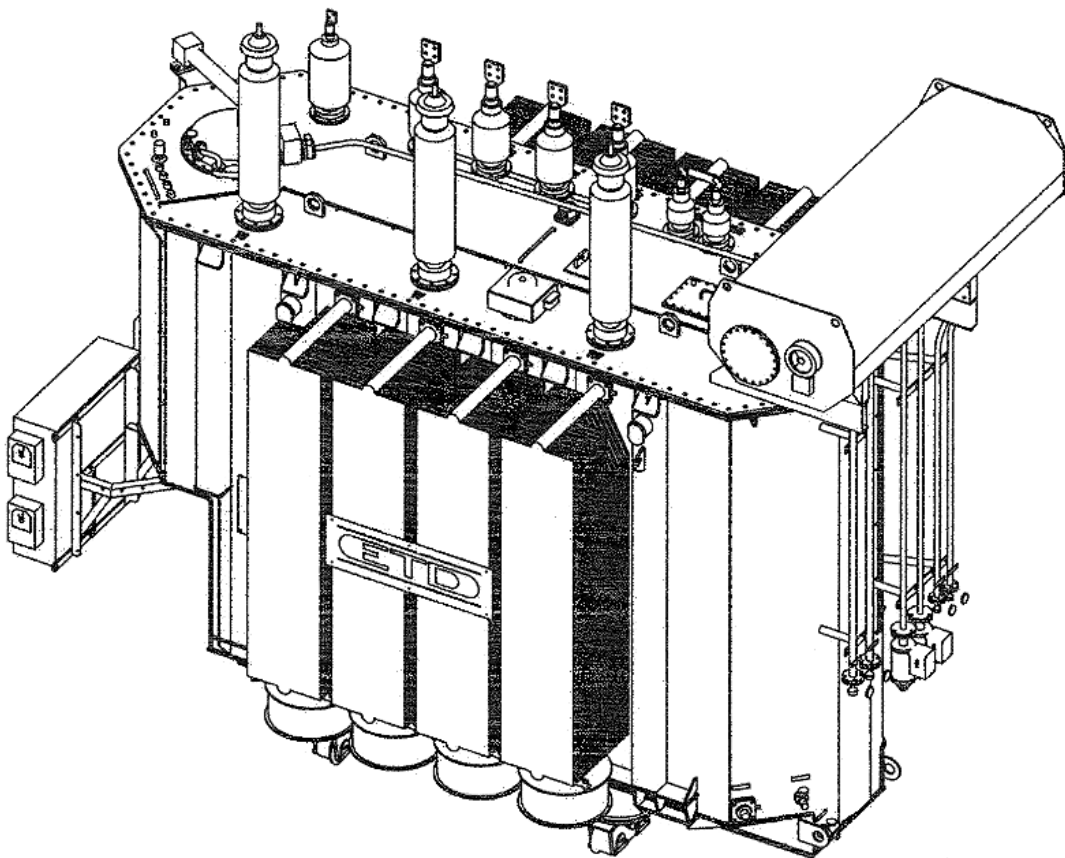
Obr. 7 – Uspořádání válcového vinutí [7]

Transformátory můžeme rozdělit na:

a) vzduchové - pro menší až střední výkony (Např. transformátory GEAFOL z lité pryskyřice pokrývají oblast výkonu od 50kVA do 40MVA s provozním napětím do 40kV) se vzduchovým chlazením. Suché transformátory se mohou umístit i tam, kde by umístění olejového transformátoru nebylo možné z důvodu nebezpečí výbuchu nebo kontaminace půdy. Vzduchové transformátory jsou spojeny s vyššími investičními náklady a rozměry oproti olejovým.

b) olejové - pro vyšší výkony, olej splňuje funkci izolace i chlazení a ztrátové teplo se prostřednictvím oleje předává nádobě i chladičům. Nádoba je chlazená vzduchem proudícím buď přirozeným nebo vynuceným prouděním vzduchu. Nádoba je samozřejmě olejetěsně uzavřena přišroubovaným víkem, na víku jsou osazeny průchodky vyššího a nižšího napětí, přepojovač odboček vinutí, plnicí otvor, jímka pro teploměr, přívod k dilatační nádobě a závěsná oka. U dna nádoby je výpustný ventil.

Olejové transformátory vyžadují olejovou jímku, aby nedošlo k úniku oleje do okolí a kontaminaci půdy. Provozní náklady budou vyšší s ohledem na náklady spojené s olejovou náplní.



Obr. 8 – Ukázka olejového transformátoru ETD 50 MVA [Zdroj: konzultace u distributora]

5. Stanoviště transformátoru

Provedení stanoviště závisí na velikosti, typu transformátoru a okolním zařízení. Větší skupinu transformátorů tvoří transformátory olejové, kdy pro každý olejový transformátor nad 1000 kVA se zřídí samostatné stanoviště se zachytnou jímkou, tak aby v případě havárie nedošlo k ohrožení životního prostředí. Půdorysný rozměr jímky musí přesahovat na všech stranách půdorys transformátoru o 1 m. Účinný objem havarijní jímky musí být roven alespoň součtu objemů oleje největšího transformátoru, největším měsíčním srážkám (venkovní stanoviště) a je-li použito stabilní hasicí zařízení - 50 % objemu vody potřebné pro činnost tohoto zařízení. V případě, že je stabilní hasicí zařízení napojeno přímo na vodovodní síť, musí být zabezpečeno automatické vypnutí po předepsané době činnosti. Na PŘEdistribuce se používá stabilní hasicí zařízení pouze ve vnitřních prostorech s hasivem CO₂[10].

Havarijní jímky musí být řešeny tak, aby bylo možno odčerpát zachycený olej, vypustit nebo odčerpát vodu a vyčistit jímku i propojovací potrubí.

Podle umístění transformátoru rozlišujeme stanoviště na:

a) Venkovní stanoviště - transformátor o výkonu nad 1000kVA se umístí na základu, výška úrovně základu musí umožňovat dopravu transformátoru na stanoviště.

Venkovní stanoviště je nejčastější případ transformoven se dvěma hladinami napětí vvn nebo zvn s transformátory velkých výkonů, ale i pro malé distribuční transformátory vn/nn, které se umístí přímo na stožáry a obvykle bývá situováno na severní (případně východní) straně budovy rozvodny, aby byl transformátor pokud možno chráněn před slunečním zářením v letních měsících. Prostor transformátoru bývá ze tří stran obezděn, aby se porucha transformátoru či požár nepřenesly na okolní rozvodná zařízení.

PŘEdi používá venkovní stání v okrajových částech Prahy. Transformátor je připojen z venkovní rozvodny 110 kV. Stání je navrhováno zastřešené, sklon střechy je směrem od technologie. Obvodové stěny jsou ze tří stran a jsou provedeny i jako protipožární stěny z železobetonu. V zadní stěně je otvor pro připojení technologie rozvodny. V případě problémů s dodržением hlukové hladiny je možné provést dodatečná opatření – zazdění otvoru v zadní stěně, s čímž souvisí osazení průchodek 110 kV, dále je možnost vnitřního akustického obkladu a otvor pro závoz technologie osadit protihlukovými žaluziemi. Podmínkou je požární odolnost do 30 min, jinak by bylo stání opatřeno SHZ (stabilním hasicím zařízením). Výška základu stání transformátoru je 1 m nad komunikací. Ve stání transformátoru jsou umístěny kolejnice a kladka na zatažení transformátoru. Jímka pod transformátorem tvoří zachytnou a zároveň havarijní jímku. Objem jímky se dimenzuje pro zachycení minimálně 100 % objemu transformátorového

oleje + 50 % pro hasební hmotu. Součástí jímky je revizní poklop a otvor pro čerpání oleje. Stěny jímky jsou ošetřeny izolací proti úniku oleje. V horní části jímky je štěrkové lože. Z bezpečnostních důvodů je do stání umístěno demontovatelné pracovní oplocení se vstupními dvířky s výškou min 50 cm. Vstup do stání je řešen pomocí nášlapných kapslí nebo žebříku s madlem. Součástí stání je elektroinstalace a provozní/pracovní osvětlení. Dále je zde přívod pro napájení micafil (filtrace oleje) s jištěním 250 A. Ve stání transformátoru je zpravidla umístěn odporník.

b) Vnitřní stanoviště - provedení ve společném prostoru s ostatním zařízením elektrické stanice, nebo jako transformátorová komora.

Takto mohou být umístěny maximálně 2 transformátory o výkonu do 1000kVA a musí být odděleny mezi sebou a ostatním zařízením plně nehořlavou stěnou (výška 2 m, šířka rovna alespoň šířce transformátoru) nebo musí být dodržena vzdálenost alespoň:

- a) 900mm mezi pláští dvou transformátorů
- b) 1500mm mezi transformátorem a ostatním zařízením. [1] [10]

Větrání v transformátorových komorách se provádí buď přirozeným tahem, nebo uměle. V obou případech je transformátor v komoře umístěn tak, aby byl v proudu chladícího vzduchu. Vývod ohřátého vzduchu z komory se umísťuje do nejvyšší části, pokud možno v protilehlém směru vstupního vzduchu. [5]

Tento typ stání PREDi využívá v centru Prahy. Stání je součástí budovy společných provozů, transformátor je připojen kabelem ze zapouzdřené rozvodny 110 kV. Svodič přepětí je umístěn vedle koncovky kabelu 110 kV. Vzhledem k dodržení hlukových limitů jsou tato stání opatřena akustickým obkladem z vnitřní strany. Na vstupu a výstupu vzduchu jsou zpravidla umístěny tlumiče hluku, které zpomalují proudění vzduchu přes transformátor. V takovýchto případech je již samovolné proudění chladícího vzduchu nedostatečné a je nutné nucené proudění pomocí ventilátorů. Otvor pro závoz technologie je osazen demontovatelnými vraty, případně je zazděn. Přístup k transformátoru je zevnitř nebo z venku v případě existence rampy. Zde je již požární odolnost vyšší než 30 min a tudíž je do stání instalováno SHZ (stabilní hasicí zařízení). Pro správnou funkci SHZ musí být ve stání instalovány požární čidla a požární klapky, které zabrání úniku hasební látky (CO₂).

Ostatní pravidla jsou stejná jako pro venkovní stání.

5.1. Ukázka venkovního stanoviště

Ukázka venkovního stanoviště transformátorů 110/22kV společnosti E.ON Distribuce, a.s. Písek-Čížovská.



Obr. 9 – Transformační stanice 110/22kV Písek-Čížovská

6. Ochrany

Všeobecně platí, že ochrana rozvodných zařízení a elektrických strojů má za úkol:

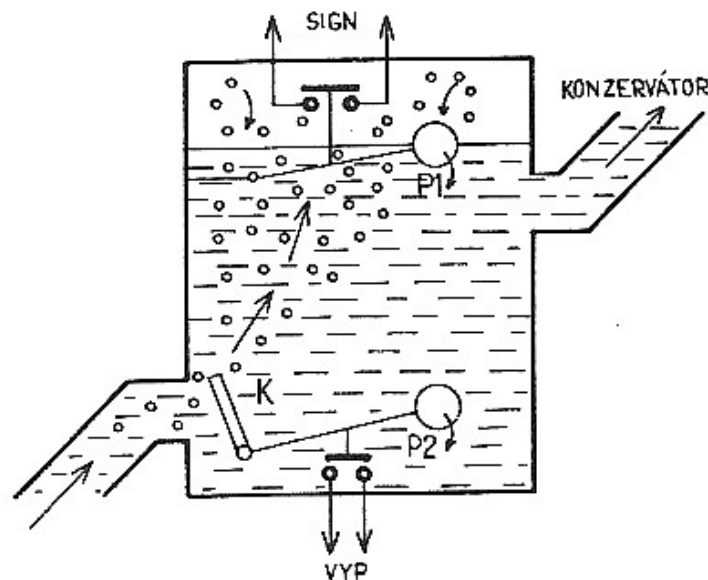
- a) rychle a spolehlivě určit poruchu nebo překročení meze normálního provozu chráněného zařízení;
- b) vypnout je v čase, který musí být stanoven tak, aby se zabránilo vzniku škod nebo omezil jejich rozsah na stroji nebo zařízení a zajistila se ochrana osob před účinky el. energie;
- c) snížit riziko požáru v důsledku tepelných účinků zkratového proudu;
- d) zajistit, aby se porucha nerozšířila na ostatní prvky ES a neohrozila její chod a napájení spotřebitelů. [1][8]

6.1. Plynové relé

Plynové relé, též nazýváno Buchholzovo relé, se používá pro ochranu transformátorů s olejovým chlazením. Umísťuje se do potrubí mezi víko transformátoru a konzervátor. Princip činnosti plynového relé je znázorněn na Obr. 10. Při vnitřní poruše transformátoru nastává vlivem tepla oblouku nebo ohřátého vodiče rozklad a destilace transformátorového oleje a začnou se z něj uvolňovat plyny, které zrychlí proudění oleje v trubici. Poruchy doprovázené vývojem plynů se buď signalizují, anebo při rychlém vývinu plynů se provádí vypnutí transformátoru. Plynové relé má tedy dva stupně působení:

1. stupeň - U tohoto stupně reaguje plovák P1 k signalizaci. Plovák sepne, jestliže dojde k pomalému vývinu plynů nebo při úniku oleje z nádoby.

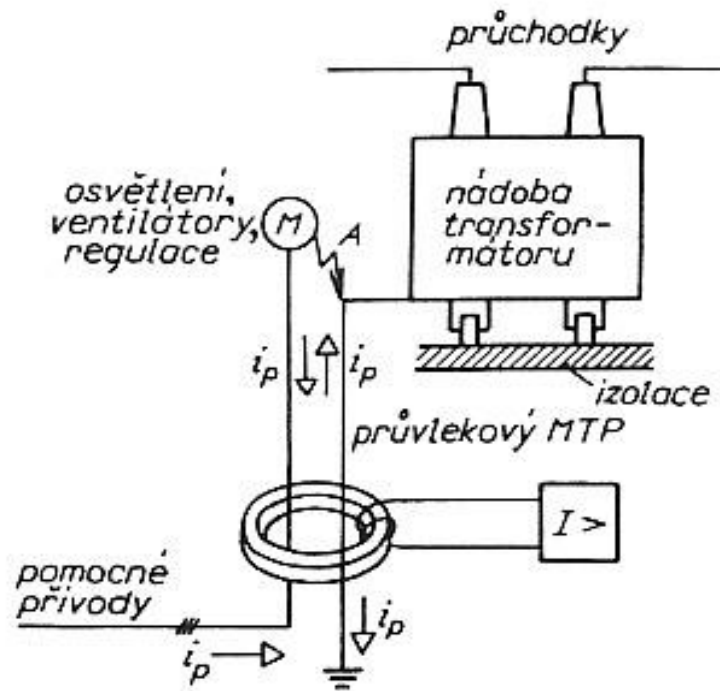
2. stupeň - Reaguje na rychlý vývin plynů a proudění oleje do konzervátoru při vnitřních zkratech. Toto je zachyceno nejdříve klapkou K a plovákem P2, čímž dochází k sepnutí vypínacího obvodu. [2]



Obr. 10 - Plynové (Buchholzovo) relé [2]

6.2. Zemní kostrová ochrana

Někdy též nazývána jako „nádobová ochrana“. Princip ochrany je znázorněn na obrázku Obr. 11. Ochrana působí při přeskoku na průchodkách nebo jinému zkratu, při kterém prochází zemní proud kostrou transformátoru, ochrana zapůsobí. Pro bezchybné působení při zkratech v pomocných obvodech (regulace, ventilátor, osvětlení) je nutné k těmto zařízením protáhnout přívody průvlekovým transformátorem proudu. [3]



Obr. 11 – Zemní kostrová ochrana [2]

6.3. Rozdílová ochrana

Porucha se vyhodnotí na základě rozdílu fázorů proudů na vstupu a výstupu chráněného objektu. Rozdíl proudů představuje proud rozdílový, pokud je větší než proud nastavený, tak ochrana zapůsobí a odpojí transformátor na primární, sekundární případně terciární straně.

6.4. Proudová zkratová ochrana

Jako zkratovou ochranu transformátoru lze využít trojfázovou zpožděnou nadproudovou ochranu. Časový článek zajišťuje časovou koordinaci s ostatními ochranami. Tato ochrana může působit v rychlém stupni při blízkých zkratech, kdy napětí zkratové smyčky je nízké. Při vzdálených zkratech je napětí vyšší a ochrana je blokována. [3]

6.5. Distanční ochrana

Ochrana sleduje impedanci sítě, její pokles znamená poruchový stav. Používá se pro dosažení vyšší selektivity a tedy zkrácení času záložní ochrany, obvykle je využívána pro transformátory velkých výkonů. [3]

6.6. Ochrana při přetížení

Při přetížení lze použít nadproudovou závislou nebo nezávislou ochranu (zpožděnou). Žádná z těchto metod však dokonale nemodeluje poměry uvnitř stroje. V současné době je nejdokonalejší ochranou transformátoru „tepelný obraz“. Ochrana respektuje vedle přímého vlivu nadproudu i teplotu chladicí látky transformátoru, a tím i intenzitu chlazení. U transformátoru se sonda tepelného obrazu umísťuje do chladícího oleje pod víko [3].

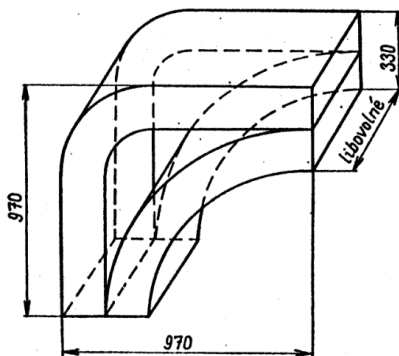
7. Opatření proti hluku

Studie hluku se zpracovává jako podklad pro požadavky stavebního úřadu a místně příslušné hygienické stanice. Cílem hlukové studie je posouzení vlivu hluku z provozu na stávající nejbližší chráněné funkce v okolí (vzdálená obytná zástavba). Akustická situace v území okolo transformovny se ve vztahu k hygienickým požadavkům posuzuje podle Nařízení vlády č.272/2011 Sb. o ochraně zdraví před nepříznivými účinky hluku a vibrací. Na základě uvedeného nařízení vlády jsou stanoveny hygienické limity hluku v chráněném venkovním a vnitřním prostředí, je tedy zapotřebí dostatečně omezit hluk i pro elektrické stanice VVN a ZVN.

Hlukové vlastnosti obecně

Hluk VVN a ZVN transformátorů má dvě zcela odlišné části:

a) Tónový zvuk vznikající v jádře transformátoru magnetostrickí (změna rozměrů při zmagnetování) plechů. Sestává z řady sudých násobků frekvence sítě, tvořících charakteristický brum transformátoru, s intenzitou úměrnou sycení jádra (tedy na zatížení nepřetíženého transformátoru nezávislá, ale na případných změnách napětí ano), při konstantním napětí je ustálený a působí nepřetržitě.

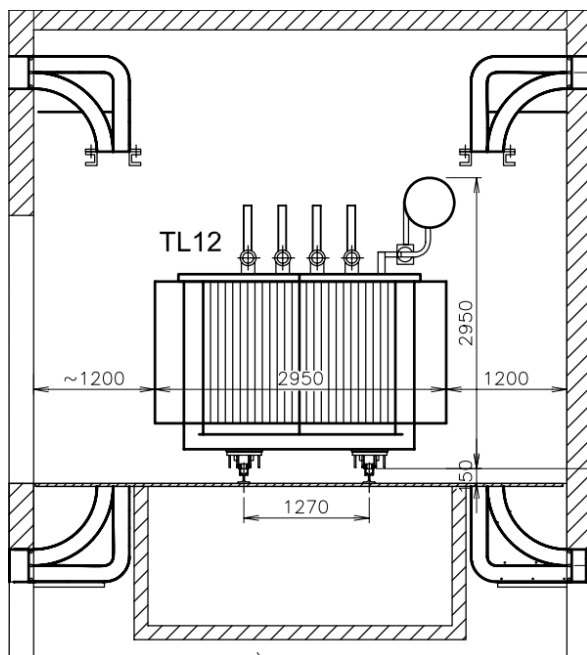


Pro tlumení hluku transformoven osazených transformátory bez nuceného chlazení, je nejúčinnější reflexní tlumič hluku magnetostrickce („hluché koleno“)

Návrh zhotovil Ing. Ivan Zahrádka. [16]

Obr. 12 - Reflexní tlumič hluku magnetostrickce [16]

Na Obr. 13 Lze vidět reflexní tlumiče v řezu transformovny



Obr. 13 - Reflexní tlumič v řezu [16]

b) Hluk ventilátorů ofukujících radiátory transformátorového oleje. Fyzikálně se jedná o širokopásmový, přerušovaný zvuk (ofukování není obvyklé během noci, kromě stanic s napětím 220 a 400 kV). U nových transformátorů se používají pomalu běžné ventilátory potlačující tento hluk.

Vegetace jako zdroj přídavného útlumu hluku

Hluk ze stanice se šíří celoročně, proto nelze počítat s olistěnou vegetací (stromy, keře,...). Celoroční významný útlum poskytne pouze vzrostlý les absorpcí zvuku v půdě a rozptylem na kmenech stromů. Lesní půda má výrazné maximum absorpce zvuku v pásmu 200 až 500 Hz, kde je i nejzávažnější frekvence magnetostrikčního hluku.

Jestliže magnetostrikční hluk transformátorů překračuje v daném místě hygienicky přípustnou hladinu, jsou nezbytná protihluková opatření.

Snížení hluku skutečného zdroje

Dispoziční řešení

Správně situována provozní budova slouží jako protihluková zástěna a dokáže ochránit před hlukem ze stanice. Dalším významným opatřením je orientace transformátorů, kdy protipožární stěny slouží v potřebném směru jako protihlukové zástěny.

