

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

KATEDRA TECHNOLOGIÍ A MĚŘENÍ

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Pecní transformátory

**vedoucí práce: Ing. Jiří Srb
autor: Ondřej Konopík**

2012

Anotace

V této bakalářské práci se budu zabývat základními charakteristickými vlastnostmi, provedením a použitím pecních transformátorů v praxi. V práci je také probrána problematika pecí a základní vlastnosti klasických transformátorů. V poslední části se věnuji měření odběru pecních transformátorů.

Klíčová slova

pecní transformátor, magnetický obvod, oblouková pec, náhradní schéma,

Abstract

In this thesis I examine the basic characteristic, design and use of furnace transformers in practice. Other topics, such as problems of furnace and the basic characteristic of classical transformers are also discussed. The last section is devoted to the measurement consumption of furnace transformers.

Key words

furnace transformer, magnetic circuit, arc furnace, equivalent circuit,

Prohlášení

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě bakalářskou práci, zpracovanou na závěr studia na Fakultě elektrotechnické Západočeské univerzity v Plzni.

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

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

V Plzni dne 3.6.2012

Jméno příjmení

.....

Poděkování

Tímto bych chtěl poděkovat mému vedoucímu bakalářské práce Ing. Jiřímu Srbovi za cenné profesionální rady, připomínky a metodické vedení práce. Také děkuji zaměstnancům firem Plzeňská energetika a.s., Pilsen steel s.r.o. a Retrofit za poskytnuté exkurze, materiálů a odbornou pomoc.

Obsah

OBSAH	7
ÚVOD	8
SEZNAM SYMBOLŮ	9
1 TEORIE TRANSFORMÁTORŮ	10
1.1 VÝZNAM A POUŽITÍ	10
1.2 ROZDĚLENÍ A POUŽITÍ TRANSFORMÁTORŮ	10
1.3 NÁHRADNÍ SCHÉMA TRANSFORMÁTORU	11
1.4 PRINCIP ČINNOSTI SKUTEČNÉHO TRANSFORMÁTORU	12
1.5 PRINCIP ČINNOSTI IDEÁLNÍHO TRANSFORMÁTORU	13
1.6 ZTRÁTY TRANSFORMÁTORU	14
1.6.1 Ztráty naprázdno	14
1.6.2 Ztráty nakrátko	15
1.7 ÚČINÍK	15
1.8 PŘECHODNÉ DĚJE A PŘEPĚTÍ V TRANSFORMÁTORECH	16
1.9 TLUMIVKA	16
1.10 KONSTRUKCE TRANSFORMÁTORU	17
1.10.1 Vinutí	17
1.10.2 Magnetický obvod	18
1.10.3 Nádobu transformátoru	19
1.11 BUCHHOLZOVO RELÉ	20
2 PECNÍ TRANSFORMÁTORY	21
2.1 OBLOUKOVÉ PECE	21
2.2 PECNÍ TRANSFORMÁTOR PRO OBLOUKOVÉ PECE	22
2.3 KOMPENZACE PECNÍCH TRANSFORMÁTORŮ	26
2.4 ELEKTRICKÉ ZAŘÍZENÍ OBLOUKOVÝCH PECÍ	27
2.5 OBLOUKOVÁ PEC	28
2.6 INDUKČNÍ ELEKTROTEPELNÁ ZAŘÍZENÍ	29
2.6.1 Indukční tavicí pec kelímková	29
2.6.2 Indukční tavicí pec kelímková – středofrekvenční elektrotechnický schéma	30
2.6.3 Kanálková indukční pec	31
3 MĚŘENÍ ODBĚRU PECNÍCH TRANSFORMÁTORŮ	32
3.1 ÚVOD	32
3.1.1 Měření	32
3.1.2 Monitorování zatížení	33
3.2 MONITOROVÁNÍ FÁZOVÝCH NAPĚTÍ	34
3.3 ČASOVÝ PRŮBĚH NAPĚTÍ A PROUDU	36
3.4 ZEMNÍ SPOJENÍ V SÍTI 22 kV	39
3.5 PROUDOVÝ RÁZ A POKLES NAPĚTÍ	40
3.6 PROUDOVÝ RÁZ A ZVÝŠENÍ NAPĚTÍ	42
3.7 SHRUTÍ PROUDOVÝCH RÁZŮ	42
3.8 ZÁVĚR MĚŘENÍ	43
ZÁVĚR	44
POUŽITÁ LITERATURA	1

Úvod

Cílem této bakalářské práce je přiblížení problematiky pecních transformátorů. Pecní transformátory jsou nedílnou součástí hutnického průmyslu. Dodávají elektrickou energii do elektrických pecí, kde vznikají problematické děje.

V úvodní části této práce se budu zabývat základními pojmy, vlastnostmi a vztahy, které se týkají klasických transformátorů. Transformátor má dnes nezastupitelnou úlohu v mnoha ohledech. Je to základní stavební prvek pro vybudování velmi rozsáhlých elektrizačních soustav. Existuje mnoho druhů transformátorů, které se používají v energetice či v jiných oborech techniky.

Ve druhé části se budu věnovat charakteristickým vlastnostem pecních transformátorů. Rozeberu nejběžnější využití pecních transformátorů v praxi a jejich elektrické zapojení. Pozastavím se nad problematikou obloukových a indukčních pecí.

Třetí část se zabývá problematikou odběru pecních transformátorů z elektrické sítě. Vlivem častých proudových rázů, napěťových výkyvů, nestálému zatížení či proměnlivému účinníků jsou pecní transformátory velmi náročné na napájení. V dané části jsou ukázky měření všech základních hodnot pro posouzení vlastností elektrické sítě, jenž pecní transformátory napájí.

Seznam symbolů

S [m^2]	Obsah průřezu vodiče
l [m]	Délka vodiče
ς [Ω]	Měrná rezistivita vodiče
R [Ω]	Činný odpor
ΔP_j [Ω]	Měrná rezistivita vodiče
m [-]	Počet fází
ΔP_{Fe} [Ω]	Ztráty v železe
X_μ [Ω]	Magnetizační reaktance
X_ρ [m]	Rozptylová reaktance
k [-]	Převod transformátoru
$\cos\varphi$ [-]	Účinník
U [V]	Napětí
I [A]	Proud
$X_{1\zeta}$ [Ω]	Rozptylová reaktance primárního vinutí
I_μ [A]	Magnetizační proud
R_{Fe} [Ω]	Náhradní odpor železa
I_{Fe} [A]	Ztrátový odpor
X_μ [Ω]	Magnetizační reaktance
I_0 [A]	Proud naprázdno
Φ_1 [Wb]	Rozptylový tok primárního vinutí
Φ_h [Wb]	Celkový magnetický tok
Φ [Wb]	Magnetický tok
U_{ind} [V]	Indukované napětí
S [VA]	Zdánlivý výkon
P [W]	Činný výkon
Q [VAr]	Jalový výkon
N [závit]	Počet závitů cívky
η [%]	Účinnost
u_k [%]	Procentní napětí nakrátko

1 Teorie transformátorů

1.1 Význam a použití

V silnoproudých zařízeních mají významné místo točivé a netočivé stroje. Mezi stroje točivé patří synchronní, asynchronní, stejnosměrné a střídavé komutátorové motory. V daných strojích se přeměňuje buď elektrická energie na mechanickou (motory), nebo mechanická energie na elektrickou (generátory). Mezi stroje netočivé patří usměrňovače, transformátory a měniče. [1] V dané části bakalářské práci budeme pojednávat o strojích netočivých a to o transformátorech.