Protihlukové zástěny

Efekt protihlukové zástěny je tím větší, čím je blíže ke zdroji nebo zahlučenému místu, proto se zvětšuje protipožární stěna transformátoru tak, aby přesahovala obrys transformátoru.

Antihluk

V situacích, kde jiný způsob ochrany není možný, lze požadované objekty aktivně chránit řízenou interferencí hlukem vysílaným v protifázi z reproduktoru transformátoru. V kuželu s vrcholovým úhlem až 15° se tak může snížit hluk transformátoru až o 10 dB.

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. Nelze-li využít budovu jako protihlukovou zástěnu, je třeba ověřit, není-li možné ji umístit tak, aby na dané místo neodrážela hluk.

Protihlukové zástěny

I hluk ze zrcadlového zdroje lze snížit nebo zcela potlačit, když se mu do cesty postaví protihluková zástěna (protipožární stěna u transformátoru)

Absorpční obklady na odrazových plochách

Hluk odrážený přes fasádu budovy na zahlučené místo vně stanice lze snížit tak, že se fasáda obloží absorpčním obkladem z keramických nebo cihelných rezonátorů, jenž mají pro frekvence 100 až 400 Hz koeficient akustické pohltivosti větší než 0,6.

Hladiny prahu slyšení L_{PS} v decibelech v rozsahu středních kmitočtů třetinooktávových pásem f_t 10Hz až 160 Hz

f_t [Hz]	10	12,5	16	20	25	31,5	40	50	63	80	100	125	160
L_{PS} [dB]	92	87	83	74	64	56	49	43	42	40	38	36	34

Zdroj: Příloha č. 1 k nařízení vlády č. 272/2011 Sb.

Korekce pro stanovení hygienických limitů hluku

Druh chráněného prostoru	Korekce [dB]			
	¹⁾	²⁾	³⁾	⁴⁾
Chráněný venkovní prostor staveb lůžkových zdravotnických zařízení včetně lázní	-5	0	+5	+15
Chráněný venkovní prostor lůžkových zdravotnických zařízení včetně lázní	0	0	+5	+15
Chráněný venkovní prostor ostatních staveb a chráněný ostatní venkovní prostor	0	+5	+10	+20

¹⁾ Použije se pro hluk z provozu stacionárních zdrojů, hluk z veřejné produkce hudby

²⁾ Použije se pro hluk z dopravy na silnicích III. třídy a místních komunikacích III. třídy a drahách.

³⁾ Použije se pro hluk z dopravy na dálnicích, silnicích I. a II. třídy a místních komunikacích I. a II. třídy v území

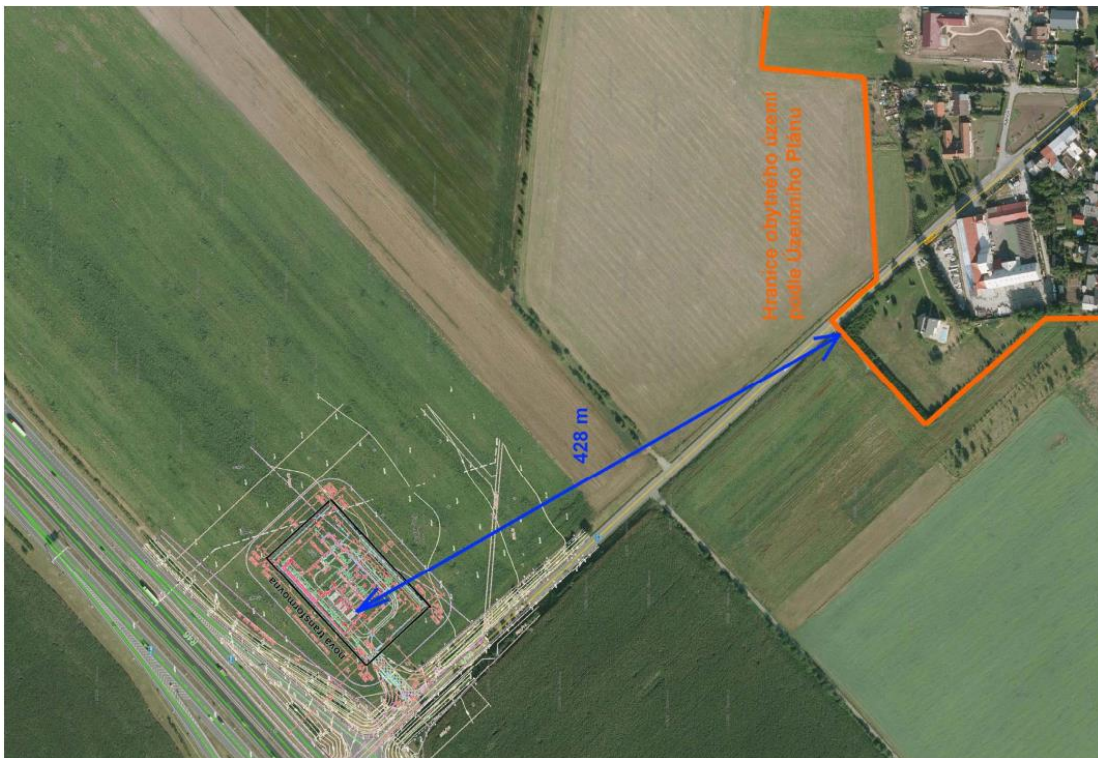
⁴⁾ Použije se v případě staré hlukové zátěže z dopravy na pozemních komunikacích s výjimkou účelových komunikací a drahách uvedených v bodu ²⁾ a ³⁾.

Druh chráněného vnitřního prostoru	Doba pobytu	Korekce [dB]
Nemocniční pokoje	doba mezi 6.00 a 22.00 hodinou	0
	doba mezi 22.00 a 6.00 hodinou	-15
Lékařské vyšetřovny, ordinace	doba mezi 22.00 a 6.00 hodinou	-5
Obytné místnosti	doba mezi 6.00 a 22.00 hodinou	0
	doba mezi 22.00 a 6.00 hodinou	-10
Hotelové pokoje	doba mezi 6.00 a 22.00 hodinou	+10
	doba mezi 22.00 a 6.00 hodinou	0
Přednáškové síně, učebny a pobytové místnosti škol, jeslí, mateřských škol a školských zařízení	po dobu používání	+5

Tab. 4 Korekce pro stanovení hygienických limitů v chráněném vnitřním prostoru staveb [17]

Ukázka hlukové studie

Ortofomapa se zákresem nové transformovny a širšieho okolí s vyznačenou vzdáleností k nejbližší chráněné zástavbě jižním směrem od posuzovaného zdroje hluku (430 m)



Výpočtem se stanoví nejvyšší hladina hluku každého transformátoru z transformovny, aby u nejbližší zástavby nebyly překročeny noční povolené limity pro stacionární zdroje s tónovou složkou. Nejpřísnější limitní izofona pro noční dobu je 35 dB.



Vzhledem k modelovým výpočtům budoucího akustického stavu lze konstatovat, že po dokončení a spuštění transformovny nedojde k překročení hlukových limitů u nejbližší obytné zástavby.

Zdroj: Konzultace u distributora - TR Hněvotín

8. Požadavky Evropské unie na transformátory

V červenci 2015 vstoupila platnost nařízení Evropské komise pro navrhování transformátorů s ohledem na životní prostředí (ekodesing).

Jedná se o nařízení komise EU č. 548/2014 ze dne 21. 5. 2014 pro realizaci Směrnice 2009/125/ES ze dne 21. října 2009 stanovující požadavky na ekodesing výrobků spojených s významnou spotřebou energie.

Stanovení požadavků na ekodesing pro střední a velké výkonové transformátory je zapotřebí pro zlepšení energetické účinnosti a tím dosažení snížení emisí CO₂.

Na některé transformátory se nařízení nevztahuje kvůli specifické funkci. Spotřeba energie a potenciál úspor těchto transformátorů je zanedbatelný.

Jedná se o:

přístrojové transformátory, speciálně konstruované k napájení měřicích přístrojů, elektroměrů, relé a dalších podobných přístrojů;

- transformátory s nízkonapěťovými vinutími speciálně konstruované pro použití s usměrňovači k zajištění stejnosměrného napájení;
- transformátory speciálně konstruované k přímému připojení k peci;
- transformátory speciálně konstruované pro zařízení na moři a plovoucí zařízení na moři;
- transformátory speciálně konstruované pro mobilní tísňová zařízení;
- transformátory a autotransformátory speciálně konstruované pro železniční napájecí systémy;
- uzemňovací transformátory, tj. třífázové transformátory, které mají poskytnout nulový bod pro účely uzemnění sítě;
- trakční transformátory namontované na kolejových vozidlech, tj. transformátory připojené k trolejovému vedení střídavého nebo stejnosměrného proudu, a to přímo nebo prostřednictvím převodníku, který se používá v pevných zařízeních železničních

aplikací;

- zapalovací transformátory, speciálně konstruované k zapalování třífázových indukčních motorů k vyloučení prudkých poklesů napájecího napětí;
- zkušební transformátory, speciálně konstruované k použití v elektrickém obvodu k vytvoření proudu o specifickém napětí nebo proudu pro účely zkoušení elektrických zařízení;
- svařovací transformátory, speciálně konstruované pro použití v zařízeních pro obloukové svařování nebo zařízeních pro odporové svařování;
- transformátory, které jsou speciálně konstruovány pro zařízení do výbušného prostředí a hlubinnou těžbu;
- transformátory, které jsou speciálně konstruovány pro použití v hluboké vodě (ponořené);
- transformátory pro rozhraní o středním napětí do 5 MVA;
- velké výkonové transformátory, prokáže-li se, že pro konkrétní použití nejsou dostupné technicky proveditelné alternativy, které by splňovaly požadavky minimální účinnosti stanovené tímto nařízením;
- velké výkonové transformátory, které jsou identickou náhradou stávajících velkých výkonových transformátorů ve stejném fyzickém umístění/instalaci, pokud tohoto nahrazení nelze dosáhnout bez neúměrných nákladů spojených s jejich přepravou a/nebo instalací

V mé práci se zabývám transformátory VVN/VN, které jsou definovány jako „velký výkonový transformátor“. Jedná se o 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.

Minimální požadavky na účinnost pro velké výkonové transformátory jsou uvedeny v tabulce

Jmenovitý výkon (MVA)	Stupeň 1 (1. července 2015)	Stupeň 2 (1. července 2021)
	Minimální index špičkové účinnosti (%)	
≤ 4	99,465	99,532
5	99,483	99,548
6,3	99,510	99,571

8	99,535	99,593
10	99,560	99,615
12,5	99,588	99,640
16	99,615	99,663
20	99,639	99,684
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
80	99,723	99,758
≥ 100	99,737	99,770

Tab. 5 Požadavky na minimální index špičkové účinnosti pro velké výkonové transformátory ponořené do kapaliny

Metody výpočtu

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.

$$PEI = 1 - \frac{2(P_0 + P_{c0})}{S_r \sqrt{\frac{P_0 + P_{c0}}{P_k}}}$$

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_r je jmenovitý výkon transformátoru nebo autotransformátoru, k němuž jsou vztaženy ztráty nakrátko P_k .

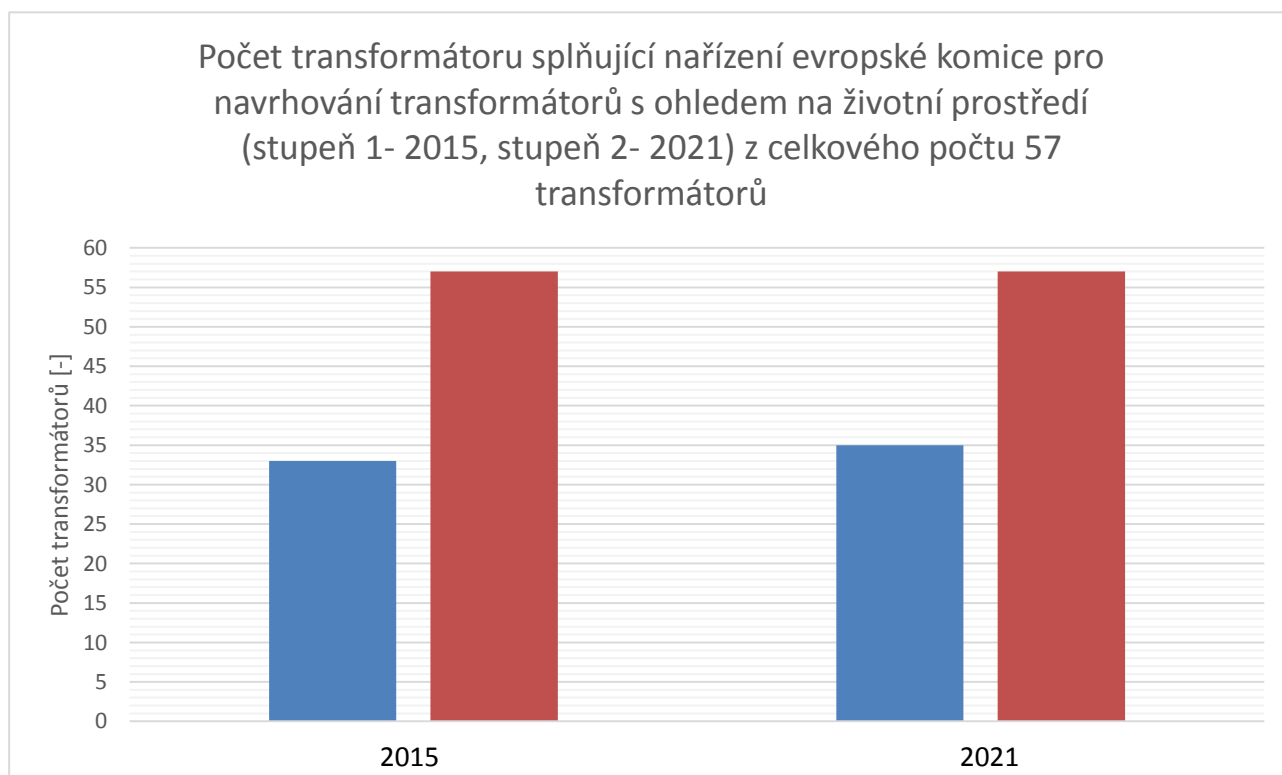
Zdroj: NAŘÍZENÍ KOMISE (EU) č. 548/2014

Tab. 6 Popisuje, jaké transformátory společnosti PREdistribuce splňují nařízení Evropské komise č. 548/2014.

TR		označení	Sn	ek	r.výr.	P ₀	P _k	Počet čerpadel	P _{Co}	PEI	ekodesing	
			[MVA]	[%]		[kW]	[kW]		[kW]	[%]	2015	2021
PJH	Jih	T101	63	17	1993	39,65	335,3	4	14	99,75	NE	NE
		T102	63	17	1993	38,21	330,5	4	14	99,62	NE	NE
		T103	63	17	1993	39,89	330,7			99,61	NE	NE
PSE	Sever	T101	40	11,3	1972	50	221,9			99,60	NE	NE
		T102	40	11,25	1971	48,9	222,8			99,74	NE	NE
		REZ.	63	16,81	1988	38,24	339			99,74	NE	NE
ZBR	Zbraslav	T101	40	11,22	1989	40,2	210,7			99,48	NE	NE
		T102	40	11,08	1989	40,23	211,2			99,48	NE	NE
MAL	Malešice	T101	40	15,64	2004	30,36	251,4			99,48	NE	NE
		T102	40	15,64	2004	30	251,4			99,54	NE	NE
		T103	40	16,64	2010	17	147			99,53	ANO	ANO
PZA	Západ	T101	63	16,7	1989	36,8	363,8	1	3,5	99,48	NE	NE
		T102	63	16,79	1986	37	364,8	1	3,5	99,75	NE	NE
		T103	63	16,6	1984	40,2	368,7	1	3,5	99,74	NE	NE
LET	Letňany	T101	40	10,78	2011	18,5	143,3			99,75	ANO	ANO
		T103	40	10,89	2012	18,5	143,9			99,75	ANO	ANO
PVY	Východ	T101	40	11,2	1979	46,2	232,5			99,75	NE	NE
		T 102	40	11,23	1971	48	222			99,78	NE	NE
		REZ.	40	11,1	1975	48	222			99,80	NE	NE
BEX	Běchovice	T101	40	10,85	1975	40,95	203,2			99,80	NE	NE
		T102	40	10,8	1984	42,19	205,8			99,71	NE	NE
		T103	40	11,1	1976	48	222			99,56	NE	NE
MEX	Měcholupy	T101	40	10,86	2013	17,49	140,8			99,54	ANO	ANO
		T102	40	10,87	2010	18,77	138,6			99,56	ANO	ANO
LHO	Lhotka	T101	40	10,91	2013	17	143,4			99,56	ANO	ANO
		T102	40	11,17	2012	17,2	143			99,48	ANO	ANO
		T 103	40	11,19	2012	17,15	143,2			99,48	ANO	ANO
PST	Střed	T101	63	17,3	2011	21	221			99,55	ANO	ANO
		T102	63	17,5	2014	23	176			99,48	ANO	ANO
		T103	63	17,5	2013	23,3	176				ANO	ANO
		T104	63	17,17	1995	33,56	254,4			99,62	NE	NE
PHO	Holešovice	T101	63	17,4	1979	43,4	336	4	14	99,74	NE	NE
		T102	63	17,2	1979	48,72	336,6	4	14	99,74	NE	NE
		T103	63	17,34	1979	42,24	339,1	4	14	99,56	NE	NE
		T104	63	17,4	1979	42,24	336,8	4	14	99,56	NE	NE
XOD	Chodov	T101	40	11,1	1976	48	223,8			99,69	NE	NE
		T102	40	11,1	1976	48,1	222,5			99,56	NE	NE
		T103	63	16,7	1984	45	334	4	14	99,73	NE	NE
TRE	Třeboradice	T101	40	20,67	1981	48	222			99,73	NE	NE
		T102	40	13,5	1985							
PJI	Jinonice	T101	63	17,6	1978	39,1	357,9			99,77	NE	NE
		T102	40	10,78	2009	19,1	139,8			99,81	ANO	ANO
		T103	40	10,76	2009	19,4	140,4			99,78	ANO	ANO

PKA	Pražka	T101	63	17	1984	41,58	339,8	4	14	99,74	NE	NE
		T102	63	17	1984	41,76	341,4	4	14	99,74	NE	NE
		T103	63	16,29	2003	37,1	262,1			99,74	NE	NE
PZL	Zličín	T101	40	11,14	1985	37,8	206,4			99,79	NE	NE
		T102	40	10,78	2009	20	141,9			99,79	ANO	ANO
PSM	Smíchov	T101	63	17,23	2000	33,67	221			99,75	ANO	NE
		T102	63	17,1	2008	20,8	201,3			99,62	ANO	ANO
CVR	Červený Vrch	T101	40	11,12	1997	11,96	174,3			99,61	ANO	ANO
		T102	40	12,37	2003	11,96	124,5			99,60	ANO	ANO
PKV	Karlovy Vary	T101	63	17,4	2004	22,8	212,7			99,74	ANO	ANO
		T102	63	17,36	2000	30,3	221			99,74	ANO	NE
PCM	Černý Most	T101	40	10,75	2004	19,12	143,5			99,48	ANO	ANO
		T102	40	10,86	2005	18,9	143,7			99,48	ANO	ANO
PPA	Pančovice	T101	63	17,73	2008	21	204,9			99,48	ANO	ANO
		T102	63	17,65	2008	21,2	205,1			99,54	ANO	ANO

Tab. 6 Transformátory PREDistribuce



Obr. 14 Počet transformátorů splňující nařízení č. 548/2014 společnosti PREDi

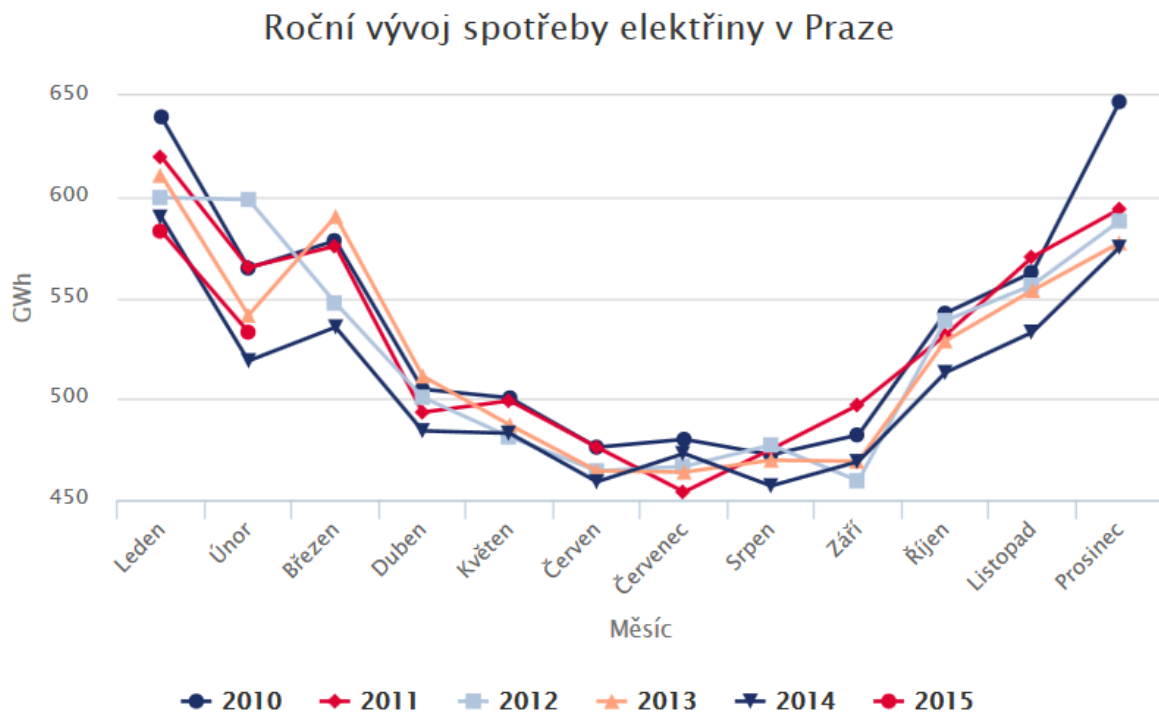
Hlavním cílem požadavků na ekodesign je tedy podpoření a rozšíření nejúčinnějších technologií a tím snížení negativního dopadu výrobku na životní prostředí. Ekodesign posuzuje dopad výrobku na životní prostředí v celém jeho životním cyklu. Je ale třeba vzít v úvahu, že zvýšení kvality vloženého materiálu do výrobku vede sice k lepším výsledkům, jako je snížení spotřeby elektrické energie, ale mohou se zvětšovat dopady na životní prostředí v rámci likvidace po ukončení životnosti. Je tedy zapotřebí věnovat se takovému problému z obou pohledů a najít mezi nimi rovnováhu.

9. Rozbor zatížení

Rozbor současného zatížení, ale i predikce budoucího je při projektování transformoven a ekonomickém zhodnocení velmi důležitá. Záleží na strategickém umístění v Praze, na plánech developerů při stavění obytných a průmyslových zón, na současném stavu vedení, rozvoji elektromobilů a jejich nabíjecích stanic. Predikce je tedy nejednoznačná a velmi složitá.

9.1. Rozbor současného zatížení

Následující graf znázorňuje závislost spotřeby na ročním období, kdy v zimních měsících roste spotřeba elektřiny, což je dáno klimatickými podmínkami a lidé tráví více času doma. Naopak v letních měsících nastává mírný pokles spotřeby elektřiny, který může být způsoben tím, že slunce svítí více během dne než v zimních měsících a není třeba tolik svítit.



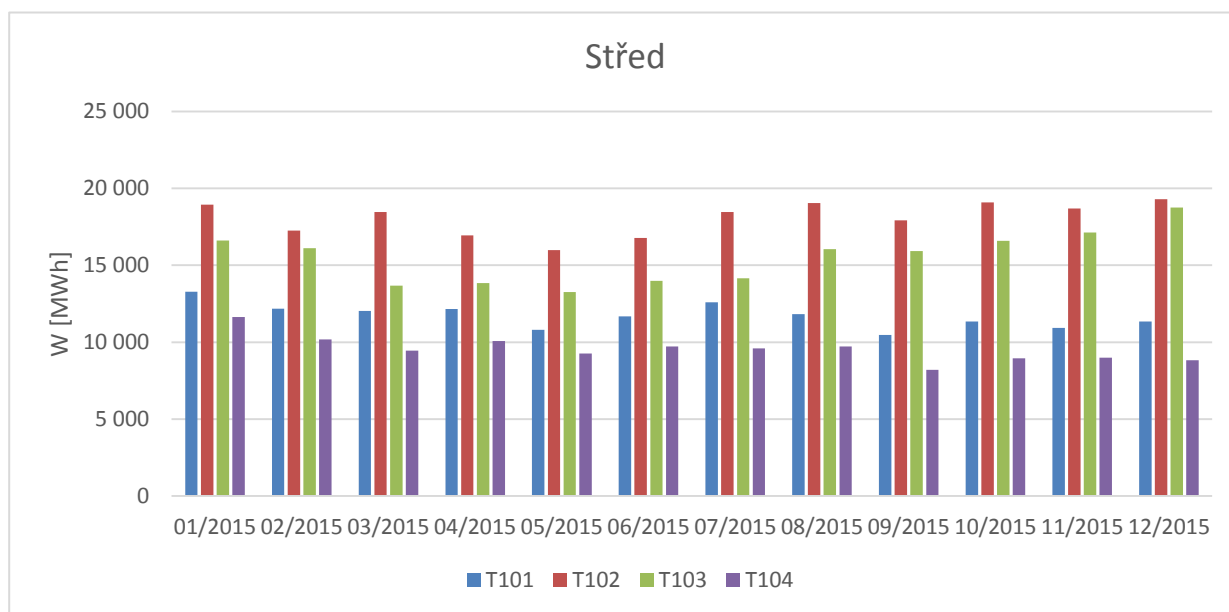
Obr. 15 – Roční vývoj spotřeby elektřiny v Praze [18]

Při rozboru zatížení jsem vybral transformovnu TR Střed, jenž je vzhledem ke své strategické poloze a největšímu množství proteklé energie nejvytíženější a TR Sever, která naopak patří k méně vytíženým transformovněm.



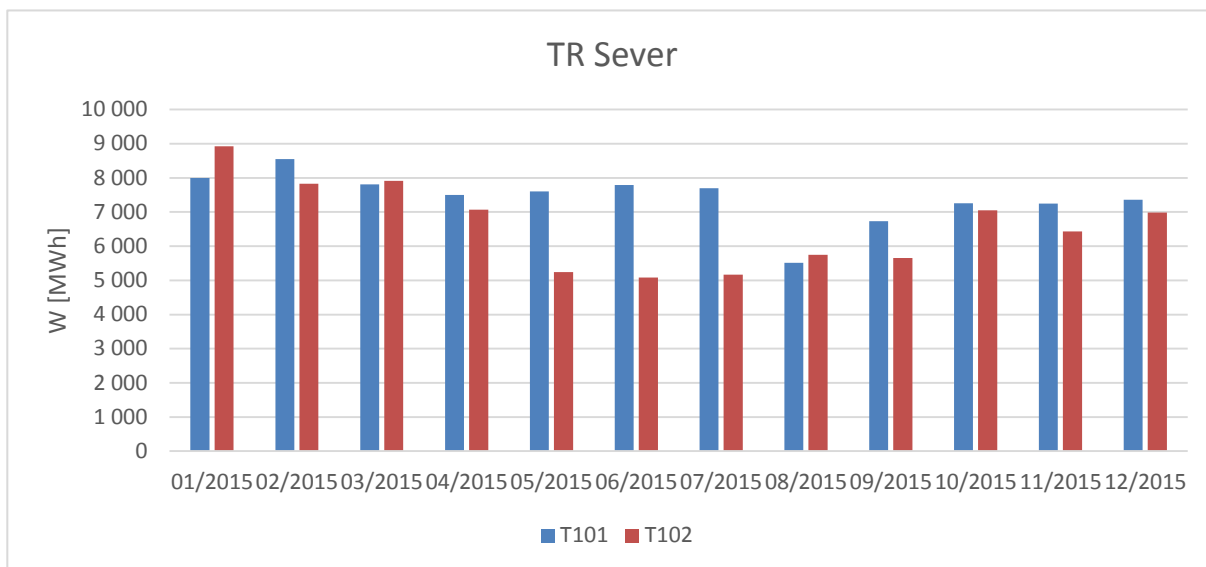
Obr. 16 – Zařízení PREdistribuce, a.s. [18]

Graf znázorňuje proteklou energii transformovnou TR Střed a je zřejmé, že se zde díky své poloze roční období tolik neprojevuje.



Obr. 17 – Proteklá energie TR Střed

Naopak u transformovny TR Sever už lze vidět, že v zimních měsících spotřeba narůstá a více se tedy projevují klimatické změny.



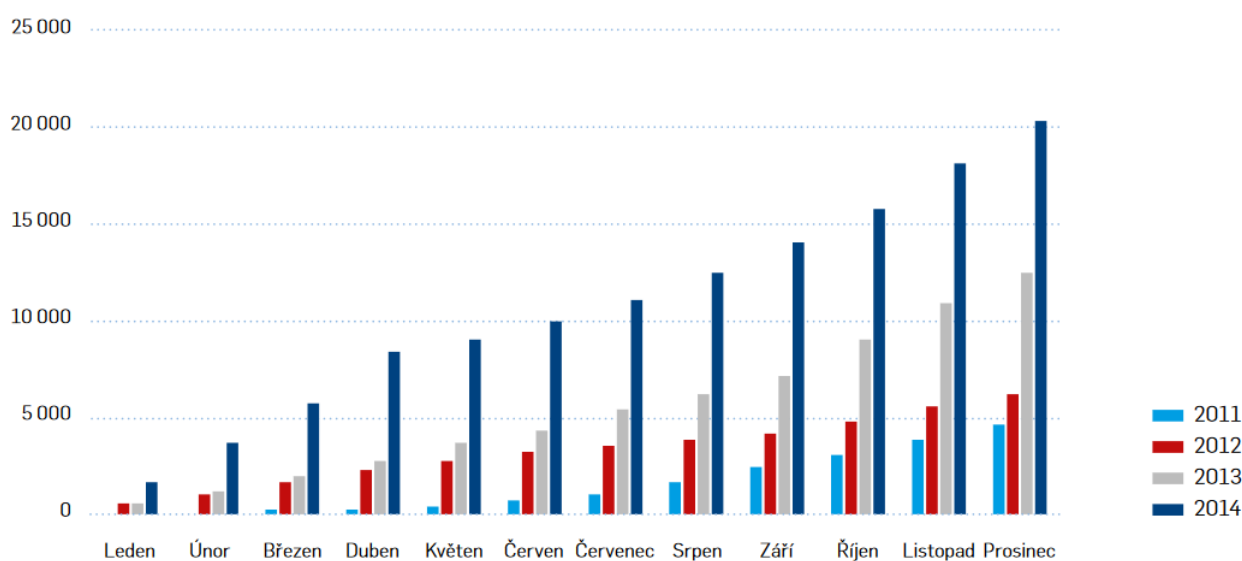
Obr. 18 – Proteklá energie TR Sever

9.2. Rozbor budoucího zatížení

Predikce spotřeby pro horizont do roku 2050 je dle zprávy OTE nárůst o 29 %. Zpráva počítá s výraznými úsporami ve výrobním sektoru (o 44 %), tak v sektoru domácností (průměrná roční úspora 1,5 % roční hodnoty spotřeby sektoru). Co se týká elektromobilů, tam lze očekávat přibližně 7 % tuzemské čisté spotřeby. [20]

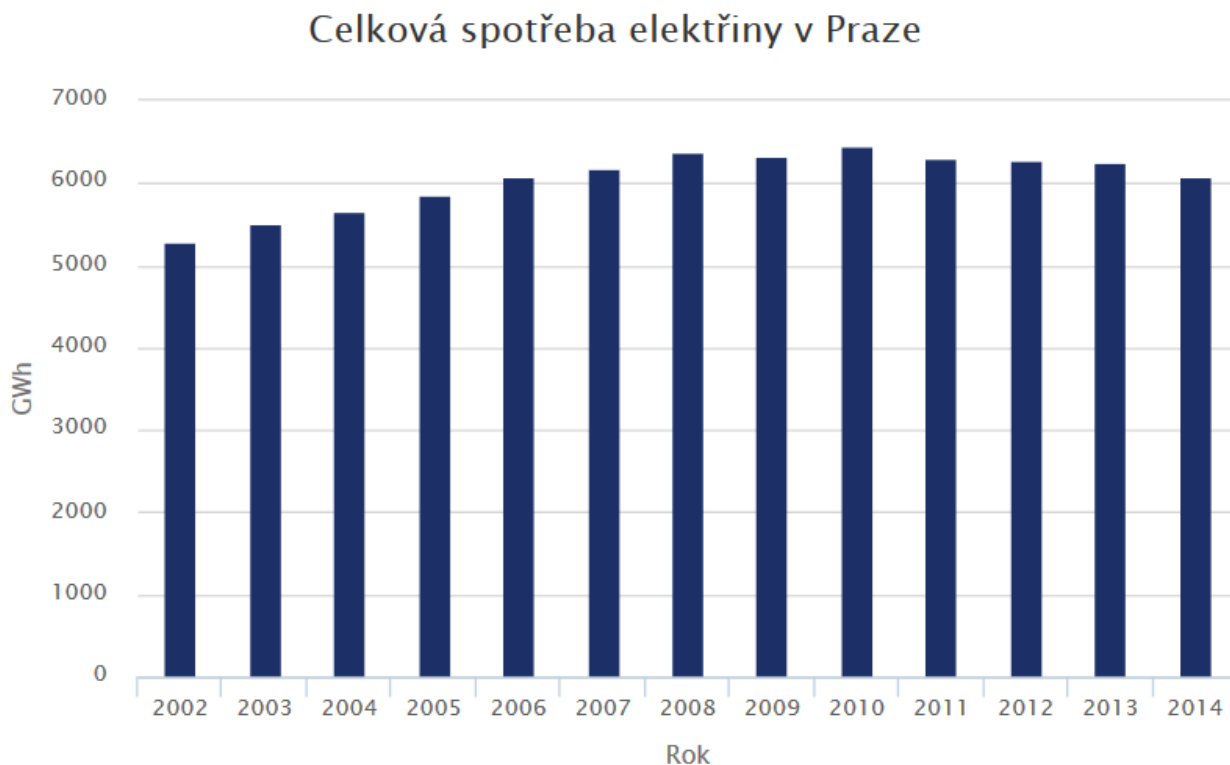
Graf znázorňuje růst nabíjecích stanic PRE pro elektromobily

Kumulativní odběr elektřiny v PREpointech po jednotlivých měsících v letech 2011–2014 (kWh)



Obr. 19 – Počet nabíjecích stanic [19]

Na grafu lze vidět vývoj spotřeby elektřiny v Praze, která má po roce 2008 tendenci stagnovat, což mohlo být způsobeno například finanční krizí a po roce 2010 má mírně klesající trend.



Obr. 20 – Spotřeba elektřiny v Praze [18]

Vzhledem k neustálému stavění nových bytů v Praze, rozvoji elektromobilů a vzhledem k predikci do roku 2050, jsem si ve své práci při výpočtech zvolil roční 1% růst zatížení, s tím že se nedopustím větší chyby.

10. Hospodárnost transformátorů

Transformátory představují v energetice významnou roli, proto jejich hospodárny provoz přispívá k hospodárnosti celé elektrizační soustavy. K řešení této problematiky má největší význam ohodnocení ztrát elektrického výkonu, které v transformátoru vznikají. Ztráty v transformátoru rozdělujeme na ztráty naprázdno a ztráty nakrátko.

10.1. Ztráty naprázdno (v železe)

Ztráty naprázdno (označované P_0 nebo P_{Fe}) se vyskytují vždy, když je transformátor pod napětím a jsou nezávislé na výši zatížení transformátoru a proto se také nazývají konstantními ztrátami.

Ztráty naprázdno rozdělujeme na:

1. **Hysterezní ztráty** - jsou příčinou nežádoucího zahřívání feromagnetických látek při jejich střídavém magnetování (zahřívání jádra transformátoru). Hysterezní ztráty jsou přímo úměrné obsahu plochy ohraničené hysterezní smyčkou. Tyto ztráty jsou tedy závislé na materiálu, z kterého je tvořeno jádro transformátoru a z tohoto důvodu se používá křemíková ocel, která má menší hysterezní ztráty než samotná ocel, ale zhoršuje zpracovatelnost materiálu (je křehčí). Hysterezní ztráty jsou redukovány i zpracováním materiálu jako je válcování za studena nebo krystalografická orientace zrn (zlepšení magnetických vlastností). Hysterezní ztráty jsou zodpovědné za více než polovinu (~50% až ~70%) ztrát naprázdno a jsou závislé na frekvenci a magnetické indukci.
2. **Ztráty vířivými proudy** - působením proměnného magnetického pole se začnou volné elektrony v kovovém vodiči pohybovat po kružnicích (proto vířivé proudy), při svém pohybu předávají část své energie krystalové mřížce a kov se začne ohřívat. Ztráty vířivými proudy klesají s druhou mocninou tloušťky plechu, proto jsou redukovány vytvořením jádra z tenkých navzájem izolovaných plátů, jsou zodpovědné za ~30% až ~50% ztrát naprázdno. Ztráty vířivými proudy jsou úměrné druhé mocnině kmitočtu a magnetické indukci.

10.2. Ztráty nakrátko (v mědi)

Ztráty nakrátko (označované P_k nebo P_{Cu}) jsou dány ohmickým odporem primárního a sekundárního vinutí cívky, ztráty vznikají průchodem proudu primárním a sekundárním vinutím, kde se přemění část energie na Jouleovo teplo a způsobuje oteplení vinutí. Velikost ztrát nakrátko se zvětšuje s druhou mocninou zatěžovacího proudu a je přímo úměrná odporu vinutí $P_k = RI^2$. Ztráty nakrátko mohou být redukovány zvětšením průřezu vodiče nebo snížením délky vodiče. Použitím měděného vinutí dosáhneme vhodné rovnováhy mezi cenou, odporem a velikostí. [8]

10.3. Celkové ztráty transformátoru

Ztráty průsakem izolací a dielektrické ztráty lze u transformátorů zanedbat, můžeme tedy říct, že celkové činné ztráty transformátoru P při plném zatížení lze vyjádřit jako:

$$P = P_0 + P_k \quad (10.1)$$

Kde	P	jsou	činné ztráty	[kW]
	P_0		činné ztráty naprázdno	[kW]
	P_k		činné ztráty nakrátko	[kW]

Ztráty proměnné P_z se zatížením jsou:

$$P_z = P_0 + P_{kn} \frac{S^2}{S_n^2} \quad (10.2)$$

Kde	P_{kn}	jsou	jmenovité ztráty nakrátko	[kW]
	S		zatížení transformátoru	[MVA]
	S_n		jmenovitý výkon transformátoru	[MVA]

Ztráty v síti vyvolané vlivem činných ztrát jsou malé, a proto se neuvažují, ale ztráty vyvolané vlivem jalového příkonu Q_z nelze u větších transformátorů (v mém případě 110/22 kV) zanedbat.

$$Q_z = Q_0 + Q_{kn} \cdot \frac{S^2}{S_n^2} \quad (10.3)$$

Kde	Q_z	jsou	jalové ztráty	[kVar]
	Q_0		jalové ztráty naprázdno	[kVar]
	Q_k		jalové ztráty nakrátko	[kVar]

přičemž

$$Q_{0n} = i_0 \cdot S_n \quad (10.4)$$

Kde	i_0	je poměrný proud naprázdno [%]
-----	-------	--------------------------------

$$Q_{kn} = u_k \cdot S_n \quad (10.5)$$

Kde i_0 je poměrný proud naprázdno [%]

Vyčíslení jalových ztrát je v praxi obtížné, a proto se s výhodou používá tzv. měrný činitel ztrát k_Δ vyjadřující měrné ztráty vyvolané 1 kVAr zatížením přepočítané na činné ztráty.

$$k_\Delta = \frac{P_z}{Q} \quad (10.6)$$

Kde k_Δ je měrný činitel ztrát [kW/kVAr]

P_z činné ztráty způsobené přenosem jalového výkonu [kW]

Q přenášený jalový výkon [kVAr]

Pro transformátory na napětí 22-110kV je $k_\Delta=0,15$. [PAVLOVSKY]

$$P_z = P_{0n} + k_\Delta Q_0 + (P_{kn} + k_\Delta Q_{kn}) \cdot \frac{S^2}{S_n^2} \quad (10.7)$$

A celkovou roční ztracenou energii W_z

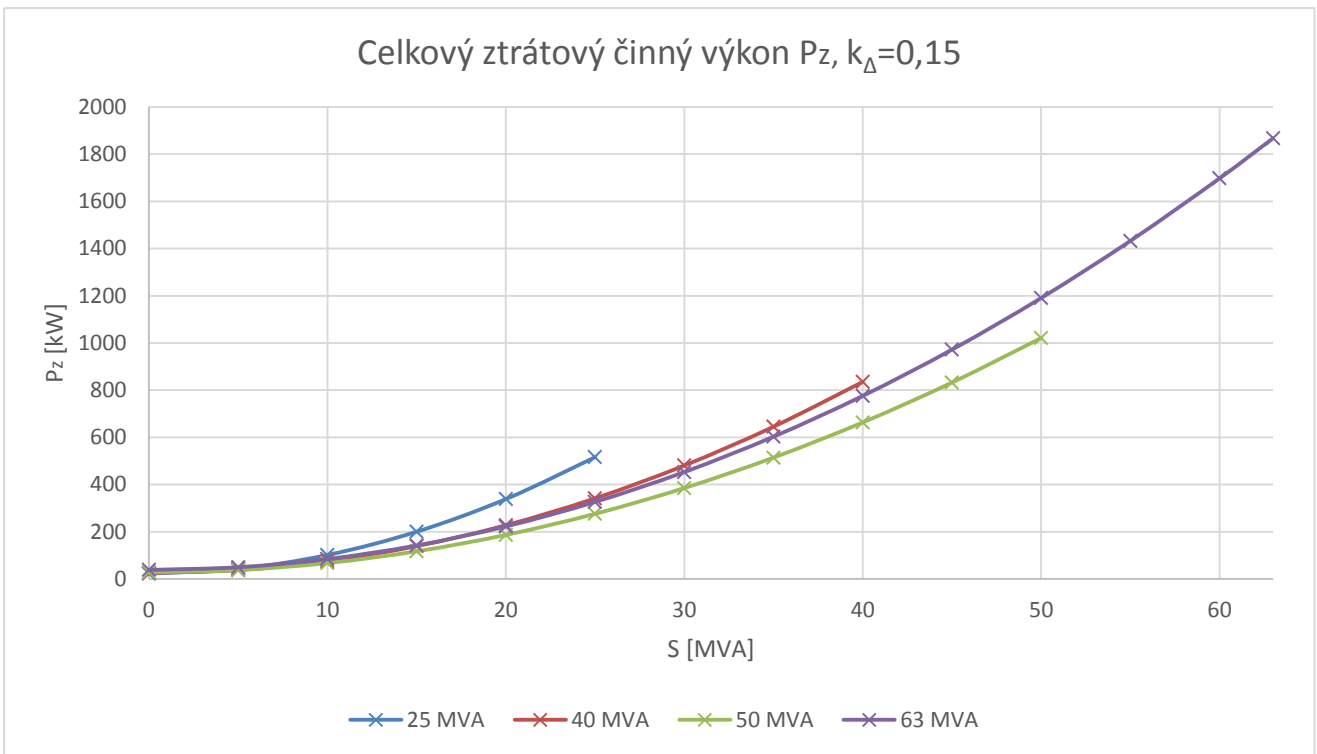
$$W_z = (P_{0n} + k_\Delta Q_0) \cdot T_r + (P_{kn} + k_\Delta Q_{kn}) \cdot \frac{S^2}{S_n^2} \cdot T_z \quad (10.8)$$