Primárním použitím transformátoru je snižování nebo zvyšování střídavého napětí a je neodmyslitelnou součástí při přenosu a rozvodu elektrické energie. Při dálkovém přenosu elektrické energie se transformátorem zmenšuje proud a zvyšuje napětí, čímž se snižují ztráty ve vedení a tím se zvětšuje výkon, který je elektrické vedení schopno přenést. Jmenovité napětí a výkony transformátorů se pohybují v širokých mezích dle účelu od zlomků VA a V (například v radiotechnice, ve sdělovací a regulační technice a automatizaci) až po řádově stovky MVA a stovky kV.

Rozměry a výkony transformátoru dosahují místy i takových hodnot, že jejich doprava z výrobních závodů na místo určení je značně limitující faktor. Mezi nejefektivnější způsob dopravy je železniční či vodní doprava. Kompletní transformátory mohou dosahovat váhy až několika desítek tun. [2]

1.2 Rozdělení a použití transformátorů

V elektrárnách se používají blokové transformátory k vyvedení výkonu mimo elektrárny do sítí různých napětí a výkonů nebo ke vzájemnému spojení daných sítí se používají spojovací či síťové transformátory. Vlastní spotřeba elektráren pro pomocné provozy (doprava uhlí, osvětlení) elektráren se zajišťuje transformátory vlastní spotřeby. Pro zásobování rozvodné sítě se používají distribuční transformátory. Mezi další základní transformátory jsou tzv. autotransformátory, transformátory pro lékařské přístroje a přístrojové transformátory. Autotransformátory slouží k napětíovému přizpůsobení spotřebičů na rozdílné napětí nežli síťové (nejčastěji 230/120 V). Využívají se i pro měřicí účely a pro elektrické oddělení („ochranný transformátor“). Transformátory pro lékařské přístroje musí

mít maximální výstupní napětí nejvýše 24 V, pokud napájený přístroj přichází do styku s lidským tělem z venku. Pokud je napájený přístroj zaváděn dovnitř lidského těla, např. operativní zákroky, endoskop při vyšetření žaludku, může být maximální výstupní napětí 5 V. Transformátory pro lékařské přístroje musí mít vždy ochranou izolaci. Přístrojové transformátory slouží k napájení měřících prvků pro velmi vysoké proudy a napětí (používají se např. v elektrárnách). Slouží také k napájení galvanicky oddělených obvodů pro ovládací přístroje např. jističe. Mezi další speciální transformátory patří: ohřívací, pecové (o nichž bude nadále řeč), svařovací, bezpečnostní, trakční, zkušební, nevýbušné atd. [1]

1.3 Náhradní schéma transformátoru

Při návrhu náhradního schématu skutečného transformátoru musíme vycházet z energetické bilance a musíme respektovat, že ne všechen magnetický tok je uzavřen vazebním magnetickým obvodem, ale část se uzavře bez užitku vzduchem. Dále je třeba uvažovat činný odpor vinutí, magnetickou vodivost vazebního obvodu. Činný odpor vinutí lze určit na základě vztahu:

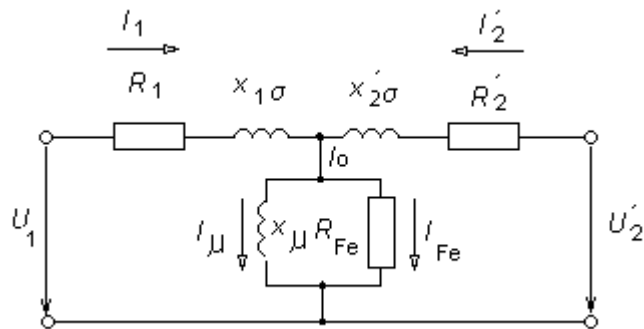
$$R = \zeta \frac{l}{S} \quad [\Omega] \quad (1.1)$$

Kde: ζ ... měrná rezistivita vodiče [Ω]
 S ... obsah průřezu vodiče [m^2]
 l ... délka vodiče [m]

Délku vodiče vypočítáme jako součin závitů N a střední délky závitů. Velikost odporu vinutí přepočítáme na provozní teplotu vinutí. Konečná velikost elektrické vodivosti má za následek vznik tzv. Joulových ztrát (ΔP_j). Joulovy ztráty určíme ze vztahu $\Delta P_j = mRI^2$ (m značí počet fází). Pro skutečný transformátor musíme uvažovat konečnou magnetickou vodivost, která má za následek vznik tzv. ztrát v železe (ΔP_{fe}). Ztráty v železe jsou tvořeny ztrátami vířivými proudy a hysterezními. Pro náhradní schéma zavedeme tyto ztráty jako rezistivitu železných plechů, zařazenou paralelně k magnetizační (hlavní) reaktanci X_μ . Ztráty naprázdno určíme ze ztrátového čísla z (udávané ve W/kg plechů). Do náhradního schématu je ještě nutné zahrnout rozptylovou reaktanci (X_p). Důvod zařazení rozptylových reaktancí je, že část magnetického toku se uzavře kolem vlastního vinutí cívky. Rozptylový magnetický tok vzniká jak u primárního, tak i u sekundárního vinutí. [3]

Náhradní schéma transformátoru umožňuje popis elektrickými rovnicemi. Vychází z ideálního transformátoru, doplněného o vedlejší obvodové prvky. Primární napětí U_1 je

harmonické a magnetický obvod není nasycen (pracovní oblast v lineární části charakteristiky). [4]



Obr. 1.3 Náhradní schéma transformátoru [10]

Popis k obrázku:

I_1 – primární proud,

I'_2 – sekundární proud,

R_1 – odpor primárního vinutí,

R'_2 – odpor sekundárního vinutí,

U_1 – primární napětí,

U'_2 – sekundární napětí,

$X_{1\rho}$ – rozptylová reaktance primárního vinutí

$X'_{2\rho}$ – rozptylová reaktance sekundárního vinutí,

I_μ – magnetizační proud,

R_{Fe} – náhradní odpor železa,

I_o – proud naprázdno,

I_{Fe} – ztrátový proud,

X_μ – magnetizační reaktance

[5]

Popisem náhradního schématu skutečného transformátoru pomocí Kirchhoffových zákonů, získáme základní rovnice, která charakterizují transformátor ve všech provozních stavech.

$$U_1 = U_{ind} + (R_1 + jX_{\rho 1}) \cdot I_1 \quad (1.2)$$

$$U_2 = U_{ind} + (R_2 + jX_{\rho 2}) \cdot I_2 \quad (1.3)$$

$$I^1 + I^2 = I^{10} = I_\mu + I_{Fe} \quad [4] \quad (1.4)$$

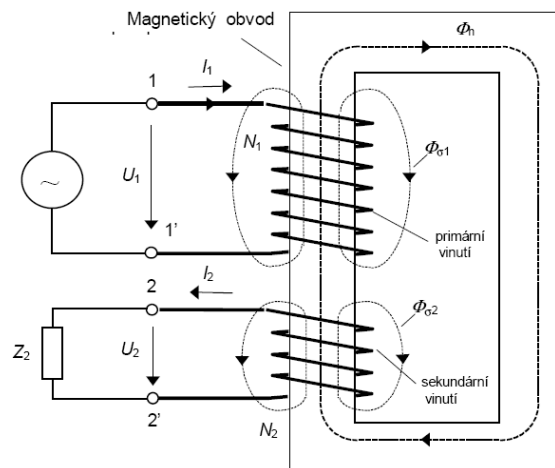
1.4 Princip činnosti skutečného transformátoru

Skutečný transformátor vychází z ideálního transformátoru, doplněného o vedlejší obvodové prvky. Primární napětí U_1 je harmonické a magnetický obvod není nasycen (pracovní oblast v lineární části charakteristiky). Připojením napětí U_1 na primární vinutí jim začne protékat proud I_1 , jehož magnetizační složka vytvoří střídavý magnetický tok Φ_n , který

se uzavírá jádrem a rozptylové toky Φ_{p1} a Φ_{p2} , které se uzavírají vzduchem. Časovou změnou hlavního magnetického toku se indukuje do závitů vinutí indukované napětí $U_{ind} = \frac{d\Phi}{dt}$ a jehož velikost je přímo úměrná počtům závitů N_1, N_2 jednotlivých vinutí. Připojením zátěžné impedance Z_2 na svorky sekundárního vinutí začne sekundárním obvodem protékat proud I_2 a do zátěže je dodáván výkon P_2 . Skutečný transformátor vykazuje při své činnosti činné ztráty a má také rozptyl kolem vinutí. [6]

1.5 Princip činnosti ideálního transformátoru

Princip činnosti je znázorněn na obr. 1.5.



Obr.1.5 Náčrtek jednofázového transformátoru s železným jádrem [6]

Pro ideální transformátor platí:

1. $\Sigma \Delta P=0, R_1=0, R_2=0 \Rightarrow$ tj. Celkové ztráty a činné odpory obou vinutí jsou nulové.
2. Rozptyl je nulový ($\Phi_{p1} + \Phi_{p2} = 0$)
3. Celý magnetický tok Φ_n prochází všemi závity primárního a sekundárního vinutí.

Střídavý proud v primárním vinutí I_1 vybudí střídavý magnetický Φ , který svou změnou indukuje ve vinutí transformátoru indukované napětí U_{ind} , závislé na velikosti kmitočtu primárního napětí f a magnetického toku Φ_m .

$$U_{ind1} = 4,44 \cdot f \cdot \Phi_m \cdot N_1 \quad (1.5)$$

$$U_{ind2} = 4,44 \cdot f \cdot \Phi_m \cdot N_2 \quad (1.6)$$

Kde $N_1, N_2 \dots$ počty závitů primárního (1) a sekundárního (2) vinutí

$\Phi_m \dots$ maximální hodnota střídavého magnetického toku

Poměr indukovaných napětí je převod transformátoru K .

$$\frac{U_{ind_1}}{U_{ind_2}} = \frac{N_1}{N_2} = K = \frac{U_1}{U_2} \quad (1.7)$$

Z předchozího vztahu pro ideální transformátor vyplývá, že velikost indukovaných napětí jsou přímo úměrná počtu závitů jednotlivých vinutí a odpovídají poměru napětí U_1 a U_2 na svorkách transformátoru.

Při předpokladu rovnosti příkonu P_1 a výkonu P_2 ($\cos \varphi = 1$, ztráty $\Delta P = 0$)

$$P_1 = P_2 \Rightarrow U_1 \cdot I_1 = U_2 \cdot I_2 \Rightarrow \frac{I_2}{I_1} = \frac{N_1}{N_2} = \frac{U_1}{U_2} = K \quad (1.8)$$

Ideální transformátor je charakterizován jediným parametrem – převodem K . [6]

1.6 Ztráty transformátoru

Při provozu transformátoru vznikají nežádoucí elektrický jevy a různé stavy zatížení. Tyto jevy a stavy mají vliv na účinnost transformátoru a na velikost ztrát. Ztráty v transformátoru se dělí na ztráty naprázdno a ztráty nakrátko. Účinnost stroje je dána poměrem výkonu a příkonu. Rozdíl mezi daným poměrem jsou právě ztráty. Velikost účinnosti a ztrát se mění v závislosti na zatížení. V praxi jsou ztráty naprázdno značně menší nežli ztráty nakrátko. Při konstrukci transformátoru lze pomocí úpravy plechů a vinutí ztráty velmi snížit, ale výroba transformátoru se prodraží. [7]

1.6.1 Ztráty naprázdno

Připojíme-li vstupní vinutí na střídavé napětí a na výstupní napětí nepřipojíme žádnou zátěž (spotřebič), tak říkáme, že transformátor pracuje naprázdno.[6]

V dané situaci vznikají v transformátoru ztráty naprázdno. Ztráty naprázdno vznikají v magnetickém obvodu transformátoru a průchodem proudu naprázdno ve vstupním vinutí.

Ztráty ve vinutí jsou velmi malé a v praxi jsou zahrnuty do ztrát v magnetickém obvodu. V magnetickém obvodu vznikají ztráty vířivými proudy a hysterezní ztráty. Pro omezení ztrát vířivými proudy použijeme izolované magnetické plechy, čímž snížíme ztráty vířivými proudy. Dalším možným zpracováním je válcování plechů za studena, což pomáhá ke snížení měrných ztrát oproti plechům válcovaným za tepla. Do ztrát naprázdno se započítávají i ztráty jako je magnetostrikce. Magnetostrikce značí změnu mechanických rozměrů magnetického obvodu úměrné magnetickému toku (typické bzučení transformátorů). [8].

1.6.2 Ztráty nakrátko

Stav nakrátko je poruchový stav transformátoru. Vzniká při něm velmi velký zkratový proud, který ohrožuje transformátor svými tepelnými a mechanickými účinky. Při tepelném namáhání vinutí může dojít k jejich natažení a k deformaci závitů. Dochází k poškození izolace a k možnosti přeskoku náboje mezi vinutími, který neblaze zhoršuje odolnost olejové ochrany v nádobě. Pokud nedojde k odpojení zkratu, tak hrozí vzplanutí oleje či výbuchu transformátoru.

Ztráty nakrátko jsou hlavně Joulovy ztráty, které vznikají průchodem zkratu vinutím transformátoru. Ztráty v magnetickém obvodu jsou zanedbatelné. Ochrana proti ztrátám nakrátko je dobrá ochrana proti samotným zkratům. Jedná se hlavně o rychlé odpojení transformátoru pomocí vypínače v hodnotách milisekund a kvalitní izolace, která je schopná vydržet krátkodobý poruchový stav a musí se pravidelně kontrolovat. Důležitým ukazatelem odolnosti transformátoru je tzv. napětí nakrátko, které se značí „uk“. Napětí nakrátko je napětí, které musíme připojit na vstupní vinutí transformátoru, aby výstupním vinutím spojným nakrátko procházel jmenovitý proud transformátoru. [7] Udává se v procentech ze jmenovitého napětí a bývá v rozmezích 4-15 %. U speciálních transformátorů bývá hodnota větší. Tím je větší hodnota napětí nakrátko, tím větší napětí musíme přiložit, aby protlačil jmenovitý proud výstupním vinutím. O hodnotě napětí nakrátko rozhoduje kvalita provedení vinutí.[8].

1.7 Účinník

Účinník je fyzikální veličina, která vyjadřuje podíl činného (užitečná energie) vůči zdánlivému výkonu (součin napětí a proudu procházející obvodem). Jinak řečeno vyjadřuje, jak velkou část zdánlivého výkonu lze přeměnit na užitečnou energii. Účinník závisí na vzájemném fázovém posuvu napětí a proudu. Účinník je bezrozměrná veličina a jeho velikost se pohybuje od 0-1 a značí se $\cos\varphi$. $\cos\varphi=1$ značí, že zdánlivý výkon je rovný činnému a fázový posuv je nulový. $\cos\varphi=0$ znamená, že celý zdánlivý výkon je tvořen jalovým výkonem, tudíž je zátěž buď čistě kapacitní a nebo čistě induktivní a fázový posuv je $\pm 90^\circ$. Nízké hodnoty účinníku znamenají vyšší ztráty a jde o nepříznivý stav. Jestli obvod obsahuje i součástky nesinusového charakteru, je třeba vedle jalového výkonu uvažovat i tzv. deformační výkon. Zlepšení hodnoty účinníku lze provést správným návrhem a provozováním zdrojů, spotřebičů (využití synchronních strojů atd.) a přenosové soustavy nebo použitím kompenzačních zařízení. Kompenzaci účinníku můžeme docílit také snížením tepelných ztrát

v rozvodové soustavě. [9]

1.8 Přejídné děje a přepětí v transformátorech

Při každé změně provozních podmínek dochází v transformátorech k tzv. přechodným dějům, jedná se o připojení transformátoru na síť, o rychlou změnu zatížení, zkrat v síti a v dalších možných případech. Ve vinutí v transformátorech při přechodných dějích dochází k působení elektromagnetických jevů, které jsou potřeba podrobit měření, neboť mají velký vliv pro návrh, provoz a zabezpečení transformátoru. [3]

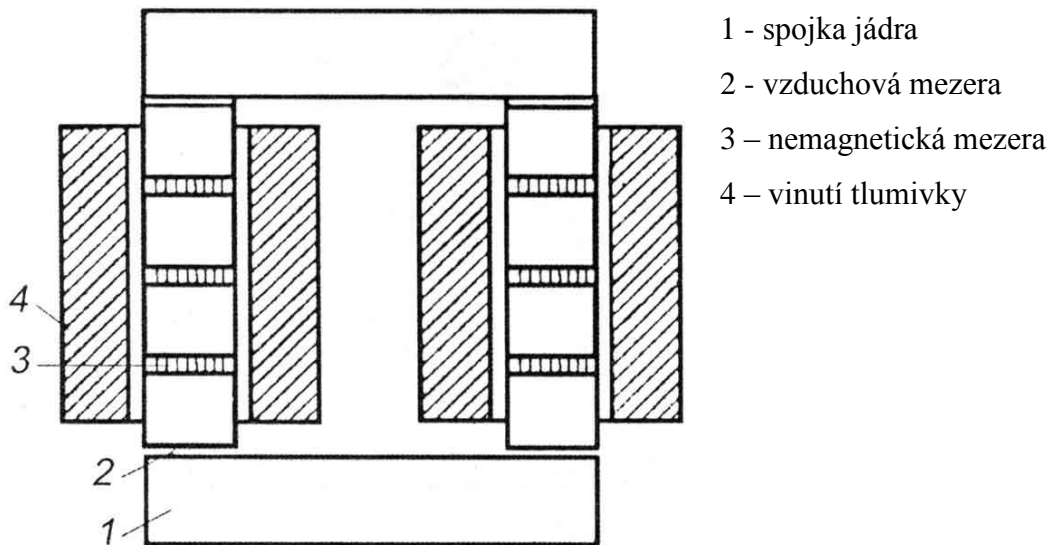
Přepětí je druh napětí, které je větší nežli požadované či navrhované pracovní napětí a má jinou frekvenci, tvar či obojí. Důvodem přepětí může být havarijní stav, spínací pochody či atmosférické výboje. Jako havarijní stav bereme zkraty, které mohou vznikat na vedení a jde o velmi závažný problém, protože zde vznikají velké vyrovnávací proudy, které mohou poškodit elektrické spotřebiče. Jako spínací pochody bereme zapnutí či vypnutí transformátoru či sítě. Atmosférické výboje jsou přímý úder blesku do vodiče (do vedení), nebo do sloupu a od blesků indukované elektromagnetické vlny vysokého napětí. Přepětí má charakter periodických vln anebo krátkodobých impulzů.