Kde W_z roční ztracená energie [kWh]

T_r doba provozu [h]

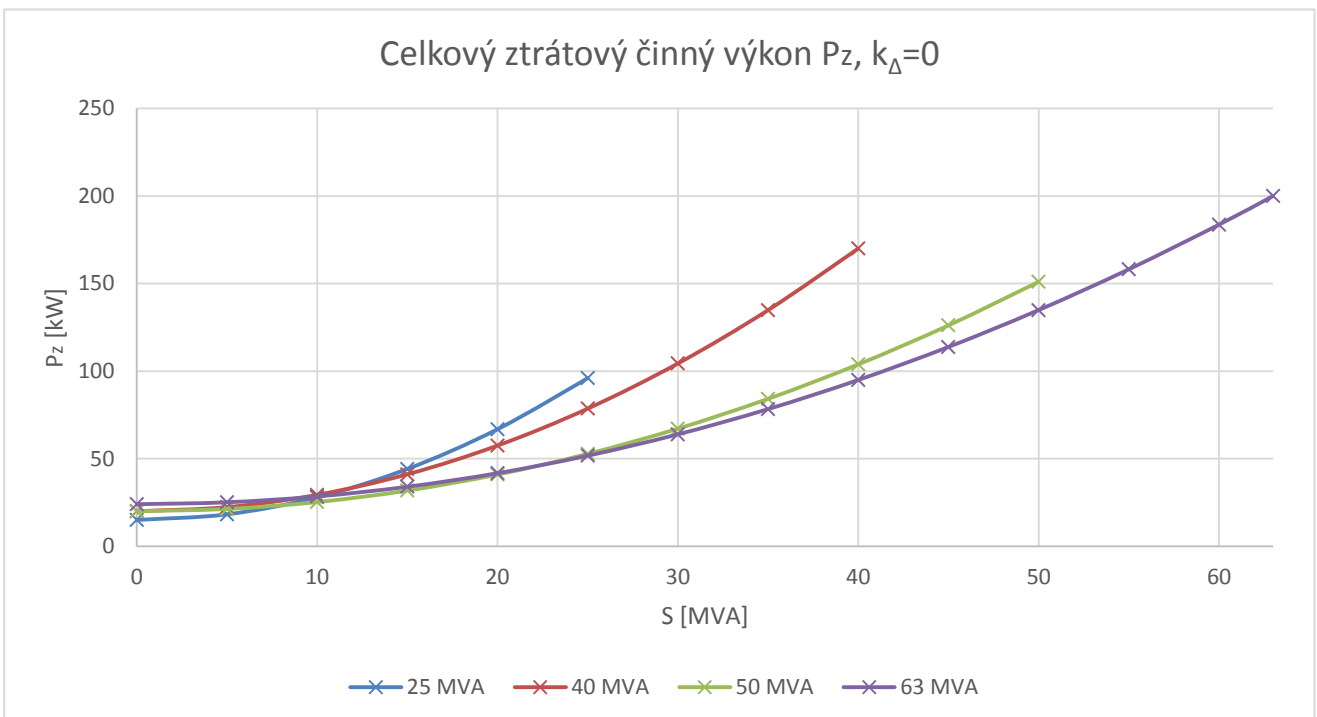
T_z doba plných ztrát [h]

Celkové ztráty způsobené provozem transformátoru při volbě $k_{\Delta}=0,15$ pro různé jmenovité výkony jsou zobrazeny na Obr. 21



Obr. 21 – Průběhy celkových ztrát

Jakého rozdílu se dopustíme při zanedbání jalových ztrát a tedy volba koeficientu $k_{\Delta}=0$ je na Obr. 22



Obr. 22 – Průběhy celkových ztrát při zanedbání jalových ztrát

10.4. Hospodárné zatížení transformátoru

Hospodárné zatížení transformátoru je takové zatížení, kdy jsou v transformátoru nejmenší měrné ztráty ΔP , tj. nejmenší poměr činných ztrát k přenášenému zdánlivému výkonu.

Rovnice měrných ztrát ΔP je tedy

$$\Delta P = \frac{P_z}{S} \quad [\text{kW/MVA}] \quad (10.9)$$

A rovnici měrných ztrát ΔP upravíme dle rovnice 10.7

$$\Delta P = \frac{P}{S} = \frac{P_0 + k_\Delta Q_0}{S} + \frac{(P_{kn} + k_\Delta Q_{kn}) \cdot S}{S_n^2} \quad [\text{kW/MVA}] \quad (10.10)$$

Nalezením první derivace rovnice a položením rovno 0 pro nalezení minima

$$\frac{d\Delta P}{dS} = -\frac{P_0 + k_\Delta Q_0}{S^2} + \frac{(P_{kn} + k_\Delta Q_{kn})}{S_n^2} = 0 \quad (10.11)$$

Dostáváme rovnici pro hospodárné zatížení transformátoru S_e

$$S_e = S_n \sqrt{\frac{P_0 + k_\Delta Q_0}{P_{kn} + k_\Delta Q_{kn}}} \quad [\text{MVA}] \quad (10.12)$$

Činitel hospodárného zatížení β_e je podíl přenášeného výkonu k jmenovitému zatížení S_n neboli:

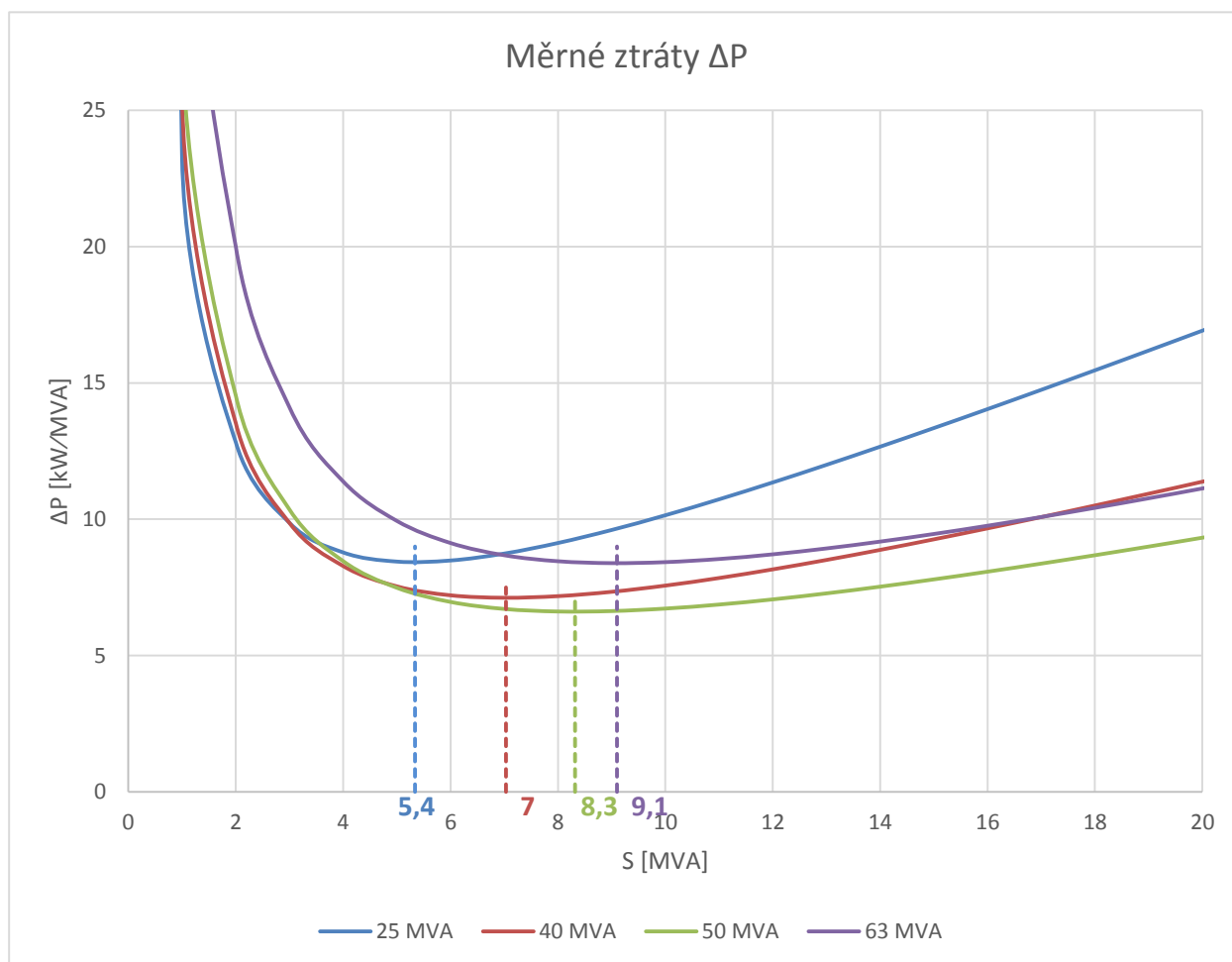
$$\beta_e = \frac{S_e}{S_n} = \sqrt{\frac{P_0 + k_\Delta Q_0}{P_{kn} + k_\Delta Q_{kn}}} \quad [-] \quad (10.13)$$

V Tab. 7 je vypočítané hospodárné zatížení transformátorů S_e 110/22kV společně s činitelem hospodárném zatížení β_e . Dále měrné ztráty ΔP při zatížení transformátoru, které je rovno hospodárnému a měrné ztráty při jmenovitém výkonu.

S_n	P_0	P_k	U_k	I_o	S_e	β_e	ΔP při $S=S_e$ [kW/MVA]	ΔP při $S=S_n$ [kW/MVA]
25 MVA	15 kW	81 kW	11,0%	0,200%	5,34	0,21	8,43	20,64
40 MVA	20 kW	150 kW	11,0%	0,084%	7,03	0,18	7,12	20,88
50 MVA	20 kW	131 kW	11,5%	0,100%	8,32	0,17	6,61	20,42
63 MVA	24 kW	176 kW	17,5%	0,150%	9,1	0,14	8,39	29,65

Tab. 7 Hospodárné zatížení transformátorů

Následující graf zobrazuje měrné ztráty transformátorů při volbě $k_\Delta=0,15$ s vyznačenými hodnotami hospodárného zatížení S_e



Obr. 23 – Průběhy měrných ztrát v transformátoru

10.5. Hospodárné zatížení paralelně pracujících skupiny transformátorů

Při paralelním chodu musí být splněny podmínky paralelního chodu transformátorů, viz kapitola 3.7.

Paralelní chod se používá, nestačí-li transformátor dodávat elektrický výkon při nerovnoměrném zatížení například během dne, týdne a roku, kdy použití pouze jednoho samostatně pracujícího transformátoru by bylo ekonomicky i technicky nevýhodné.

Určením optimálního počtu transformátorů pro konkrétní zatížení, lze podstatně snížit ztráty elektrické energie při transformaci. Řeší se tedy problém, při jakém zatížení S lze snížit ztráty odpojením paralelně pracujícího transformátoru nebo naopak při jakém zatížení S je vhodné připojit paralelně pracující transformátor.

Výkon, při kterém je z hlediska ztrát vhodné odpojit resp. připojit paralelně pracující transformátor, nazýváme přechodový výkon $S_{př}$.

Při paralelní práci transformátorů má skupina n násobné ztráty naprázdno P_0 a $\frac{1}{n}$ násobné ztráty nakrátko P_k .

Celkové ztráty transformátoru P_{zn} , při respektování jalové složky vyjádříme jako:

$$P_{zn} = n \cdot (P_{0n} + k_{\Delta} Q_0) + \frac{1}{n} (P_{kn} + k_{\Delta} Q_{kn}) \cdot \frac{S^2}{S_n^2} \quad [\text{kW}] \quad (10.14)$$

Kde n je počet transformátorů

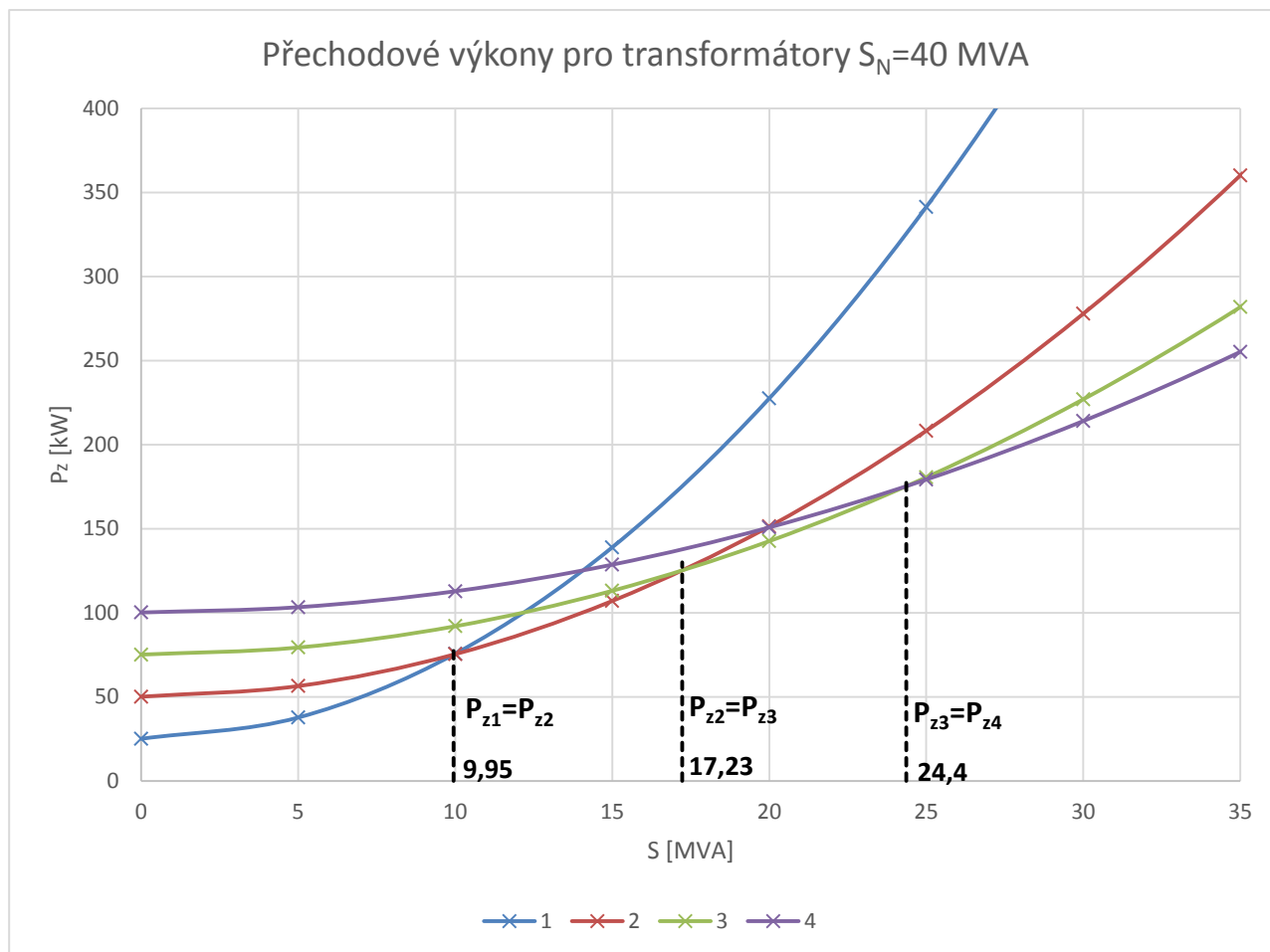
Vyřešením rovnice $P_z = P_{zn}$ ve všeobecném tvaru:

$$(n - 1) \cdot (P_{0n} + k_{\Delta} Q_0) + \frac{1}{n - 1} (P_{kn} + k_{\Delta} Q_{kn}) \cdot \frac{S^2}{S_n^2} = n \cdot (P_{0n} + k_{\Delta} Q_0) + \frac{1}{n} (P_{kn} + k_{\Delta} Q_{kn}) \cdot \frac{S^2}{S_n^2} \quad (10.15)$$

Dostaneme tvar pro přechodový výkon $S_{př}$

$$S_{př} = S_n \sqrt{(n - 1) \cdot n \frac{P_0 + k_{\Delta} Q_0}{P_{kn} + k_{\Delta} Q_{kn}}} \quad [\text{MVA}] \quad (10.16)$$

Na Obr. 24 jsou znázorněny průběhy ztrát jednoho až čtyř paralelně zatížených transformátorů o jmenovitém výkonu $S_n=40$ MVA. Přechodové výkony jsou vypočteny a znázorněny v grafu, kde $P_{z1}=P_{z2}$ znamená přechodový výkon mezi jedním a dvěma paralelně pracujícími transformátory, $P_{z2}=P_{z3}$ je přechodový výkon mezi dvěma a třemi pracujícími transformátory a podobně.



Obr. 24 – Přechodové výkony transformátorů

Přechodové výkony tedy z hlediska ztrát teoreticky rozhodují o optimálním provozu již instalovaných transformátorů. V provozu ale nastává zásadní problém se spolehlivostí, kdy v případě výpadku transformátoru musí být zbylé transformátory schopny převzít zatížení a ne vždy je časté připojování a odpojování transformátorů účelné, když dochází k opotřebení přepínače. Transformátory napájí svoji vlastní oblast, za normálního provozu nejsou na straně nižšího napětí propojeny kvůli vyrovnávacím proudům a fungují jako paprsková síť. Pokud nastane situace, že jeden transformátor vypadne, na straně nižšího napětí se síť propojí a jsme schopni napájet oblast jediným transformátorem a taková situace se vyřeší mnohem rychleji, pokud jsou oba transformátory v provozu. V případě kdyby oba transformátory napájely stejnou oblast sítě a provozovali bychom pouze jediný transformátor, tak by v případě poruchy nastal delší výpadek.

11. Investiční náklady

Cena transformátoru se soutěží jako celková za dodání a instalaci, takže do investičních nákladů transformátoru budu zahrnovat kupní cenu transformátoru, dopravu a následnou montáž. V případě výměny transformátoru budu uvažovat, že cena bude stejná i vzhledem k demontáži starého transformátoru.

Nový transformátor							
Sn	P ₀	P _k	U _k	I _o	Výrobce	Převod	Cena
25 MVA	15 kW	81 kW	11,0%	0,200%	SGB	110/23/6,3 kV	12 100 000 Kč
40 MVA	20 kW	150 kW	11,0%	0,084%	SGB	110/23/6,3 kV	13 900 000 Kč
50 MVA	20 kW	131 kW	11,5%	0,100%	SGB	110/23/6,3 kV	16 600 000 Kč
63 MVA	24 kW	176 kW	17,5%	0,150%	ETD	110/23/6,3 kV	16 800 000 Kč

Tab. 8 Ceník transformátorů 110/22kV (zdroj: obchod.cezlogistika.cz)

11.1. Stanoviště

Náklady na stavbu stanoviště transformátorů VVN/VN různých výkonů se nebudou příliš lišit v závislosti na instalovaném výkonu, protože např. u PREdistribuce se stavějí předimenzovaná stání, ať už kvůli snížení hlučnosti nebo se výhledově počítá s rozšířením na transformátor většího výkonu.

Práce + materiál	Cena bez DPH
Zemní práce	
Základy	
Konstrukce	
Úpravy povrchů, podlah	
Přesun hmot	
Mezisoučet	4 419 539Kč
Izolace proti vodě	
Akustická a proti otřesová opatření	
Elektromontáže	
Vzduchotechnika	
Konstrukce	
Povrchové úpravy	
Mezisoučet	2 365 574Kč
Vedlejší náklady	
Mezisoučet	1 925 000Kč
Celkem	8 710 113Kč

Tab. 9 Ceník stanoviště (zdroj: konkrétní projekty pro transformátor 63MVA společnosti PREdistribuce a. s.)

12. Provozní náklady

Do provozních nákladů zahrnujeme údržbu, revize, opravy a obsluhu transformátoru. Při svých výpočtech předpokládám, že údržba nového transformátoru představuje 1 % z investičních nákladů. Starší transformátory mají provozní náklady 4 krát větší než nový transformátor.

Bezporuchový provoz transformátoru závisí v rozsáhlé míře na pravidelném a pečlivém provádění kontrol a práci údržby. Následující seznam je třeba provádět pravidelně každý rok při údržbě a revizi transformátoru.

12.1. Práce údržby - těsnost a čistota

Zkontroluje se nepropustnost pro olej u veškerých přírub, těsnících míst a svarů, pokud se vyskytnou netěsnosti, je potřeba okamžité dotažení šroubů, výměna těsnění nebo dodatečná oprava svaru od specializované firmy. Kontroluje se armatura, průchodky, přepínač odboček a indikátor stavu oleje.

12.2. Údržba a zkouška kontrolních zařízení

Kontrola funkce indikátoru stavu oleje, kontroluje se znečištění vysoušeče vzduchu pro konzervátor, vysoušeč vzduchu s ohřevem (pokud je obsažen).

Buchholzovo relé je vybaveno zkušebním zařízením, které umožňuje provádět z vnějšku samostatnou kontrolu funkce obou kontaktních systémů, i když je kryt relé zcela naplněn olejem. Kontrola olejových usazenin vlivem stárnutí oleje, usazenina na spodní části relé omezuje funkci klapkového uzávěru.

Kontrola ochranného relé zátěžového přepínače, kdy se kontroluje zareagování ochrany přepínače. Kontroluje se funkce ukazovacích teploměrů pro teploty oleje, vinutí a sepnutí kontaktů u čidla oleje, proudění vzduchu, vody (jsou-li obsažena) a průsaku.

Ventilátor je zpravidla bez údržby, je třeba zabránit delším dobám stání, doporučuje se uvést ventilátory 1x za měsíc na minimálně 2 hodiny do provozu, aby se odpařila vlhkost (kondenzát). Ventilátor by měl být chráněn před velkými teplotními rozdíly a před možností vniknutí vody.

12.3. Údržba / Zkouška chladících zařízení

Provádí se revize stupňového přepínače, přepojovače odboček, kdy se časem potáhnou části kontaktů cizí vrstvou, ta může zvyšovat teplotu kontaktů. Je třeba aspoň jednou za rok využít příležitostných přestávek při provozu a postupným přepínáním projet celý rozsah nastavení, když je transformátor bez napětí, aby se kontakty očistily od cizí vrstvy. Kontrola nátěru proti korozi, upevnění zemních šroubů. Za účelem kontroly průrazného napětí a chemických, fyzikálních vlastností izolační kapaliny se odebere vzorek oleje. [15]

13. Ekonomika návrhu optimální velikosti transformátoru

Pro určení optimální velikosti transformátoru platí, že jeho výrobní náklady za dobu ekonomické životnosti budou minimální. K určení optimální velikosti nově instalovaného transformátoru jsou tedy rozhodující náklady, které můžeme rozdělit do 3 složek:

- 1) Investiční náklady N_{INV} zahrnující náklady na: stanoviště, transformátor, dopravu a montáž.
- 2) Provozní náklady N_p zahrnující údržbu, revize, obsluhu a opravy transformátoru.
- 3) Náklady na ztráty v transformátoru.

Vycházím z kritéria minimálních výrobních nákladů

$$N_{vyr} = \sum_{T=1}^{T_z} \frac{(N_p + N_z)}{(1+r)^T} + N_{INV} \rightarrow \text{MIN} \quad (13.1)$$

Kde	N_{INV}	jsou	investiční náklady [Kč]
	N_p		provozní náklady [Kč]
	N_z		náklady na ztráty [Kč]
	T_z		doba životnosti

13.1. Náklady s konstantním maximálním zatížením

Za předpokladu, kdyby se roční maximální zatížení, náklady na ztráty a provozní náklady transformátoru neměnily v jednotlivých letech během životnosti, můžeme s výhodou použít roční průměrné náklady. Kdy pro ocenění ročních nákladů po dobu životnosti transformátoru a zohlednění časové hodnoty peněz, vynásobíme investiční náklady poměrnou anuitou.

$$N_{vyr,roční} = a \cdot N_{INV} + N_p + P_o \cdot T \cdot c + P_{kn} \frac{S_m^2}{S_n^2} \cdot T_z \cdot c \quad [\text{Kč/rok}] \quad (13.2)$$

Kde	a	je	poměrná anuita [-]
	c		cena za kWh ztrát elektrické energie [Kč/kW]
	P_o		jmenovité ztráty naprázdno [kW]
	P_{kn}		jmenovité ztráty nakrátko [kW]
	S_m		maximální roční zatížení [MVA]
	T		roční doba provozu $T=8760h$
	T_z		doba plných ztrát [hod]

Poměrnou anuitu a vypočteme jako

$$a = \frac{q^n \cdot (q - 1)}{q^n - 1} \quad (13.3)$$

Kde q je 1+úroková míra za časovou jednotku [-]
 n počet období (životnost transformátoru) [-]

13.1.1. Určení doby plných ztrát

Zatížení transformátoru má samozřejmě proměnlivý průběh během dne, měsíce i roku.

Způsob určení doby ztrát je dán vzorcem dle normy ČSN 341610:

$$T_z = \left[0,2 \frac{T_m}{T} + 0,8 \left(\frac{T_m}{T} \right)^2 \right] \cdot T \quad (13.4)$$

kde T doba provozu, obvykle se počítá 8760 hodin
 T_m doba užívání maxima

13.2. Náklady s konstantním přírůstkem maximálního zatížení

Za předpokladu, kdyby se měnilo jen roční maximální zatížení po celou dobu životnosti a to s konstantním přírůstkem o 1%, pak můžeme rovnici 13.1 upravit a pro celkové výrobní náklady za dobu životnosti bude platit:

$$N_{\text{vyr}, T_z} = N_{\text{INV}} + (N_p + P_o \cdot T \cdot c) \cdot z + z_{\text{II}} \cdot (P_{\text{kn}} \frac{S_m^2}{S_n^2} \cdot T_z \cdot c) \quad (13.5)$$

Kde z je zásobitel [-]
 z_{II} zásobitel druhého řádu (pro růst zatížení 1%)

$$z_{\text{II}} = \frac{(1 + \chi)^{2T_z} - (1 + r)^{T_z}}{(1 + r)^{T_z} \cdot [(1 + \chi)^2 - (1 + r)]} \quad (13.6)$$

kde r je diskont
 χ konstantní míra růstu zatížení

13.3. Cena pro krytí ztrát v ES

Pro ekonomické výpočty je nutné stanovit cenu pro krytí ztrát. Klasické konvenční zdroje jsou vytlačovány podporovanými obnovitelnými zdroji, které jsou masivně podporovány v rámci politiky Energiewende. Cílem je minimalizace ekologických, společenských a zdravotních problémů, které jsou spojené s konvenční energetikou. Německá energetická přeměna, která má vysokou podporu veřejnosti, počítá s tím, že se 80 % hrubé spotřeby energie vyrobí z obnovitelných zdrojů. Cena elektřiny na burze má tedy poslední roky klesající tendence.

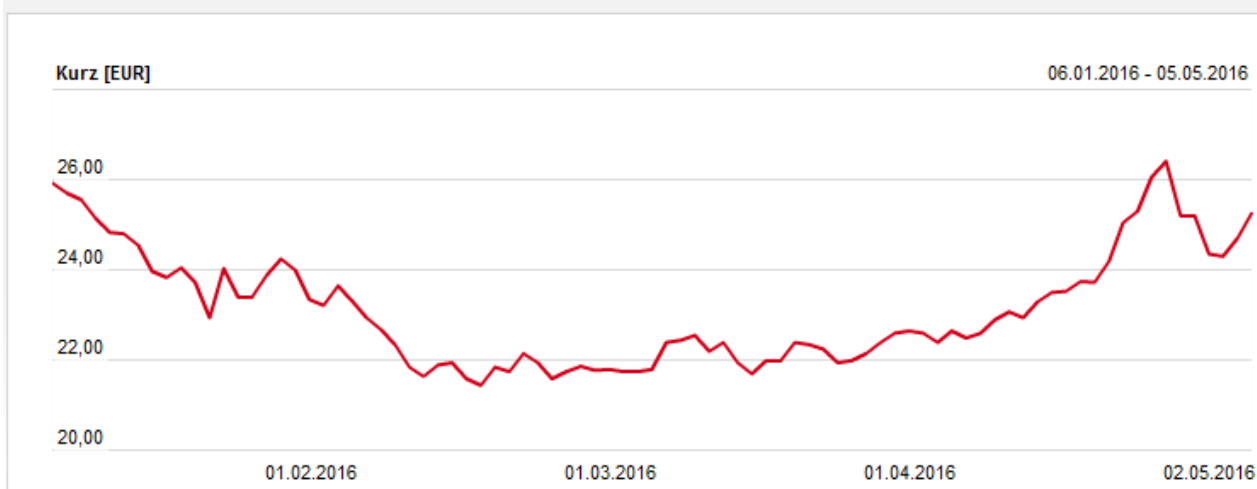
F PXE CZ BL CAL-17



Obr. 25 – Vývoj ceny elektřiny za poslední roky [21]

Nicméně v posledních měsících lze sledovat „odraz od dna“, kdy se cena elektřiny dostala na minimum 17. 2. 2016 při ceně 579,79 Kč/MWh (21,45 EUR/MWh)

F PXE CZ BL CAL-17



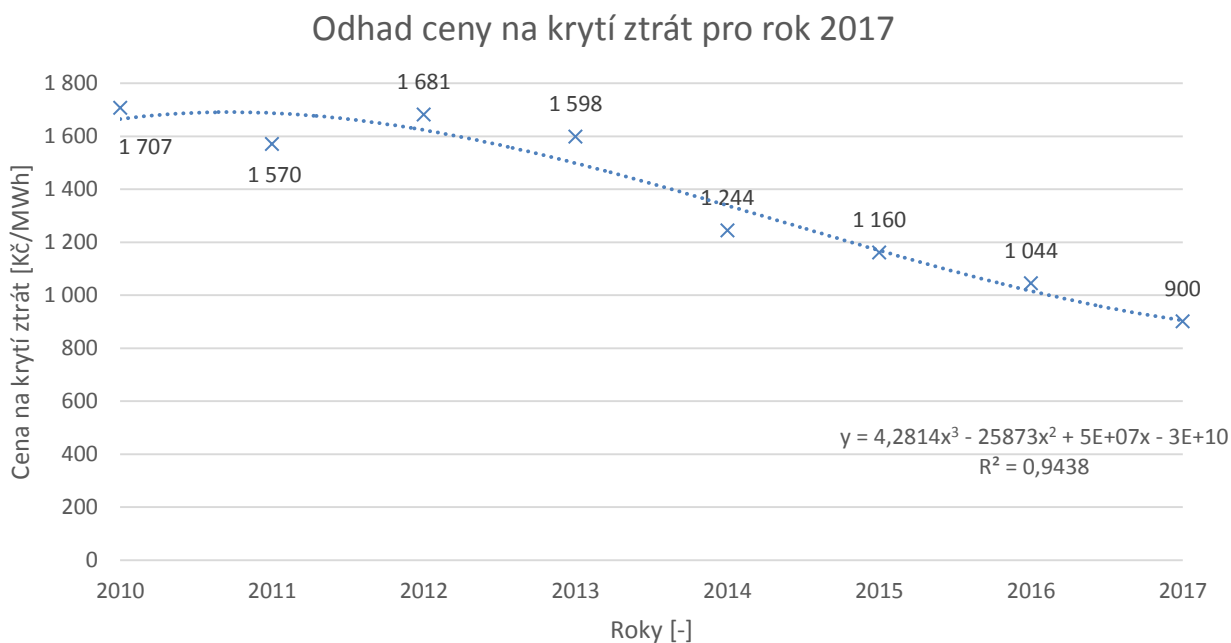
Obr. 26 – Vývoj ceny elektřiny za poslední měsíce 2016 [21]

Ceny, které byly stanoveny ERÚ v minulých letech ukazuje Tab. 10

rok	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017
cena v Kč/MWh	1 707,00	1 570,00	1 681,22	1 598,15	1 243,51	1 159,92	1 043,72	?

Tab. 10 Ceny pro krytí ztrát (zdroj: konzultace u distributora)

Lze očekávat, že vzhledem k vývoji na burze cena pro rok 2017 opět klesne.



Obr. 27 – Odhad ceny na krytí ztrát pro rok 2017

Pomocí proložení cen na krytí ztrát v jednotlivých letech z Tab. 10 lze získat technický odhad ceny na ztráty pro rok 2017 a to na ceně 900 Kč/MWh. Předpokládám, že se cena silové elektřiny nachází blízko minima a bude se postupně zvyšovat, proto ve svých výpočtech při ekonomické analýze návratnosti výměny transformátoru použiji roční 1% růst nákladů na ztráty. Při ekonomické analýze určení optimální velikosti a počtu paralelně pracujících transformátorů jsem použil zjednodušující předpoklad konst. nákladů na krytí ztrát viz následující kapitola 13.4.

Cena na pokrytí ztrát by šla teoreticky snížit:

1. Elektronická aukce na dodavatele elektřiny pro krytí ztrát (příkladem společnost ČEPS, a.s.), ČEPS nakoupil roční pásmo na rok 2016 za cenu 855 Kč/MWh, rozdíl oproti stanovené ceně ERÚ 1 043 Kč/MWh viz. Tab. 10 je 188 Kč/MWh.
2. Nákup na burze - cena silové elektřiny se pohybuje v pásmu 610 až 690 Kč/MWh, kam se u NN posunula začátkem dubna a u VN počátkem března. Kurz jednoletého kontraktu v NN se uzavíral v 15. týdnu 2016 na úrovni 681 Kč/MWh, ve VN na 679 Kč/MWh.
3. Vlastní výroba elektřiny - Prostřednictvím akvizice např. FVE, MVE,...

13.4. Optimální velikost a počet transformátorů pro jednotlivé transformovny

Následující kapitola určuje optimální velikost a počet paralelně instalovaných transformátorů pro jednotlivé transformační stanice společnosti PRE distribuce. Počítám celkové výrobní náklady transformátorů 4 typových řad (25 MVA, 40 MVA, 50 MVA, 63 MVA) za životnost, která jak již bylo řečeno, je odpozorována společností PREdi na 40 let. Při navrhování nejlepší ekonomické efektivity jednotlivých transformačních stanic, tedy hledám nejmenší výrobní náklady jednotlivých typových řad při jejich optimálním instalovaném počtu.

Při výpočtu jsem respektoval jalové ztráty, které jsou přepočítané na činné pomocí koeficientu k_{Δ} , vznikající provozem transformátorů a konstantní roční přírůstek maximálního zatížení transformátoru o 1 %. Z důvodu projektování transformoven na dobu životnosti 40 let a tím složité predikci vývoje nákladů na krytí ztrát, jsem použil zjednodušující předpoklad, kdy jsem zvolil konst. cenu nákladů na ztráty 1000 Kč/MWh.

Použité předpoklady:

- minimálně se instalují 2 paralelně pracující transformátory z důvodu spolehlivosti
- maximálně je možné nainstalovat 6 transformátorů z důvodu velké náročnosti na místo a náklady spojené se stanovištěm
- v případě výpadku jednoho transformátoru jsou zbylé transformátory schopny zajistit požadovaný výkon
- přetížitelnost transformátorů v případě výpadku je o 20 %
- pro danou transformovnu se použijí transformátory stejného výkonu
- cena stanoviště je stejná pro všechny typy transformátorů (stavějí se předimenzovaná stání z důvodu možné budoucí výměny za výkonnější transformátor)
- nastavitelná rezerva výkonu (zvoleno 30 % a 50 %, v excelu lze posuvníkem libovolně měnit)
- konstantní přírůstek maximálního zatížení transformátoru po celou dobu jeho životnosti je 1 %

Celkové náklady N_{vyr} tedy zohledňují celkové náklady za dobu životnosti s respektováním časové hodnoty peněz.

$$N_{\text{vyr}} = n \cdot n_{\text{pi}} + n_{\text{ti}} \cdot \frac{1}{a} + n \cdot (n_{\text{s}} + n_{\text{ti}}) + n \cdot T_{\text{r}} \cdot \frac{c_{\text{ztr}}}{1000} \cdot (P_{\text{oi}} + i_{\text{oi}} \cdot k_{\Delta} \cdot 1000 \cdot S_{\text{ni}}) \cdot \frac{1}{a} + \frac{1}{n} \cdot T_{\text{z}} \cdot \frac{c_{\text{ztr}}}{1000} \cdot z_{\text{II}} \cdot (P_{\text{kni}} \frac{S_{\text{m}}^2}{S_{\text{ni}}^2} + u_{\text{ki}} \cdot k_{\Delta} \cdot 1000 \cdot S_{\text{ni}}) \quad [\text{Kč}] \quad (13.7)$$

kde	n	je	počet transformátorů [-]
	$\frac{1}{a}$		vyjadřuje zásobitele za dobu $T_{\text{ž}}$
	n_{ti}		cena i-tého transformátoru [Kč]
	n_{s}		cena stanoviště transformátoru [Kč]
	P_{oi}		jmenovité ztráty naprázdno i-tého transformátoru [kW]
	P_{kni}		jmenovité ztráty nakrátko i-tého transformátoru [kW]
	I_{oi}		poměrný proud naprázdno i-tého transformátoru [%]
	U_{ki}		poměrné napětí nakrátko i-tého transformátoru [%]
	z_{II}		zásobitel druhého řádu (pro růst zatížení 1%)
	n_{pi}		provozní náklady i-tého transformátoru [Kč]
	T_{r}		doba provozu [h]
	T_{z}		doba plných ztrát [h]
	c_{ztr}		cena za ztráty [Kč/MWh]
	k_{Δ}		koeficient přepočtu jalových ztrát na činné

13.5. Výpočet

Kriteriální funkce ve tvaru minimalizace výrobních nákladů:

$$N_{\text{vyr}} \rightarrow \text{MIN}$$

Podmínky:

$P_m \leq (1 + 20\%) \cdot S_{ni} \cdot n - S_{ni}$ (maximální výkon musí být menší, než možné přetížení 20% jmenovitého výkonu í-tého transformátoru nebo skupiny paralelně pracujících transformátorů – možný výpadek 1 transformátoru)

$P_m \leq n \cdot S_{ni}$ (maximální výkon musí být menší než n krát jmenovitý výkon í-tého transformátoru nebo skupiny paralelně pracujících transformátorů)

$$1 - \frac{P_m}{n \cdot S_{ni}} \geq 30\% \text{ (minimální rezerva výkonu transformovny nastavena na 30\%)}$$

$n \in \{2,3,4,5,6\}$ (počet transformátoru je přirozené číslo, minimální počet je 2 a maximální je 6)

Parametry k výpočtu	
T_r	8760 h (rok)
T_z	40 let
WACC	6,44%
C_{ztr}	1243,51 Kč/MWh
Měrné provozní náklady n_p	1%
růst zatížení	1,0%
poměrná anuita	0,07
zásobitel 2. řádu pro T_z a růst spotřeby 1 % z_{II}	18,45
k_{Δ} (pro přepočtení jalových ztrát na činné na hladině 110/22 kV)	0,15
Cena stanoviště n_s	8 710 113 Kč

Vysvětlivky: T_r doba provozu
 T_z životnost transformátoru
 C_{ztr} cena za ztráty
 k_{Δ} koeficient přepočtu jalových ztrát na činné

13.6. Výsledek optimalizace

Rezerva 30 %	25 MVA		40 MVA		50 MVA		63 MVA	
	Náklady	Počet transformátorů	Náklady	Počet transformátorů	Náklady	Počet transformátorů	Náklady	Počet transformátorů
Běchovice	86,29 mil.	3	74,95 mil.	2	84,58 mil.	2	105,69 mil.	2
Černý Most	88,39 mil.	3	79,48 mil.	2	90,18 mil.	2	116,18 mil.	2
Červený Vrch	89,12 mil.	3	79,80 mil.	2	89,70 mil.	2	114,56 mil.	2
Holešovice	168,35 mil.	6	133,35 mil.	4	118,82 mil.	3	135,93 mil.	3
Chodov	114,01 mil.	4	101,69 mil.	3	90,76 mil.	2	113,83 mil.	2
Jih	nelze	nelze	137,74 mil.	4	146,84 mil.	4	141,74 mil.	3
Jinonice	118,26 mil.	4	108,08 mil.	3	100,80 mil.	2	131,08 mil.	2
Karlov	88,93 mil.	3	80,72 mil.	2	91,77 mil.	2	119,19 mil.	2
Letňany	86,11 mil.	3	75,49 mil.	2	85,87 mil.	2	108,65 mil.	2
Lhotka	112,65 mil.	4	99,60 mil.	3	87,41 mil.	2	107,99 mil.	2
Malešice	111,52 mil.	4	79,40 mil.	2	88,29 mil.	2	111,13 mil.	2
Měcholupy	88,80 mil.	3	78,53 mil.	2	87,73 mil.	2	110,54 mil.	2
Pankrác	88,31 mil.	3	77,96 mil.	2	87,38 mil.	2	110,15 mil.	2
Pražáčka	nelze	nelze	155,64 mil.	5	141,95 mil.	4	131,76 mil.	3
Sever	67,41 mil.	2	78,28 mil.	2	89,67 mil.	2	116,04 mil.	2
Smíchov	89,16 mil.	3	79,18 mil.	2	88,46 mil.	2	111,81 mil.	2
Střed	nelze	nelze	166,36 mil.	5	151,47 mil.	4	147,57 mil.	3
Třeboradice	57,49 mil.	2	65,83 mil.	2	75,50 mil.	2	90,55 mil.	2
Východ	67,44 mil.	2	82,08 mil.	2	96,93 mil.	2	131,83 mil.	2
Západ	142,16 mil.	5	109,40 mil.	3	118,40 mil.	3	126,39 mil.	2
Zbraslav	82,77 mil.	3	69,04 mil.	2	78,42 mil.	2	95,14 mil.	2
Zličín	64,32 mil.	2	74,06 mil.	2	84,59 mil.	2	106,67 mil.	2

Při nastavení rezervy na 50 % se situace následovně změní:

Rezerva 50 %	25 MVA		40 MVA		50 MVA		63 MVA	
	Náklady	Počet transformátorů	Náklady	Počet transformátorů	Náklady	Počet transformátorů	Náklady	Počet transformátorů
Běchovice	109,06 mil.	4	96,16 mil.	3	84,58 mil.	2	105,69 mil.	2
Černý Most	110,64 mil.	4	99,18 mil.	3	90,18 mil.	2	116,18 mil.	2
Červený Vrch	111,19 mil.	4	99,39 mil.	3	89,70 mil.	2	114,56 mil.	2
Holešovice	nelze	nelze	181,29 mil.	6	170,83 mil.	5	159,12 mil.	4
Chodov	160,48 mil.	6	124,77 mil.	4	112,36 mil.	3	130,33 mil.	3
Jih	nelze	nelze	184,21 mil.	6	173,47 mil.	5	163,48 mil.	4
Jinonice	163,32 mil.	6	129,56 mil.	4	119,04 mil.	3	141,83 mil.	3
Karlov	111,05 mil.	4	80,72 mil.	2	91,77 mil.	2	119,19 mil.	2
Letňany	108,93 mil.	4	75,49 mil.	2	85,87 mil.	2	108,65 mil.	2
Lhotka	159,58 mil.	6	123,20 mil.	4	110,12 mil.	3	126,44 mil.	3
Malešice	134,83 mil.	5	99,13 mil.	3	110,71 mil.	3	111,13 mil.	2
Měcholupy	134,37 mil.	5	98,54 mil.	3	110,34 mil.	3	110,54 mil.	2
Pankrác	110,58 mil.	4	98,17 mil.	3	87,38 mil.	2	110,15 mil.	2
Pražáčka	nelze	nelze	180,51 mil.	6	169,56 mil.	5	155,99 mil.	4
Sever	87,18 mil.	3	78,28 mil.	2	89,67 mil.	2	116,04 mil.	2
Smíchov	134,59 mil.	5	98,98 mil.	3	110,82 mil.	3	111,81 mil.	2
Střed	nelze	nelze	nelze	nelze	204,68 mil.	6	193,08 mil.	5
Třeboradice	57,49 mil.	2	65,83 mil.	2	75,50 mil.	2	90,55 mil.	2
Východ	67,44 mil.	2	82,08 mil.	2	96,93 mil.	2	131,83 mil.	2
Západ	nelze	nelze	130,55 mil.	4	143,24 mil.	4	138,71 mil.	3
Zbraslav	82,77 mil.	3	69,04 mil.	2	78,42 mil.	2	95,14 mil.	2
Zličín	85,12 mil.	3	74,06 mil.	2	84,59 mil.	2	106,67 mil.	2

Vysvětlivky: zeleně jsou označeny nejmenší náklady, počet potřebných transformátorů je ve vedlejší buňce, pokud buňka obsahuje „nelze“ znamená to, že pro dané max. zatížení P_m nelze vytvořit kombinace transformátorů, která by splňovala všechny podmínky. Např. Jih dosahuje $P_m=110$ MW, při použití 6x25 MVA (150 MVA) není splněna 30% rezerva ($1-110/150=27\%$) a více než 6 transformátorů nelze použít.