Jelikož se v síti objevuje kapacita a indukčnost, tak zde mohou vzniknout kmity různých frekvencí. V transformátoru jsou prvky indukčnosti, kapacity a odporu a to mezi vinutími a uzemněnými částmi transformátoru, mezi závity a mezi cívkami vinutí. Přepětí mohou dosahovat u komutačních procesů až 4 násobek fázového napětí trvajíc několik desítek mikrosekund. Atmosférické přepětí dosahují až 10 násobek fázového napětí trvajíc až několik mikrosekund. [10]

1.9 Tlumivka

Tlumivka je přístroj s jediným vinutím. Zařazuje se do elektrického obvodu k zvýšení jeho indukčnosti. Tlumivka se používá k tlumení proudových nárazů, ke spouštění velkých motorů, ke zlepšení paralelního chodu transformátorů apod.

Konstrukčně se podobá transformátoru. Vyrábí se buď v jádrovém provedení, s polovinou cívky na každém jádře, nebo plášťovém provedení. Jádro může být železné, nebo i z nemagnetického materiálu.



Obr. 1.11 Jednofázová tlumivka se železným jádrem: [12]

Aby změna úbytku napětí byla úměrná proudu v širokém rozmezí, vyrábí se železná jádra tlumivek s nemagnetickými mezerami (3). Výhodnější je větší počet menších mezer, v nichž se tak neprojevuje vliv rozšíření magnetického toku v poměru k průřezu, jak je tomu ve velkých mezerách. Mezery mají být v části jádra, které je obklopeno vinutím (4). Mezery (2) mezi jádrem a spojkou (1) mají být co nejmenší, neboť při velkých mezerách vznikají velké přídavné ztráty. [12]

1.10 Konstrukce transformátoru

1.10.1 Vinutí

Při skládání vinutí transformátorů se skládá vinutí vysokého napětí na vinutí nízkého napětí pro lepší možnost chlazení. Vinutí nízkého napětí je obvykle vyrobeno z měděného nebo hliníkového vodiče. Druh a tvar vodiče tak jako druh vinutí závisí na proudu i napětí a volí se případ od případu. Pro proudy několika kA se dává přednost svazkovému vodiči. Tato technologie spojuje vynikající mechanické vlastnosti se snížením ztrát vířivými proudy.

Pro větší proudy a zvláštní aplikace se používají měděné pásy. To umožňuje při odpovídajícím zpracování vyrobit velmi pevné vinutí, které je schopno odolávat dynamickému namáhání při opakovaných zkratech (např. pecní transformátory nebo zkušební transformátory). U transformátorů může být sekundární vinutí (nízkého nebo vysokého

napětí) rozděleno na části uspořádané radiálně nebo axiálně.

Vinutí vysokého a velmi vysokého napětí je obvykle vyrobeno z měděného nebo hliníkového páskového vodiče s papírovou izolací. Také v tomto případě se používá mnoho druhů vodičů a druhů vinutí a volí se případ od případu. Pro napětí vyšší než cca 70 kV se používá prokládaného deskového vinutí, aby se vhodně rozložilo rázové přepětí. [13]



Obr. 1.12 Ukázka vinutí transformátoru [13]

1.10.2 Magnetický obvod

Tvar magnetického obvodu se vždy přizpůsobuje tvaru cívek, které se následně na magnetický obvod přidělá. [7] Jádro z transformátoru je z feromagnetických materiálů, které je z důvodů omezení vířivými proudy složeno z magnetických plechů, které jsou mezi sebou vzájemně izolovány. Podle provedení magnetického obvodu rozlišujeme transformátory na plášťové a jádrové.



Obr. 1.13a Jednofázový transformátor jádrový [8]

Obr. 1.13b Jednofázový transformátor plášťový [8].

Jednofázové transformátory jsou nejčastěji plášťový. Vinutí je následně umístěno na středním sloupcu (3), který má největší průřez. Magnetický tok (Φ) se rozděluje rovnoměrně do obou postranních sloupců, které mají dvakrát menší průřez nežli střední sloupek. Výhoda tohoto uspořádání je dobré rozdělení magnetického toku (jsou malé rozptyly), dále jednoduché navíjení na jednu cívku a poměrně kvalitní upevnění svazku jádra. Nevýhodou je horší chlazení, které ovlivňuje možnost využití této technologie pro velmi výkonné transformátory.

Plášťové transformátory menších výkonů (do 200 W) mívají jádra složená z plechů do tvaru M, častěji se však používají plechy do tvaru EI. Magnetický obvod malých plášťových transformátorů se skládá z plechů, které se navlékají na hotové cívky.

Pro větší výkony se užívají jádrový typ transformátoru. U jádrových transformátorů se pro zmenšení rozptylových toků dává polovina vinutí nižšího napětí (nn) a polovina vyššího napětí (vn) na každý sloupek. Transformátory tohoto typu mají lepší chlazení než plášťové. [3]

1.10.3 Nádoba transformátoru

Olejová nádoba transformátoru udržuje olej uvnitř transformátoru a chrání aktivní části. Nádoba musí vydržet tlak cca $0,5 \times 10^5$ Pa, aby se nedostala vlhkost do oleje a ten neztrácel své vlastnosti. [8] Tvarem a půdorysem se nádoba přizpůsobuje požadavkům jako potřebné množství oleje, možnosti připojení průchodek či budoucí přepravě.[11] Nádoba se vyrábí pomocí ocelových plátů, které jsou následně svařovány. Poté dochází ke zkoušce těsnosti svárů. Transformátor je nutné po výrobě dopravit do místa provozu a to při váze i 10ky tun. Transformátor, nádoba a olej se samostatně přepravují u nejtěžších zařízení pomocí nákladních automobilů či železniční dopravy. Nádoba je zpevňována žebry pro zvýšení mechanické odolnosti, upínacím systémem pro připojení k jeřábu. Velmi často je na spodku nádoby připojen podvozek a transformátor stojí na místě provozu na kolejnicích pro snazší budoucí manipulaci či případnou výměnou.

Používají se tři druhy nádob vanová, zvonová a samonosná nádoba. U zvonové nádoby se při revizi zvedá pouze víko nádoby a tak není nutné vytahovat aktivní část z nádoby, ale před revizí se musí vypustit veškerý olej. Samonosná nádoba je výhodná při přepravě, kdy je celé váha rozložena na dva podélné nosníky. Tento typ nádoby se využívá pro nejtěžší transformátory. Nejpoužívanější nádoba je vanová. Vana a víko jsou k sobě spojeny pomocí šroubů a spoj je těsně upevněn pomocí tlaku vzdornou izolací. Při revizi není nutné vypouštět

olej, ale je potřeba aktivní části transformátoru vytáhnout ven.