13.7. Porovnání výsledků

Následující tabulka porovnává současný stav transformoven s mým teoretickým výpočtem při rezervě 50 % na základě předpokladů viz kapitoly 13.4 a 13.5

Název TR vvn/vn	P_{inst} [MVA]	P_m [MW]	Využití transformace [%]	Současný stav	Teoretický návrh
Běchovice	120	44	38,6	3 x 40 MVA	2 x 50 MVA
Černý Most	80	41	53,9	2 x 40 MVA	2 x 50 MVA
Červený Vrch	80	47	61,8	2 x 40 MVA	2 x 50 MVA
Holešovice	252	105	43,9	4 x 63 MVA	4 x 63 MVA
Chodov	143	65	47,8	2 x 40 MVA + 1 x 63 MVA	3 x 50 MVA
Jih	189	110	61,3	3 x 63 MVA	4 x 63 MVA
Jinonice	143	64	47,1	2 x 40 MVA + 1 x 63 MVA	3 x 50 MVA
Karlov	126	40	33,4	2 x 63 MVA	2 x 40 MVA
Letňany	80	38	50,0	2 x 40 MVA	2 x 40 MVA
Lhotka	120	66	57,9	3 x 40 MVA	3 x 50 MVA
Malešice	120	54	47,4	3 x 40 MVA	3 x 40 MVA
Měcholupy	80	51	67,1	2 x 40 MVA	3 x 40 MVA
Pankrác	126	49	40,9	2 x 63 MVA	2 x 50 MVA
Pražáčka	189	114	63,5	3 x 63 MVA	4 x 63 MVA
Sever	80	34	44,7	2 x 40 MVA	2 x 40 MVA
Smíchov	126	51	42,6	2 x 63 MVA	3 x 40 MVA
Střed	252	130	54,3	4 x 63 MVA	5 x 63 MVA
Třeboradice	80	17	22,4	2 x 40 MVA	2 x 25 MVA
Východ	80	6	7,9	2 x 40 MVA	2 x 25 MVA
Západ	189	79	44,0	3 x 63 MVA	4 x 40 MVA
Zbraslav	80	36	47,4	2 x 40 MVA	2 x 40 MVA
Zličín	80	34	44,7	2 x 40 MVA	2 x 40 MVA

Tab. 11 Porovnání výsledků

Z výsledků je patrné, že se návrhy od sebe liší ve většině případech, nelze ale jednoznačně říci, jestli je současný stav správný nebo nikoliv. Transformovny se projektují s ohledem na budoucí zatížení daných lokalit. Je zapotřebí výhledově počítat s výstavbou např. průmyslových zón, sídlišť nebo jiných developerských plánů, které se ale nemusí uskutečnit, nicméně by se s nimi mělo počítat. Na odlišnosti výsledků přispívá i fakt, že jsem ve svých výpočtech použil 4 typové výkonové řady transformátorů a ne pouze řady 40 MVA a 63 MVA, které PREDi s výhodou používá na ušetření nákladů na logistiku a tím ušetří spojené vícenáklady.

14. Ekonomika výměny transformátoru

V této kapitole řeším, zdali se ekonomicky vyplatí výměna starého transformátoru, který má před sebou ještě technickou životnost za nový, který disponuje lepšími technickými parametry.

Výhodou nového transformátoru je tedy dosažení lepší účinnosti, kdy výměnou lze získat téměř poloviční ztráty na prázdko a cca o $\frac{1}{4}$ menší ztráty nakrátko, čímž získáme menší provozní náklady na ztráty. Nový transformátor dosahuje lepších provozních nákladů na opravy, revize a údržbu. Po konzultaci u distributora a s přihlédnutím do provozních zpráv jsem stanovil pokles provozních nákladů díky výměně starého transformátoru na jednu čtvrtinu.

Parametry nových transformátorů jsou v Tab. 12

Nový transformátor								
Sn	P ₀	P _k	U _k	I _o	Výrobce	Spojení	Převod	Cena
25 MVA	15 kW	81 kW	11,0%	0,200%	SGB	YNyn0/d1	110/23/6,3 kV	12 100 000 Kč
40 MVA	20 kW	150 kW	11,0%	0,084%	SGB	YNyn0/d0	110/23/6,3 kV	13 900 000 Kč
50 MVA	20 kW	131 kW	11,5%	0,100%	SGB	YNyn0/d1	110/23/6,3 kV	16 600 000 Kč
63 MVA	24 kW	176 kW	17,5%	0,150%	ETD	YNyn0/d1	110/23/6,3 kV	16 800 000 Kč

Tab. 12 Parametry nových transformátorů

Transformátor je téměř bezporuchový stroj a z dostupných informací nejsou známy fatální poruchy, kdy by došlo k nedodání dodávky elektrické energie zákazníkům právě kvůli poruše transformátoru typu 110/22 kV na území působení společnosti PREdi. Spolehlivost se díky výměně transformátoru tedy významně nezlepší a proto otázku spolehlivosti, kterou by nový transformátor vylepšil, nebudu v práci uvažovat.

Vysoké spolehlivosti se u transformátorů dosahuje i pravidelným sledováním oleje a jeho rozborem, čímž lze odhalit, zda vinutí nebo izolace degraduje a jestli hrozí porucha.

Samozřejmě s přibývajícím věkem transformátoru se riziko poruchy zvětšuje, ale životnost je stanovena na 40 let a s ohledem na fakt, že v Německu se stanovuje životnost i na 60 let, lze usoudit, že se spolehlivost zásadně nezmění.

Cena nového transformátoru se může lišit od projektu. To je dáno tím, že se kladou různé podmínky na hluk, parametry a každý rok se ceny mění dle cen materiálů. Ceny uvedeny v tabulce už jsou i s náklady na demontáž starého a připojení nového transformátoru.

Vzhledem k tomu, že PREdi používá transformátory o jmenovitém výkonu 40 MVA a 63 MVA, zaměřím se pouze na tyto dva typy (v kapitole Optimální velikost a počet transformátorů pro jednotlivé transformovny, lze vidět, jak se mění náklady při instalaci různých výkonových řad transformátorů pro jednotlivé transformátory).

Je důležité si připomenout, že se na PREdi vztahuje cenová regulace jakožto na

provozovatele distribuční soustavy. Energetický regulační úřad (ERU) vykonává cenovou regulaci, aby vytvořil transparentní a stabilní prostředí (zastoupil konkurenční prostředí), ať už se jedná o odvětví elektroenergetiky, ale i plynárenství. Výsledná cena elektřiny je složena z několika složek.

- silová elektřina, jejíž cena není regulovaná, je dána tržními principy
- doprava elektřiny od výrobce pomocí přenosové soustavy
- **doprava elektřiny k zákazníkovi pomocí distribuční soustavy (PREdi)**
- zajišťování systémových služeb (náklady na podpůrné služby)
- činnost operátora trhu
- podpora elektřiny z podporovaných zdrojů

Cílem regulace je tedy zajistit přiměřenou úroveň zisku, udržet dostatečnou kvalitu při efektivně vynaložených nákladech, podpořit investice a to i s ohledem na zákazníky.

Hodnota míry výnosnosti je stanovena jako vážený průměr nákladů na kapitál WACC.

$$WACC = \left(k_e \cdot \frac{E}{E + D} \right) + (1 - T) \cdot \left(k_d \cdot \frac{D}{D + E} \right) \quad (14.1)$$

Kde	k_d	je	cost of debt (náklady dluhového financování)
	k_e		cost of ekvity (náklady vlastního kapitálu)
	$\frac{E}{E+D}$		podíl vlastního kapitálu na celkovém kapitálu
	$\frac{D}{E+D}$		podíl dluhového kapitálu na celkovém kapitálu
	T		sazba daně z příjmu právnických osob

WACC stanovený ERU je pro odvětví elektroenergetiky po zdanění 6,44 % [22]

Životnost transformátoru je odpozorována společností PREdi na 40 let, to je doba nutné výměny transformátoru. Účetní doba odpisování je stanovena na 25 let. Účetní doba odpisování se stanovuje na očekávanou použitelnost transformátoru. Rozdíl mezi dobou životnosti a účetní dobou odpisu je nejspíše dán z historie, kdy nebylo možné přesně určit dobu životnosti a jednak s postupem vývoje, používáním kvalitnějších materiálů a výrobních technologií se v praxi prokazuje, že se doba životnosti zvětšuje, což je dáno samozřejmě i pravidelnými revizemi a prohlídkami. Rizikové komponenty, které podléhají většímu opotřebení, jako je např. přepínač odboček, se mohou během životnosti transformátoru vyměnit. Je otázkou zdali by se transformátor neměl odepisovat komponentně. Nejvíce odolnou částí transformátoru je nádoba se životností oněch 30-40 let, výměnu oleje bych dal do provozních nákladů v daném roce, ale regulátor napětí, který patří do nejvíce namáhané části transformátoru a pravděpodobně se po 15 letech bude měnit, jenž tvoří cca 10% část kupní ceny transformátoru, by se tedy měl účetně odepisovat 15 let. Je možné, že 25 let účetního odepisování je vážený průměr životnosti jednotlivých komponentů. Je nutné podotknout, že komponentní daňové odepisování není v ČR povoleno.

I doba odpisu se postupně prodlužuje, v minulosti se transformátor účetně odepisoval pod 20 let. V práci se tedy budu zabývat účetně odepsanými transformátory staršími 25 let. U mladších transformátorů bych musel znát výši účetních odpisů a novější transformátory disponují lepšími technickými parametry.

Transformátor patří do daňové odpisové skupiny 3 (položka 3-17) s dobou odpisu 10 let.

Při výpočtech vycházím z kritéria čisté současné hodnoty (NPV), kdy

$$NPV = \sum_{T=0}^{T_h} \frac{CF_T}{(1+r)^T} \quad (14.2)$$

Kde	T_h	je	doba porovnání
	CF_T		cash flow v jednotlivých letech
	r		diskont

Dále jsem použil kritérium roční ekvivalentní hodnoty (RCF), které by v případě kladné čisté současné hodnoty určilo, které transformátory by se vyplatilo vyměnit jako první podle nejvyššího RCF.

$$RCF = a_{Th} \cdot NPV \quad (14.3)$$

Kde a_{Th} je anuita za zbývající životnost daného transformátoru

K výpočtu ekonomiky výměny transformátoru jsem použil následující předpoklady:

Parametry k výpočtu	
T_r	8760 h (rok)
Daňové odpisy	10 let
Účetní odpisy	25 let
WACC	6,44 %
C_{ztr}	900 Kč/MWh viz. kapitola 13.3
Měrné provozní náklady n_p	1 %
růst zatížení	1 %
Růst nákladů na ztráty	1 %
Růst provozních nákladů	1%
Starý transformátor	4 krát větší provozní náklady
Daňová sazba	19 %
k_{Δ} (pro přepočtení jalových ztrát na činné na hladině 110/22 kV)	0,15

Tab. 13 Parametry k výpočtu

Vysvětlivky: T_r doba provozu
 C_{ztr} cena za ztráty
 k_{Δ} koeficient přepočtu jalových ztrát na činné

14.1. Systémová metoda

Projekt je hodnocený z pohledu celkového ekonomického efektu, kdy se nezabýváme financováním, daněmi, ani odpisy. Započítávají se jen efekty, kterých výměnou v systému opravdu dosáhnou, jako je úspora nákladů na ztráty, provozních nákladů a efekt měrných tržeb, které jsem ohodnotil proteklou energií a výkonem pro transformaci na hladině VVN/VN.

Při výpočtu tedy použiji princip měrných tržeb, které jsou založeny na úměrnosti měrných tržeb vzhledem k nákladům na jednotlivé napěťové hladiny. Jedná se o náklady, které v prvcích elektrizační soustavy vyvolají přenos a distribuce elektrické energie.

Ve výpočtu jsem použil měrné tržby pro příslušnou hladinu 110/22 kV, kde jsem odhadl, že náklady na transformátor a stanoviště tvoří třetinu měrné hodnoty, která přísluší na daný napěťový stupeň. Měrné tržby za výkon jsem tedy zvolil 200Kč/kW.rok a měrné tržby za práci na 0,01 Kč/kWh. Měrné tržby jsou v obou variantách stejné, protože se zatížení výměnou transformátoru nezmění.

Efektivnost výměny je tedy dána rozdílem nákladů po dobu trvání do konce životnosti starého transformátoru.

Časovou hodnotu peněz jsem zvolil jako míru výnosnosti regulační báze aktiv.

$$NPV = \sum_{T=0}^{T_h} \frac{[(-INV + P - N_{zn} - N_{pn}) - (P - N_{zs} - N_{ps} - INV)]_T}{(1 + WACC)^T} \quad (14.4)$$

Kde	P	měrné tržby z realizace projektu
	INV	investiční výdaj na nákup nového transformátoru
	N_{zn}	náklady na ztráty nového transformátoru
	N_{pn}	provozní náklady nového transformátoru
	N_{zn}	náklady na ztráty starého transformátoru
	N_{pn}	provozní náklady starého transformátoru
	WACC	vážený průměr nákladů na kapitál po zdanění

Ukázka výpočtu ekonomiky výměny transformátoru Zbraslav T101 (13 let do konce životnosti) z pohledu systémové metody:

Zbraslav T101									
roky			0	1	2	3	.....	12	13
zatížení	[MW]			27	27	27	.....	30	30
proteklá energie	[MWh]			51372	51886	52405	.....	57314	57887
měrné tržby za výkon			5 370 000 Kč	5 423 700 Kč	5 477 937 Kč	.....	5 991 139 Kč	6 051 050 Kč	
měrné tržby za práci			513 720 Kč	518 857 Kč	524 046 Kč	.....	573 141 Kč	578 873 Kč	
Nový transformátor									
Ztracená energie	Stálá	[kWh]		219 350	219 350	219 350	.....	219 350	219 350
	Proměnná	[kWh]		2 008 139	2 011 888	2 015 713	.....	2 053 788	2 058 455
Náklady na ztráty	Stálé	[Kč]		199 390	201 383	203 397	.....	222 453	224 677
	Proměnné	[Kč]		1 825 398	1 847 094	1 869 112	.....	2 082 833	2 108 442
Provozní náklady		[Kč]		70 195	70 897	71 606	.....	78 314	79 097
Příjmy celkem				5 883 720	5 942 557	6 001 983	.....	6 564 280	6 629 923
Nákup transformátoru			-13 900 000				.....	
Výdaje celkem				2 094 983	2 119 375	2 144 115	.....	2 383 600	2 412 217
CF				3 788 737	3 823 182	3 857 868	.....	4 180 680	4 217 706
Starý transformátor									
Ztracená energie	Stálá	[kWh]		583 416	583 416	583 416	.....	583 416	583 416
	Proměnná	[kWh]		2 120 082	2 125 349	2 130 722	.....	2 184 209	2 190 765
Náklady na ztráty	Stálé	[Kč]		530 325	535 628	540 985	.....	591 667	597 584
	Proměnné	[Kč]		1 927 154	1 951 261	1 975 756	.....	2 215 099	2 243 966
Provozní náklady		[Kč]		280 780	283 588	286 424	.....	313 257	316 390
Příjmy celkem				5 883 720	5 942 557	6 001 983	.....	6 564 280	6 629 923
Výdaje celkem				2 738 259	2 770 478	2 803 165	.....	3 120 024	3 157 939
Nákup transformátoru							.....		-13 900 000
CF				3 145 461	3 172 080	3 198 818	.....	3 444 256	-10 428 016
Rozdíl									
Rozdíl ztracené energie	[kWh]			476 008	477 526	479 075	.....	494 487	496 376
CF			-13900000	643 277	651 103	659 050	.....	736 423	14 645 723
Kumulované CF			-13900000	-13 256 723	-12 605 620	-11 946 571	.....	-5 636 361	9 009 362
DCF			-13900000	604 356	574 698	546 517	.....	348 232	6 506 502
Kumulované DCF			-13900000	-13 295 644	-12 720 946	-12 174 429	.....	-8 314 267	-1 807 765
NPV	[tis. Kč]		-1807,8						
Ušetřená ztracená energie	[MWh]		6316						

Tab. 14 Ekonomika výměny transformátoru Zbraslav T101 z pohledu systémové metody

V následující tabulce je seznam transformátorů starších 25 let mimo rezervní, které přicházejí v úvahu k výměně. V tabulce je vypočtena čistá současná hodnota a ušetřená energie za dobu porovnání a pro vypočtení roční ekvivalentní hodnoty i anuita za dobu porovnání.

Seznam transformátorů starších než 25 let (krom rezervních)												
TR	označení	Sn	U _k	P ₀	P _k	Věk	Zbývající životnost	a _{Th}	NPV	Ušetřená energie	RCF	
		[MVA]	[%]	[kW]	[kW]	Roky	Roky					[tis. Kč]	[MWh]	[tis. Kč]
PSE	Sever	Sever T101	40	11,3	50	221,9	44	-4	-	-13 900	0	-
		Sever T102	40	11,25	48,9	222,8	45	-5	-	-13 900	0	-
ZBR	Zbraslav	Zbraslav T101	40	11,22	40,2	210,72	27	13	0,116	-1 808	6396	-209
		Zbraslav T102	40	11,08	40,23	211,17	27	13	0,116	-2 089	5928	-242
PZA	Západ	Západ T101	63	16,7	36,8	363,8	27	13	0,116	-6 134	1460	-711
		Západ T102	63	16,79	37	364,8	30	10	0,139	-5 091	1207	-706
		Západ T103	63	16,6	40,2	368,7	32	8	0,164	-4 660	518	-764
PVY	Východ	Východ T101	40	11,2	46,2	232,5	37	3	0,377	-1 237	794	-467
		Východ T102	40	11,23	48	222	45	-5	-	-13 900	0	-
BEX	Běchovice	Běchovice T101	40	10,85	40,95	203,15	41	-1	-	-13 900	0	-
		Běchovice T102	40	10,8	42,19	205,8	32	8	0,164	-1 747	3351	-286
		Běchovice T103	40	11,1	48	222	40	0	-	-13 900	0	-
PHO	Holešovice	Holešovice T101	63	17,4	43,4	335,96	37	3	0,377	-943	1554	-356
		Holešovice T102	63	17,2	48,72	336,62	37	3	0,377	-760	1801	-287
		Holešovice T103	63	17,34	42,24	339,1	37	3	0,377	-876	1664	-330
		Holešovice T104	63	17,4	42,24	336,81	37	3	0,377	-860	1688	-325
XOD	Chodov	Chodov T101	40	11,1	48	223,83	40	0	-	-13 900	0	-
		Chodov T102	40	11,1	48,1	222,5	40	0	-	-13 900	0	-
		Chodov T103	63	16,7	45	334	32	8	0,164	-3 982	1515	-652
TRE	Třeboradice	Třeboradice T101	40	20,67	48	222	35	5	0,240	5 669	11595	1362
PJI	Jinonice	Jinonice T101	63	17,6	39,1	357,9	38	2	0,549	-570	1065	-313
PKA	Pražáčka	Pražáčka T101	63	17	41,58	339,8	32	8	0,164	-3 394	2234	-556
		Pražáčka T102	63	17	41,76	341,4	32	8	0,164	-3 698	1852	-606
PZL	Zličín	Zličín T101	40	11,14	37,8	206,4	31	9	0,150	-1885	3747	-283

Tab. 15 Výpočet čisté současné hodnoty z hlediska systémové metody

Z výsledků je patrné, že se předčasná výměna starého transformátoru za nový ekonomicky nevyplatí, až na transformátor Třeboradice T101, kdy je NPV rovno 5 669 tis. Kč. Třeboradice jsou ale v rámci transformátorů PREDi specifické, protože je třetí vinutí vyvedeno pro záložní napájení teplárny. Důvodem, proč jako jediné vyšly jako ekonomicky efektivní je, že respektují i jalové ztráty vznikající provozem transformátoru a transformátor Třeboradice T101 má dvojnásobné napětí nakrátko oproti ostatním transformátorům o stejném jmenovitém výkonu 40 MVA viz Tab. 15.