Prakticky všechny větší transformátory mají na nádobě připevněny velké množství ochranných zařízení. Jedná se např. o olejové chlazení, buchholozovo relé, čidla kvality oleje, výbuchový ventil atd. [8].

1.11 Buchholzovo relé

Buchholzovo relé představuje ochranné zařízení pro transformátor, jehož kapalně dielektrikum tvoří olej. Buchholzovo relé je umístěno v potrubí mezi transformátorovou a dilatační nádobou. Je určeno k signalizaci vnitřní poruchy a ztráty potřebné izolace oleje vysláním signálního nebo vypínacího impulsu. V případě částečných výbojů, povrchových proudů, místního přehřátí nebo nadměrného oteplení vlivem vysokých vířivých proudů vznikajících v kovových částech se rozkládá izolační olej a tuhý izolační materiál s výsledným vznikem plynu. Plyny se hromadí v Buchholzově relé a vytlačuje izolační olej zde obsažený. Když se nahromadí určité množství plynu, plovák uvede v činnost signalizační spínač. Tak může obsluha zjistit možné poruchy dostatečně brzy a provést vhodné měření, aby se zabránilo většímu poškození.

Jestliže se obloukový výboj vysoké energie vyskytne uvnitř chráněného transformátoru, je výsledkem velmi rychlý rozklad izolačního materiálu. Vytvořená tlaková vlna izolačního oleje proudí trubkou do Buchholzova relé. Za určité průtokové rychlosti uvede vytvořený proud v činnost magneticky drženou vypínací klapku a následně i vypínací spínač. Stejný spínač je uveden v činnost plovákem spřažením s vypínací klapkou, když netěsnost v chráněném transformátoru způsobí, že hladina izolačního oleje v trubce klesne pod stanovenou hodnotu. [9]

2 Pecní transformátory

Pecní transformátory jsou navrženy pro napájení obloukových, indukčních a odporových elektrických pecí. Návrh a konstrukce pecních transformátorů jsou určeny řadou zvláštních parametrů, které jsou odlišné od klasických transformátorů pro distribuční účely. [14] U klasických distribučních transformátorů je nejhlavnější parametr tzv. převod transformátorů, který vyjadřuje poměr vstupního a výstupního napětí. Avšak u pecních transformátorů je nejhlavnější parametr výstupní proud, který následně v pecích roztavuje vsázku.[7] Pecní transformátory jsou robustná zařízení, která jsou navržena tak, aby byla krátkodobě schopna pracovat i s 100-200% přetížením (např. výrobce může udat možnost přetížít pecní transformátor o 50 % po dobu 30 min.) viz. Tab. 2.1. [14]

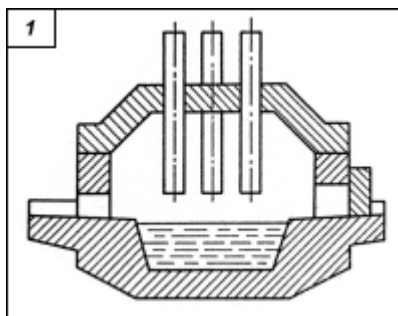
<i>Přetížení</i>	<i>Možnost přetížení [min]</i>	<i>Potřebná přestávka bez zatížení [min]</i>
100 %	5	30
50 %	30	60
25 %	120	240

Tab. 2.1 Možnost přetížení pecních transformátorů [16]

Další charakteristickým parametrem je “relativně” malé napětí na sekundární straně (v řádech 100 V), jež vede k velkým proudům (v řádech 1000 A). Napětí na sekundární straně se dá rozsáhle měnit pomocí odboček a tím určovat velikost sekundárního napětí a proudu. Tyto odbočky mají malý počet závitů, někdy dokonce jeden či dva závity. [14]

2.1 Obloukové pece

Elektrická energie se u obloukových pecí mění na teplo v silném elektrickém výboji v oblouku hořící v ionizovaném prostředí par a plynů. Plyny jsou za normálních podmínek nevodivé, ale díky ionizaci se stávají vodivými. Ionizace plynu může nastat radioaktivním či rentgenovým zářením, elektrickým polem či vysokou teplotou => termoelektrická ionizace. Obloukové pece využívají termoelektrickou ionizaci. Obloukové pece se nejčastěji stavějí na střídavý trojfázový proud. Oblouk hoří mezi třemi elektrodami a vsázkou viz. Obr. 2.1. Jednofázově se stavějí pro pece malých výkonů. [14]



Obr. 2.1 Oblouková pec [25]

2.2 Pecní transformátor pro obloukové pece

Součástí obloukové pecního zařízení je trojfázový pecní transformátor, z něhož se napájí tři elektrody. Obloukové pece se vyrábějí do takových příkonů, které představují jeden z největších elektrických spotřebičů vůbec (příkony několik set megawatt). Proudů v obloucích dosahují až 10^5 A při napětí na oblouku cca 500-800 V. [14] Důležitou vlastností pecních transformátorů je možnost regulovat napětí a proud na sekundární straně pomocí odboček. Regulace vždy probíhá na vstupní straně transformátoru kvůli vysokým proudům na sekundární straně. Při regulaci jde hlavně o ovládání velikosti oblouku v dané peci (viz. Tab. 2.1). [7]