14.2. Pohled PREDistribuce a.s.

Z pohledu regulované společnosti jako je PREDistribuce a.s. je situace složitější. Tento postup je založen na předpokladu, že investice, které jsou udělány, jsou pro bezpečný a stabilní chod soustavy nezbytné. Hodnota míry výnosnosti regulační báze aktiv je stanovena jako vážený průměr nákladů na kapitál (WACC). Regulační báze aktiv (RAB) představuje regulatorně uznatelnou hodnotu aktiv regulovaného subjektu, která slouží k zajištění výkonu licencovanou společností. Aplikací míry výnosnosti na RAB je stanoven přiměřený zisk zajišťující návratnost investice do zařízení.

V případě výměny transformátoru staršího 25 let a tedy již účetně i daňově odepsaného novým transformátorem, získá PREDi výnos z investic, menší provozní náklady, náklady na ztráty a zvětšený daňový štít o daňově uznatelný odpis.

Doba hodnocení T_h je doba do konce životnosti starého transformátoru. Časovou hodnotu peněz jsem opět zvolil jako míru výnosnosti regulační báze aktiv.

$$NPV = \sum_{T=0}^{T_h} \frac{[-INV + WACC \cdot ZC - (N_{zn} + N_{pn}) + \tau \cdot (N_{zn} + N_{pn} + N_o)]_T - [(N_{zs} + N_{ps}) + \tau \cdot (N_{zn} + N_{pn}) + INV]_T}{(1 + WACC)^T}$$

(14.5)

Kde	T_h	je	doba hodnocení
	WACC		vážený průměr nákladů na kapitál po zdanění
	ZC		zůstatková cena
	N_{zn}		náklady na ztráty nového transformátoru
	N_{pn}		provozní náklady nového transformátoru
	τ		daňová sazba
	N_o		daňové odpisy (odpisová skupina 3, 10 let)
	N_{zn}		náklady na ztráty starého transformátoru
	N_{pn}		provozní náklady starého transformátoru
	INV		investiční výdaje

Ukázka výpočtu ekonomiky výměny transformátoru Zbraslav T101 (13 let do konce životnosti) z pohledu PREDi:

Zbraslav T101								
roky		0	1	2	3	.....	12	13
zatížení			27	27	27	.....	30	30
Nový transformátor								
Ztracená energie	Stálá	[kWh]	219 350	219 350	219 350	.....	219 350	219 350
	Proměnná	[kWh]	2 110 001	2 113 940	2 117 959	.....	2 157 965	2 162 869
Náklady na ztráty	Stálé	[Kč]	199 390	201 383	203 397	.....	222 453	224 677
	Proměnné	[Kč]	1 917 991	1 940 788	1 963 922	.....	2 188 484	2 215 392
Provozní náklady		[Kč]	70 195	70 897	71 606	.....	78 314	79 097
Náklad transformátoru			-13 900 000 Kč			.....	
Účetní odpisy			556 000	556 000	556 000	.....	556 000	556 000
Zůstatková cena			13 900 000 Kč	13 344 000	12 788 000	.....	7 228 000	6 672 000
Daňové odpisy			1 390 000	1 390 000	1 390 000	.....	
WACC*ZC			859 354	823 547	787 741	.....	465 483	429 677
Náklady celkem			3 577 575	3 603 068	3 628 925	.....	2 489 251	2 519 167
DŠ			679 739	684 583	689 496	.....	472 958	478 642
CF			-648 482	-704 938	-761 689	.....	-1 550 810	-1 610 848
Starý transformátor								
Ztracená energie	Stálá	[kWh]	583 416	583 416	583 416	.....	583 416	583 416
	Proměnná	[kWh]	2 227 622	2 233 156	2 238 802	.....	2 295 002	2 301 891
Náklady na ztráty	Stálé	[Kč]	530 325	535 628	540 985	.....	591 667	597 584
	Proměnné	[Kč]	2 024 908	2 050 238	2 075 976	.....	2 327 460	2 357 790
Provozní náklady		[Kč]	280 780	283 588	286 424	.....	313 257	316 390
Odpisy						.....	
Zůstatková cena						.....	
WACC*ZC						.....	
Náklady celkem			2 836 013	2 869 455	2 903 384	.....	3 232 384	3 271 764
Náklad transformátoru						.....		13 900 000
DŠ			538 843	545 196	551 643	.....	614 153	621 635
CF			-2 297 171	-2 324 258	-2 351 741	.....	-2 618 231	-16 550 129
Rozdíl								
Rozdíl ztracené energie	[kWh]		481 687	483 281	484 908	.....	501 103	503 088
CF			-13 900 000 Kč	1 648 689	1 619 320	.....	1 067 421	14 939 281
Kumulované CF			-13 900 000 Kč	-12 251 311	-10 631 991	.....	3 440 918	18 380 198
DCF			-13 900 000 Kč	1 548 937	1 429 299	.....	504 751	6 636 918
Kumulované DCF			-13 900 000 Kč	-12 351 063	-10 921 764	.....	-1 795 196	4 841 721
NPV	[tis. Kč]		4841,7					
Ušetřená ztracená energie	[MWh]		6396					

Tab. 16 Ekonomika výměny transformátoru Zbraslav T101 z pohledu PREDistribuce

V následující tabulce je opět seznam transformátorů starších 25 let mimo rezervní, které přicházejí v úvahu k výměně.

Seznam transformátorů starších než 25 let (krom rezervních)												
TR	označení	S_n	U_k	P_0	P_k	Věk	Zbývající životnost	a_{Th}	NPV	Ušetřená energie	RCF	
		[MVA]	[%]	[kW]	[kW]	Roky	Roky					[tis. Kč]
PSE	Sever	Sever T101	40	11,3	50	221,9	44	-4	-	-13 900	0	-
		Sever T102	40	11,25	48,9	222,8	45	-5	-	-13 900	0	-
ZBR	Zbraslav	Zbraslav T101	40	11,22	40,2	210,72	27	13	0,116	4 801	6396	741
		Zbraslav T102	40	11,08	40,23	211,17	27	13	0,116	4 573	5928	687
PZA	Západ	Západ T101	63	16,7	36,8	363,8	27	13	0,116	2 603	1460	169
		Západ T102	63	16,79	37	364,8	30	10	0,139	2 939	1207	167
		Západ T103	63	16,6	40,2	368,7	32	8	0,164	2 420	518	85
PVY	Východ	Východ T101	40	11,2	46,2	232,5	37	3	0,377	1 435	794	299
		Východ T102	40	11,23	48	222	45	-5	-	-13 900	0	-
BEX	Běchovice	Běchovice T101	40	10,85	40,95	203,15	41	-1	-	-13 900	0	-
		Běchovice T102	40	10,8	42,19	205,8	32	8	0,164	3 710	3351	549
		Běchovice T103	40	11,1	48	222	40	0	-	-13 900	0	-
PHO	Holešovice	Holešovice T101	63	17,4	43,4	335,96	37	3	0,377	2 182	1554	586
		Holešovice T102	63	17,2	48,72	336,62	37	3	0,377	2 330	1801	679
		Holešovice T103	63	17,34	42,24	339,1	37	3	0,377	2 236	1664	628
		Holešovice T104	63	17,4	42,24	336,81	37	3	0,377	2 248	1688	637
XOD	Chodov	Chodov T101	40	11,1	48	223,83	40	0	-	-13 900	0	-
		Chodov T102	40	11,1	48,1	222,5	40	0	-	-13 900	0	-
		Chodov T103	63	16,7	45	334	32	8	0,164	2 969	1515	248
TRE	Třeboradice	Třeboradice T101	40	20,67	48	222	35	5	0,240	8 281	11595	2786
PJI	Jinonice	Jinonice T101	63	17,6	39,1	357,9	38	2	0,549	1 600	1065	584
PKA	Prahačka	Prahačka T101	63	17	41,58	339,8	32	8	0,164	3 445	2234	366
		Prahačka T102	63	17	41,76	341,4	32	8	0,164	3 199	1852	303
PZL	Zličín	Zličín T101	40	11,14	37,8	206,4	31	9	0,150	3 978	3747	561

Tab. 17 Výpočet čisté současné hodnoty z hlediska PREdi

Z výsledků je na první pohled patrné, že se předčasná výměna starého transformátoru za nový na rozdíl od systémové metody ekonomicky velmi vyplatí. Rozdíl ekonomické efektivity těchto dvou pohledů je dán předpokladem, že pokud je investice účelná pro chod soustavy, pak PREdi získá výnos z investice.

Výsledky jsou takové, že by byla výhodná okamžitá výměna u všech transformátorů. Samozřejmě je nepravděpodobné, že by nastala okamžitá výměna všech transformátorů, nicméně nejprve by se měly vyměnit transformátory přesluhující svoji technickou životnost a poté bychom se rozhodovali podle kritéria RCF.

V práci se zabývám transformátory PREdi, proto se zaměřím při citlivostní analýze na situaci z pohledu regulované společnosti a budu zkoumat, jak velký vliv mají jednotlivé vstupní parametry na výsledek.

14.3. Transformátor 40 MVA z hlediska PREdi

K výpočtu byl použit transformátor výrobce SGB s parametry viz Tab. 18

Nový transformátor					
Sn	P ₀	P _k	U _k	I _o	Cena
40 MVA	20 kW	150 kW	11,0 %	0,084 %	13 900 000 Kč

Tab. 18 Parametry nového transformátoru 40 MVA

Pro obecný výpočet jsem použil průměrné hodnoty P₀ a P_k transformátorů starších 25let

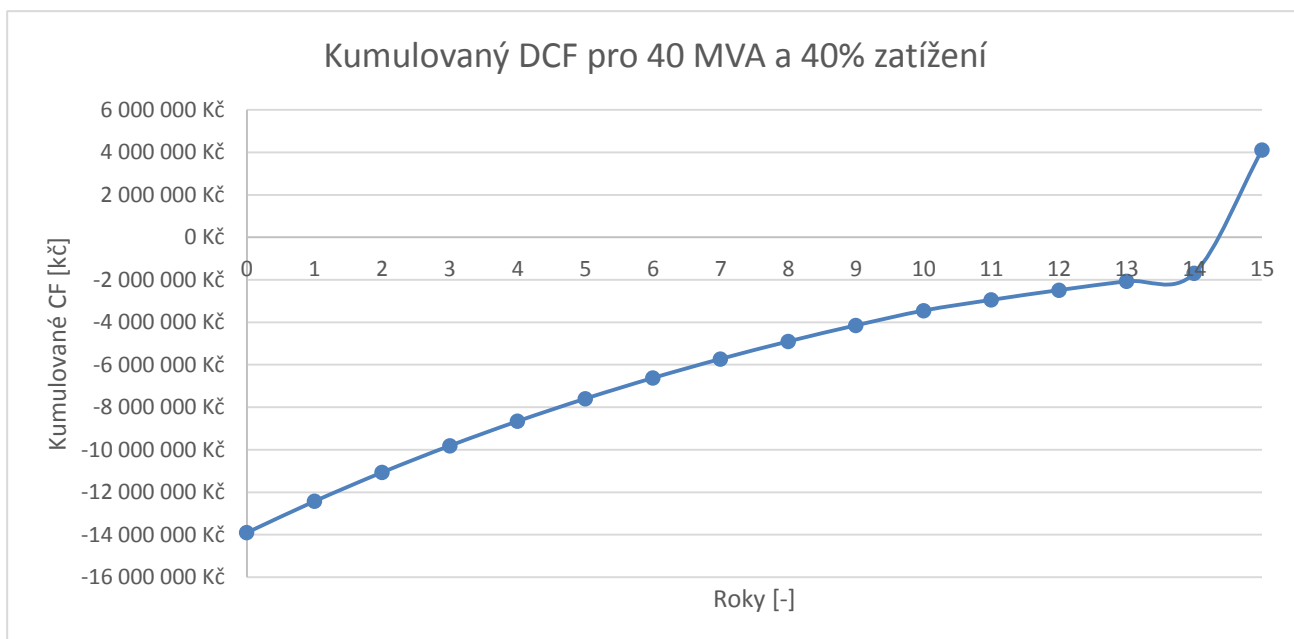
Starý transformátor				
Sn	P ₀	P _k	U _k	I _o
40 MVA	42,3 kW	203,3 kW	11,91 %	0,08 %

Tab. 19 Parametry starého transformátoru 40 MVA

Parametry k výpočtu	
T _r	8760 h (rok)
Daňové odpisy	10 let
Účetní odpisy	25 let
WACC	6,44 %
C _{ztr}	900 Kč/MWh viz. kapitola 13.3
Měrné provozní náklady n _p	1 %
růst zatížení	1 %
Růst nákladů na ztráty	1 %
Růst provozních nákladů	1 %
Starý transformátor	4 krát větší provozní náklady
Daňová sazba	19 %
k _Δ (pro přepočítání jalových ztrát na činné na hladině 110/22 kV)	0,15
T _z	2900 h

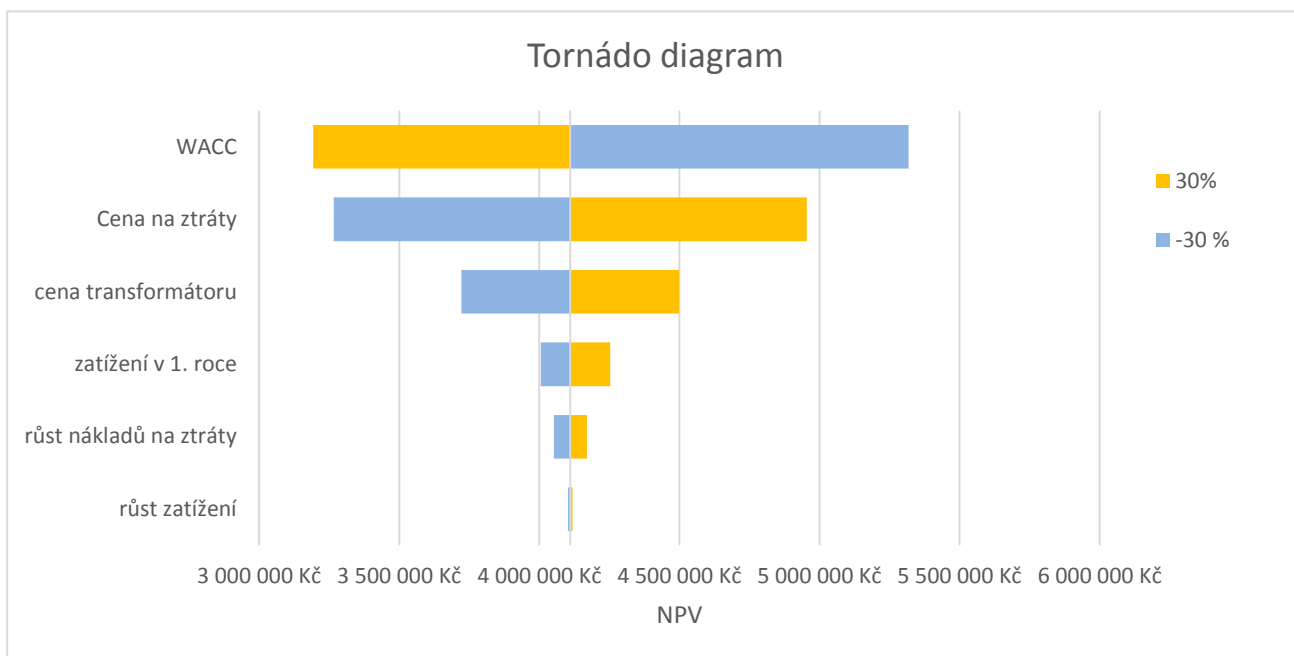
Vysvětlivky: T_r doba provozu
 C_{ztr} cena za ztráty
 k_Δ koeficient přepočtu jalových ztrát na činné

Čistá současná hodnota s použitím těchto parametrů a předpokladů, zejména že se jedná o regulovanou společnost, viz kapitola 14.2 je **NPV = 4 111 tis. Kč**, která říká, že se za daných podmínek výměna ekonomicky vyplatí. Z grafu kumulovaného DCF je vidět ekonomická návratnost mezi 14. a 15. rokem.



Obr. 28 – Kumulované DCF pro 40 MVA

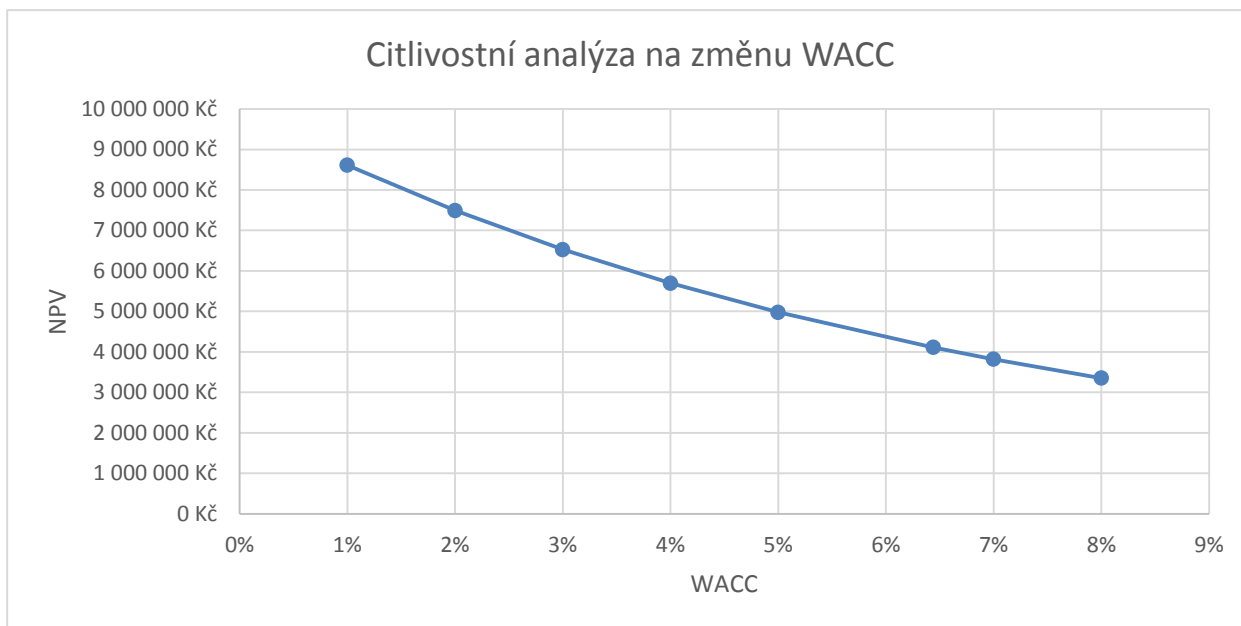
Následující tornádo graf zobrazuje vliv změny -30 % a +30 % jednotlivých vstupních parametrů na čistou současnou hodnotu ekonomiky výměny transformátoru.



Obr. 29 – Tornádo diagram – vliv změna parametrů na NPV

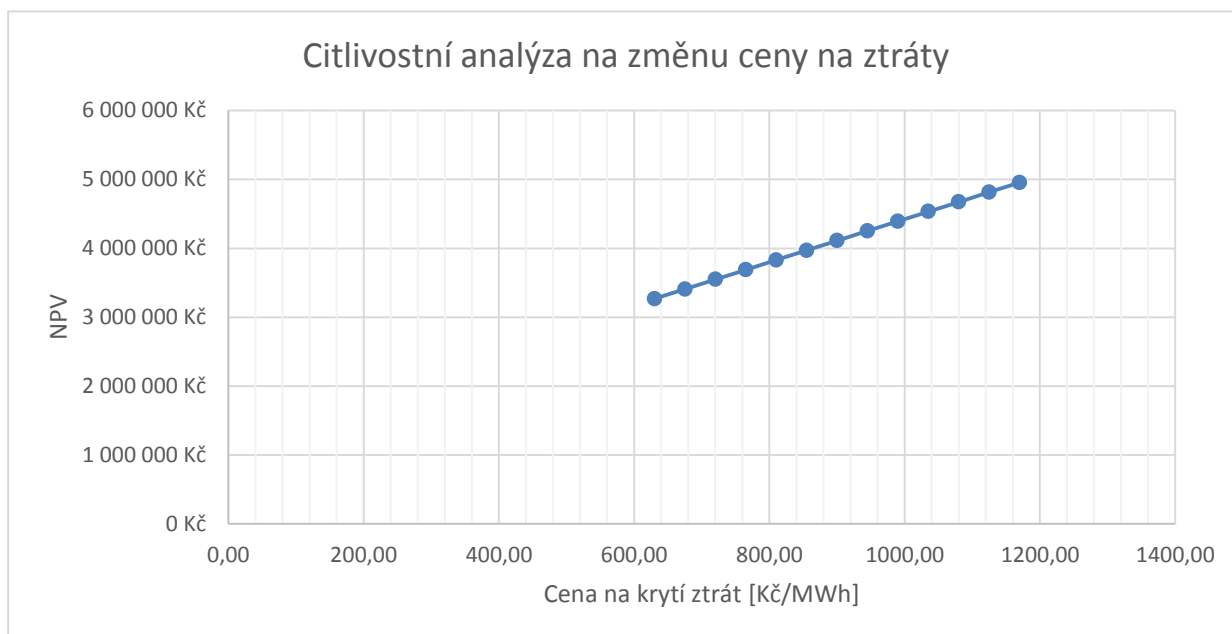
Citlivostní analýza ukázala, že největší vliv na změnu NPV má WACC, kdy v situaci zvýšení WACC čistá současná hodnota projektu klesne. Dalšími významnými parametry jsou cena na krytí ztrát a pořizovací cena transformátoru, kdy přírůstkem se naopak NPV projektu zvětší.