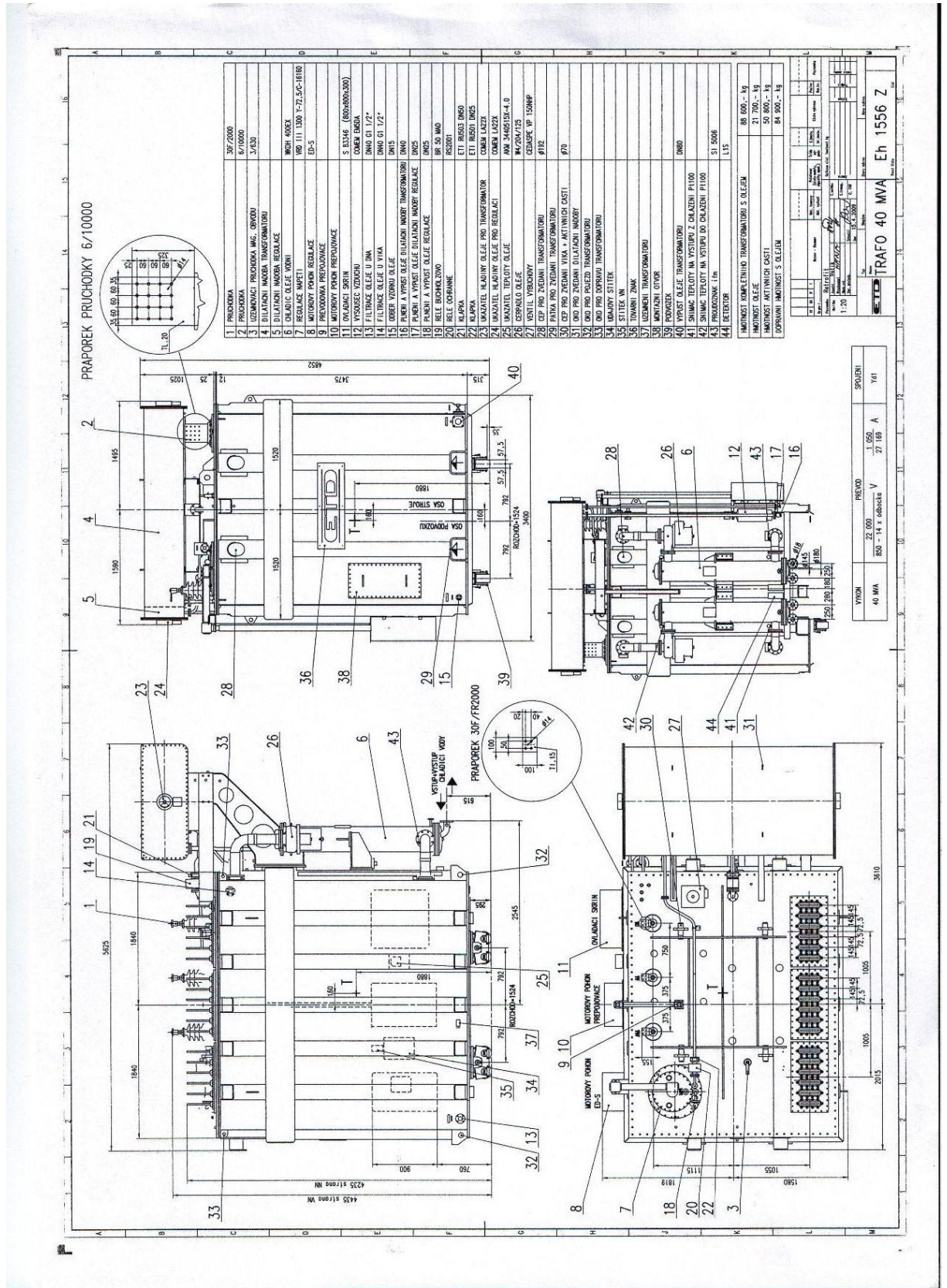
Stupeň odboček	Napětí nn [V]	Proud nn [kA]	Napětí vn [kV]	Proud nn [A]	Napětí nakrátko [%]
1	851,51	27,12	22	1049,73	7,6
2	810,75	28,48	22	1049,73	8,5
3	773,71	29,85	22	1049,73	9,5
4	739,91	31,21	22	1049,73	10,5
5	708,93	32,58	22	1049,73	11,6
6	680,45	33	22	1020,67	12,5
7	654,17	33	22	981,25	13,2

Tab. 2.2 Ukázka přepínání sekundární části větve [17]

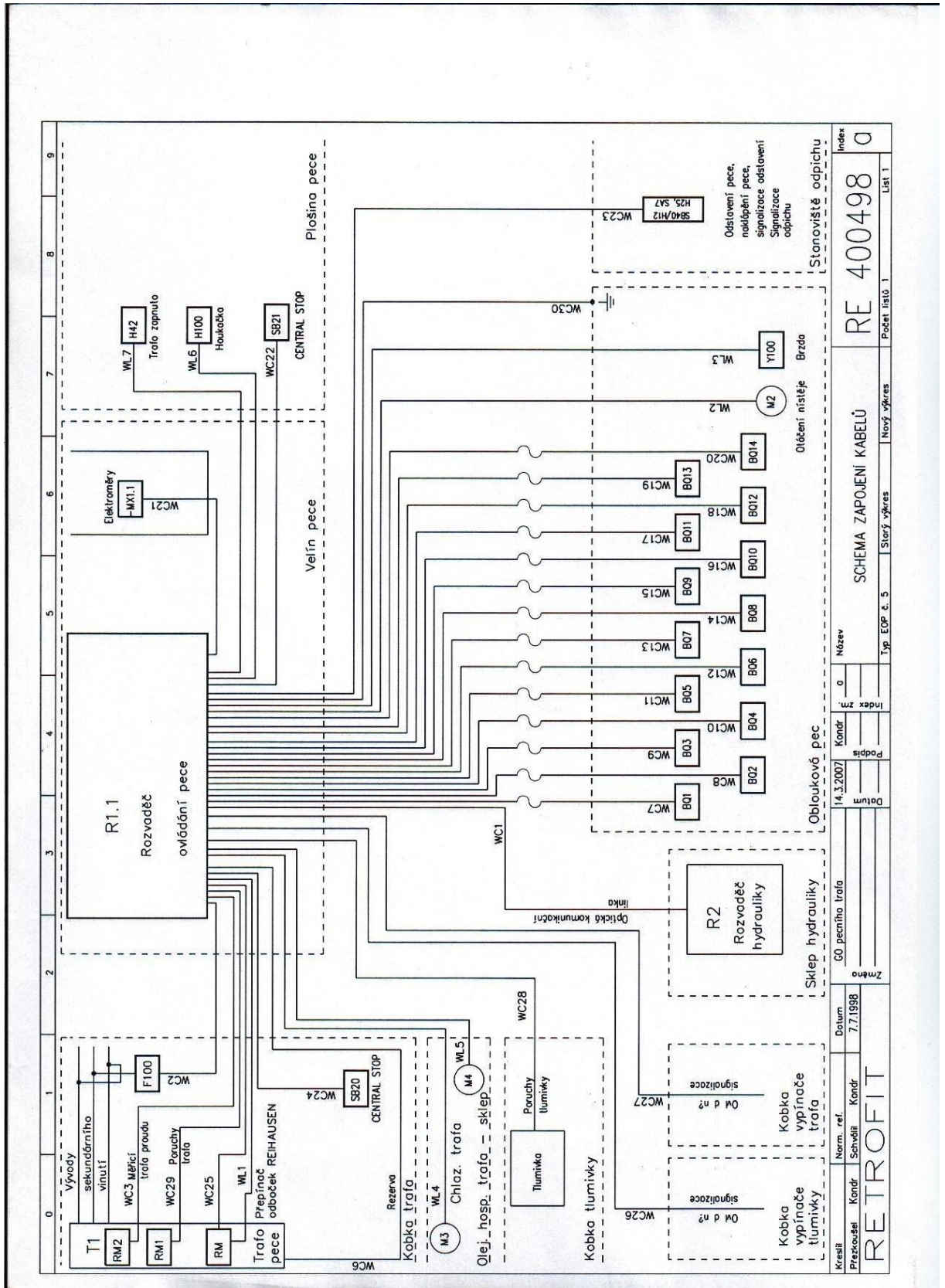
V dnešní době se používají zapojení Dd0 nebo Yd1. Výstupní vinutí je zapojeno do trojúhelníka a má vyvedeno všech 6 konců. Zde se transformátor zapojí na tzv. krátkou cestu (či krátká síť). [14] Přepínač hvězda-trojúhelník se užívá hlavně během tavení vsázky. Během tavení se používá maximální příkon, jelikož zde je energetická náročnost největší. Po roztavení vsázky se přepínačem hvězda-trojúhelník sníží příkon na jednu třetinu. V dané situaci v podstatě stačí krýt tepelné ztráty pece. [16] Již zmíněná krátká cesta jsou tři masivní