Citlivostní analýza na změnu WACC tedy ukazuje, že při rostoucím WACC klesá hodnota NPV, to je dáno tím, že WACC ve výpočtu figuruje nejenom jako míra výnosnosti investice, ale i jako diskont.



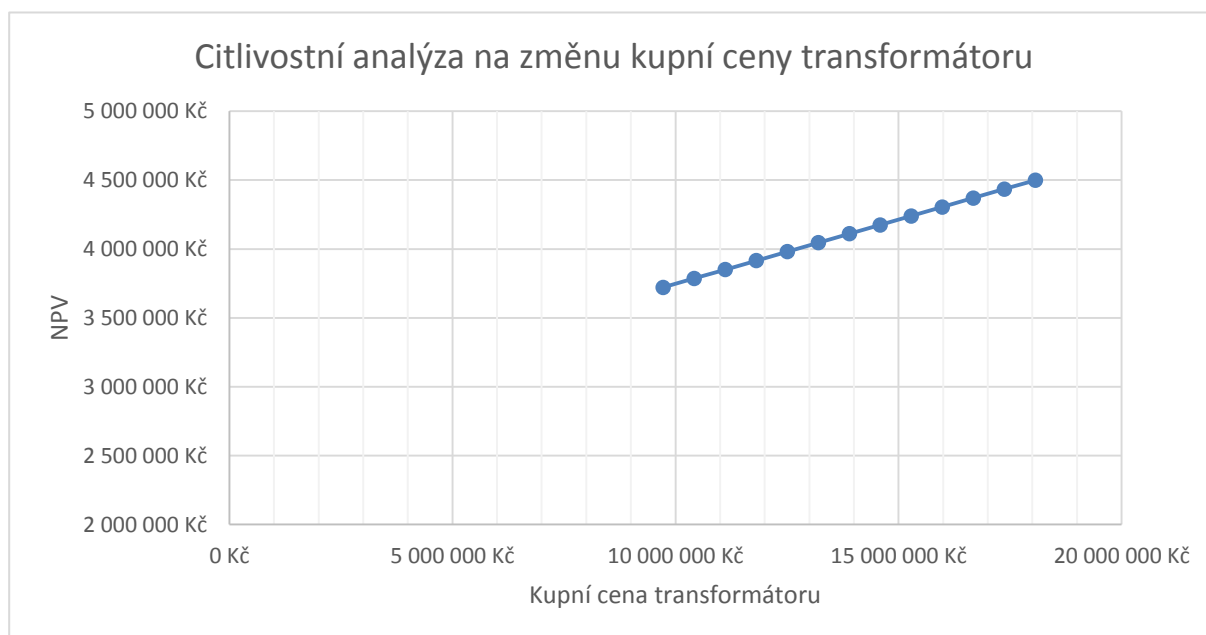
Obr. 30 – Citlivostní analýza na změnu WACC

Citlivostní analýza na změnu ceny na ztráty způsobuje lineární růst NPV projektu.



Obr. 31 – Citlivostní analýza na změnu ceny na ztráty

Citlivostní analýza na změnu ceny na ztráty způsobuje opět růst NPV projektu



Obr. 32 – Citlivostní analýza na změnu kupní ceny transformátoru

14.4. Transformátor 63 MVA z hlediska PREDi

Vycházím ze stejného výpočtu jako v předešlé podkapitole, ale použiji jiné technické parametry pro transformátor o jmenovitém výkonu 63 MVA, ostatní předpoklady jsou stejné.

K výpočtu byl použit transformátor výrobce SGB s parametry viz Tab. 20

Nový transformátor					
Sn	P ₀	P _k	U _k	I _o	Cena
63 MVA	24 kW	176 kW	17,5 %	0,15 %	16 800 000 Kč

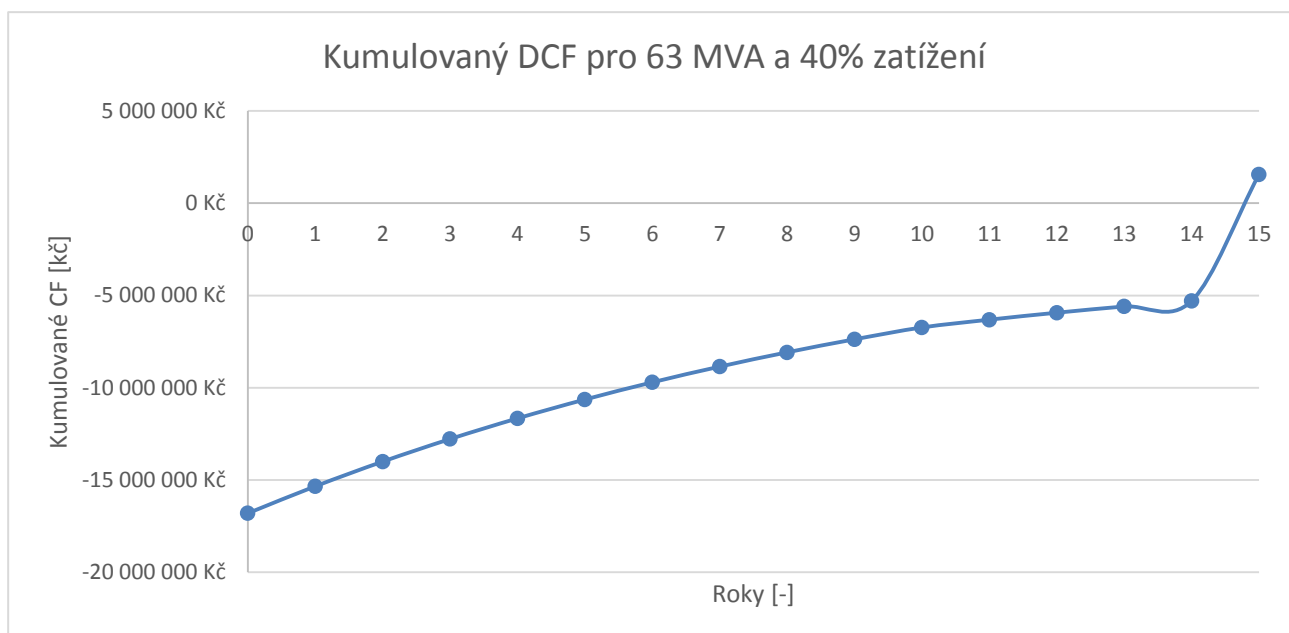
Tab. 20 Parametry nového transformátoru 63 MVA

Pro obecný výpočet jsem použil průměrné hodnoty P₀ a P_k transformátorů starších 25let

Starý transformátor				
Sn	P ₀	P _k	U _k	I _o
63 MVA	41,36 kW	346,49 kW	17,05 %	0,08 %

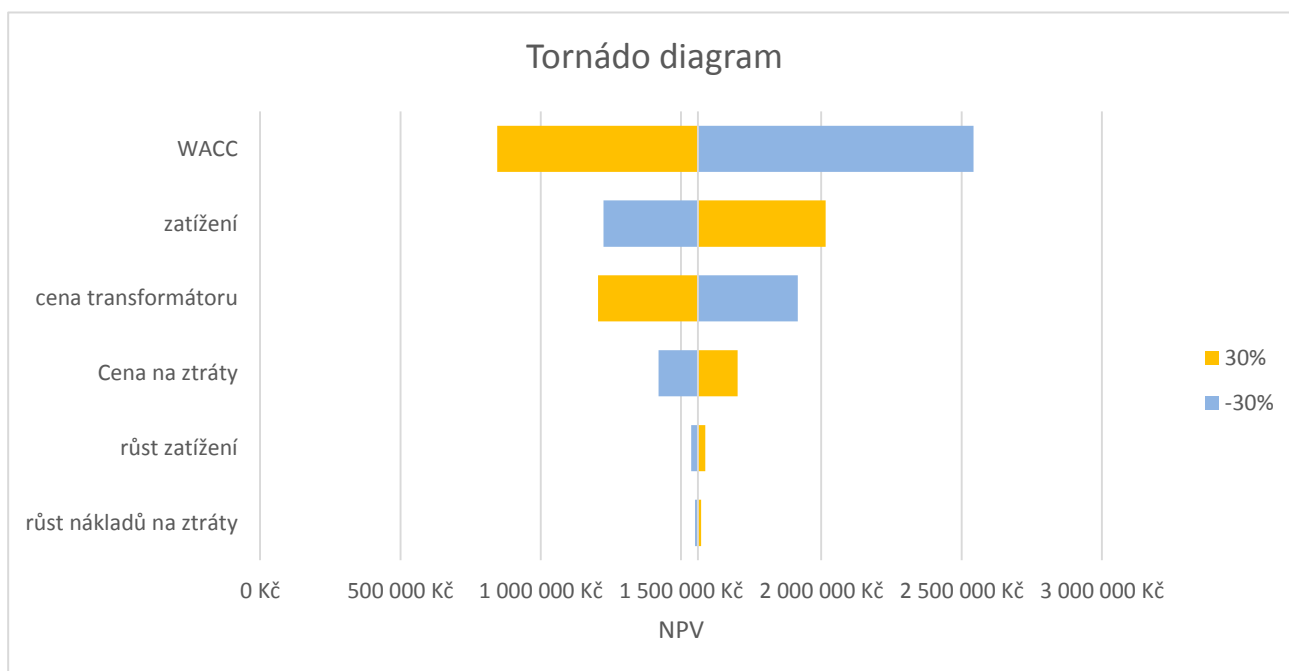
Tab. 21 Parametry starého transformátoru 63 MVA

Čistá současná hodnota s použitím těchto parametrů a za stejných předpokladů jako v předešlé podkapitole je **NPV = 1 561 tis. Kč**, která říká, že se za daných podmínek výměna ekonomicky vyplatí, ačkoliv o značně méně než u transformátoru $S_n=40$ MVA. Z grafu kumulovaného DCF je vidět ekonomická návratnost mezi 14. a 15. rokem.



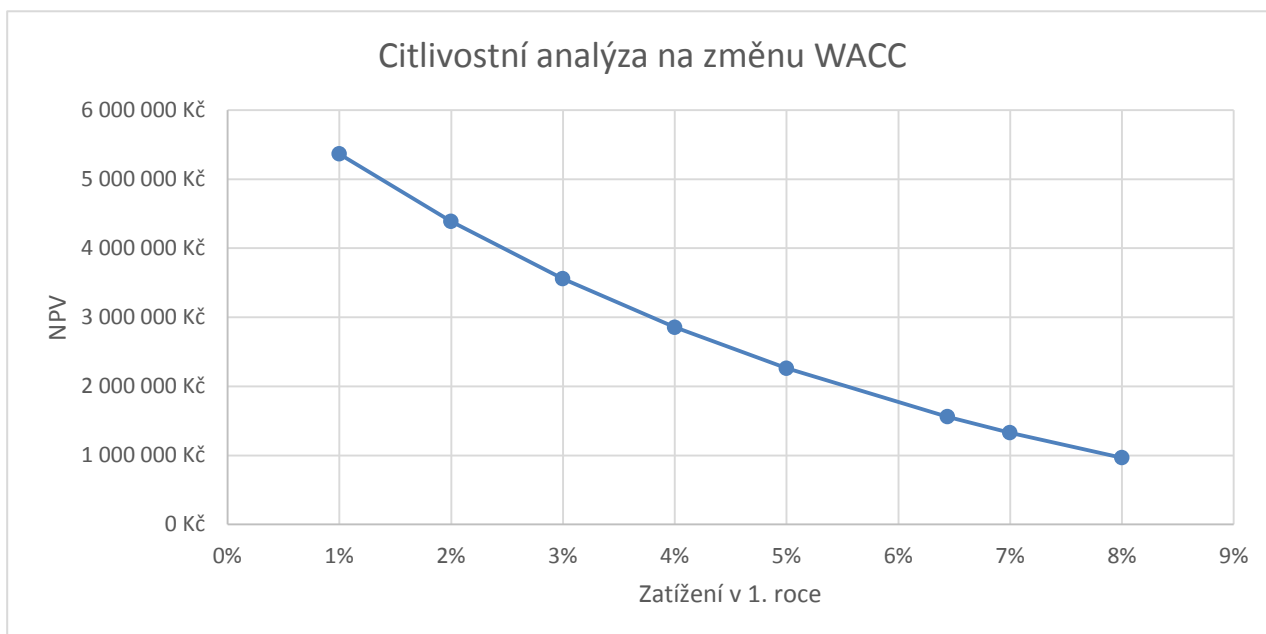
Obr. 33 – Kumulované DCF pro 63 MVA

Pro určení nejvýznamnějších parametrů pro výpočet NPV opět vyjdu z tornádo diagramu



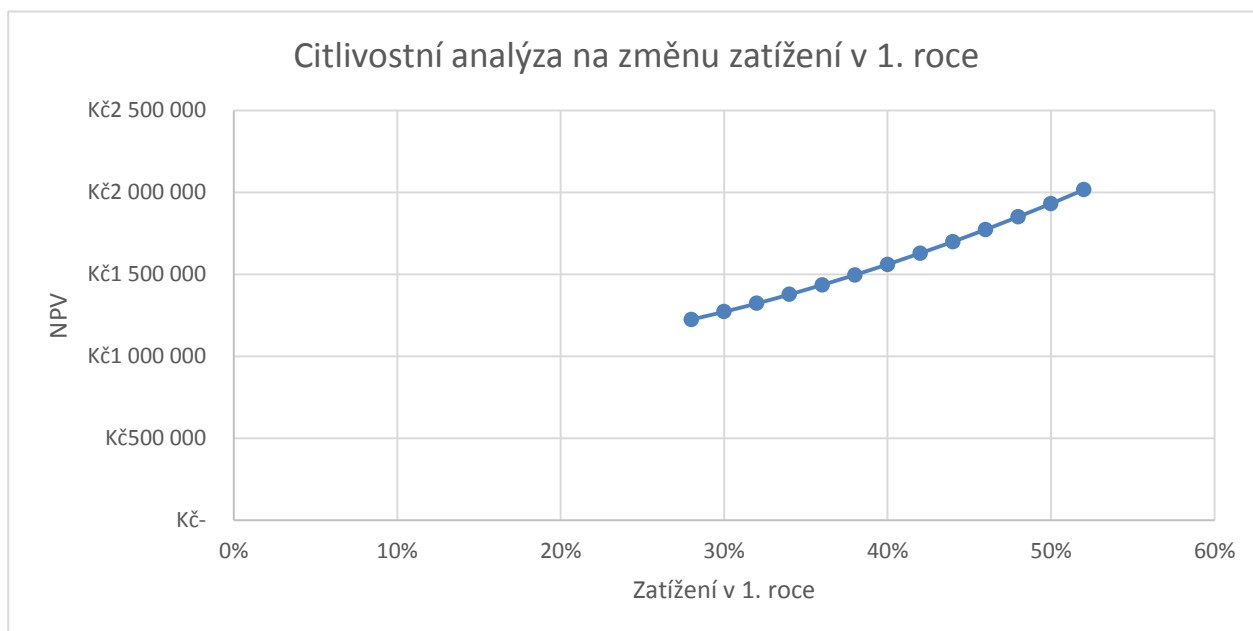
Obr. 34 – Kumulované DCF pro 63 MVA

Největší vliv na NPV projektu má opět WACC. Další významný parametr je ale v tomto případě zatížení v prvním roce. Citlivostní analýza na změnu WACC opět ukazuje, že při rostoucím WACC klesá hodnota NPV. To je znovu dáno tím, že WACC ve výpočtu figuruje nejenom jako míra výnosnosti investice, ale i jako diskont.



Obr. 35 – Citlivostní analýza na změnu WACC

Citlivostní analýza na změnu zatížení v 1. roce ukazuje, že při rostoucím zatížení NPV roste. To je způsobeno tím, že při větším zatížení, vznikají větší ztráty a výměna transformátoru s lepšími technickými parametry se tedy ekonomicky vyplatí dříve.



Obr. 36 – Citlivostní analýza na změnu zatížení v 1. roce

15. Závěr

Ve své práci jsem se zaměřil na problematiku hospodárného chodu transformátorů, kdy ztráty způsobené provozem transformátoru lze omezit optimální volbou velikosti transformátoru a optimálním počtem paralelně pracujících transformátorů. V závěru práce jsem se zaměřil na ekonomiku předčasné výměny transformátoru ze dvou pohledů.

V úvodu práce jsem rozebral teoretické předpoklady, které jsou důležité k pochopení dané problematiky a poukázal na požadavky Evropské unie na ekodesign.

Při návrhu optimální velikosti transformátoru a optimálního počtu paralelně pracujících transformátorů, jsem vyšel z kritéria minimálních výrobních nákladů transformátorů za jejich životnost, za daných předpokladů a podmínek. Posléze jsem porovnal výsledky se současným stavem. Výsledky se samozřejmě liší jednak z důvodu jiných tehdejších vstupních parametrů, jako je např. cena na krytí ztrát způsobených provozem transformátorů a jednak tím, že PREDi používá transformátory 110/22 kV pouze typových řad 40 MVA a 63 MVA.

Problematiku ekonomiky předčasné výměny transformátorů jsem řešil nejprve z pohledu systémové metody, kdy jsem hodnotil pouze efekty, kterých výměnou v systému distribuční soustavy opravdu dosáhnu. Mezi tyto efekty patří úspora provozních nákladů, nákladů na ztráty a efekt přenosové schopnosti transformátoru, který jsem ohodnotil pomocí měrných tržeb. Systémová metoda určila, že se předčasná výměna transformátoru ekonomicky nevyplatí.

Druhý pohled je pohled regulované společnosti jako je PREDi. Regulační pravidla jsou nastavena tak, že pokud se jedná o účelnou investici, pak PREDi jako regulovaná společnost získá výnos z investice. Tato metoda samozřejmě díky tomuto předpokladu vyjde mnohem lépe než při hodnocení projektu z hlediska systému. V práci se zabývám transformátory právě regulované společnosti jakou je PREDi, a proto jsem na tuto metodu zpracoval citlivostní analýzy pro případnou změnu vstupních parametrů. Závěrem je nutné říci, že pokud se jedná o opravdu účelnou investici, pak tato metoda vyhodnotí projekt správně a je výhodná jak pro regulovanou společnost, tak i pro konečného spotřebitele, v opačném případě by ji neměl regulační úřad uznat.

16. Literatura

- [1] FENCL, František. *Elektrický rozvod a rozvodná zařízení*. Vyd. 4. V Praze: České vysoké učení technické, 2009. ISBN 978-80-01-04351-6.
- [2] HALUZÍK, Evžen. *Ochrany a automatiky v elektrických sítích*. Brno: Vysoké učení technické, 1986.
- [3] DOHNÁLEK, Petr. *Ochrany pro průmysl a energetiku: určeno [také] pro posl. pomaturitního inovačního studia oboru zařízení silnoproudé elektrotechn. a studia postgraduálního*. Praha: SNTL, 1978. Řada elektrotechnické literatury.
- [4] VOŽENÍLEK, Petr, Vladimír NOVOTNÝ a Pavel MINDL. *Elektromechanické měniče*. 2. vyd. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2011. ISBN 978-80-01-04875-7.
- [5] TOMAN, Petr. *Provoz distribučních soustav*. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2011. ISBN 978-80-01-04935-8.
- [6] VOŽENÍLEK, Ladislav. *Kurs elektrotechniky*. 2., přeprac. vyd. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1988.
- [7] KUBA, Jan a Pavel MACH. *Technologické procesy*. Praha: České vysoké učení technické, 1995. ISBN 80-01-01397-9
- [8] HRON, Jakub. *Hospodárná velikost transformátorů vvn/vn*. Praha, 2014. Bakalářská práce. ČVUT.
- [9] VÍTEK, Miroslav. *Ekonomika dopravních energetických systémů*. Vyd. 2. V Praze: České vysoké učení technické, 2008. ISBN 978-80-01-04181-9.
- [10] ČSN 33 3204 – Stanoviště výkonových transformátorů
- [11] ČSN 33 3051 – Ochrany elektrických strojů a rozvodných zařízení
- [12] výroční zpráva ČEZ Distribuce 2015
- [13] Dostupné online, staženo dne 5.11.2015
<http://www.ceps.cz/CZE/Cinnosti/Technicka-infrastruktura/Stranky/Udaje-o-PS.aspx>
- [14] Firemní zpravodaj ČKD
- [15] Návod k obsluze olejového transformátoru SGB
- [16] Vnitřní stanoviště transformátorů - Opatření proti hluku PNE 38 1753
- [17] Nařízení vlády č. 272/2011
- [18] Dostupné online, staženo dne 5.4.2016
<https://www.predistribuce.cz/cs/distribucni-sit/>
- [19] Výroční zpráva PRE 2014
- [20] [Tisková zpráva]. Praha, 2014 [cit. 2016-04-16]. Dostupné z: http://www.ote-cr.cz/o-spolecnosti/files-novinky/2014-04-01_TZ_Ocekavana_spotreba_elektriny.pdf
- [21] Dostupné online, staženo dne 5.5.2016
<https://www.pxe.cz/Produkty/Detail.aspx?isin=FCZBLY171231#KL>
- [22] *Zásady cenové regulace pro období 2016-2018 pro odvětví elektroenergetiky, plynárenství a pro činnosti operátora trhu v elektroenergetice a plynárenství, ERU*, ve znění účinném od 1. ledna 2016