ohebná lana, které vedou do samotné obloukové pece. Prochází přes ně velké proudy a vzniká velké oteplení (zvláště při zkratech či přetížení). U velkých pecních transformátorů je krátká cesta chlazena vodou či olejem. Jedná se zejména o místo spojení krátké cesty s transformátorem. Je snaha, aby všechny tři kabely byly elektricky naprosto stejné a aby došlo k elektrické rovnosti mezi nimi, avšak v praxi je to nereálné. [17] Elektrody, které jsou zapojeny ke krátké cestě, velmi ovlivňují charakter oblouku. Kvůli nestálosti oblouku se mohou proudy při běžném provozu skokově měnit až o 100ky A, proto je velmi důležité regulovat vzdálenost elektrod od vsázky (velikost oblouku), aby oblouk hořel klidně a s optimální účinností.

Pecní transformátory musí snášet časté zkraty a předepsaná zatížení. [14] Musí mít velmi tuhou konstrukci. V praxi se do pecních transformátorů dává až o 20 % více magnetického materiálu než je obvyklé. Magnetický obvod je pevně svázán k sobě a jsou na něj kladeny větší nároky než u normálních distribučních transformátorů. Vlivem častých zkratů se užívají odolnější izolace. Magnetický obvod a izolace jsou koncipovány, aby byly schopny zvládat časté zkraty a jejich následné tepelná a dynamická namáhání. Olej u pecních transformátorů se kontroluje dle praxe 2-3krát častěji. Bývá obvyklé, že pod pecními transformátory je "kobka" se štěrkem, která se užívá v případě možné havárie a do které se preventivně vylije olej s transformátoru.[7] Pecní transformátory používají olejové chlazení, které je klasické jako u běžných distribučních transformátorů. U menších pecních transformátorů je napětí nakrátko 5 % až 10 %. Pro velké výkony je napětí nakrátko i přes 10 %.[14] Obvykle se před pecní transformátor zapojuje tlumivka do série, která se automaticky zapíná při zahořívání oblouku, kdy tlumivka tlumí počátečné nárazové proudy.[7]



Obr. 2.1 Ukázka nádoby pecního transformátoru s příslušenstvím [17]



Obr. 2.2 Ukázka zapojení vodičů v pecním transformátoru [17]

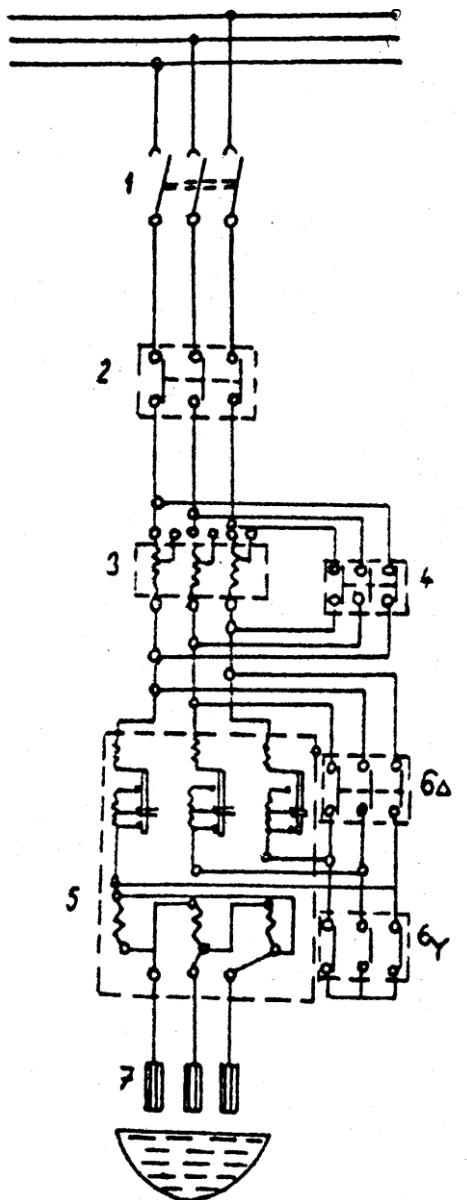
2.3 Kompenzace pecních transformátorů

Obloukové pece jsou jedny z nejvíce problematických zařízení z hlediska jejich zpětných vlivů na síť. Vykazují velkou proměnlivost odebíraného výkonu, která způsobuje kolísání napětí a velké proudové rázy. Pro stabilní hoření a pro dosažení požadovaného výkonu na oblouku je podmíněno účínkem $\cos\varphi=0,7-0,85$, což znamená značné zdražení odběru elektrické energie, protože velkoodběratelé musí zaručit, že budou dodržovat $\cos\varphi=0,95$ a výš, jinak budou platit penále (cca 0,4 Kč/kvar.h) [7] $\cos\varphi=0,7-0,85$ dále znamená značné zvýšení tepelných ztrát v ohmických odporech prvků elektrické soustavy, které jsou závislé na druhé mocnině zdánlivého proudu, což znamená, že pro účíník $\cos\varphi=0,7$ jsou tepelné ztráty dvakrát vyšší než pro účíník $\cos\varphi=1$. Pro velké obloukové pece se využívají tzv. individuální kompenzátory, což jsou kompenzační zařízení, které jsou přímo spojeny na svorkách spotřebiče jalového výkonu anebo v jeho blízkosti. Nežádoucí jalová energie je eliminována přímo v místě vzniku. Tím odpadají možné ztráty na vedení.

Pro kompenzaci kolísání napětí se využívá tzv. flicker. [24] Flicker je anglický název pro „blikání světla“ způsobované kolísáním napětí vlivem připojení obloukových pecí a jejich nerovnoměrným odběrem proudu. Pro částečnou kompenzaci se využívá kapacity kondenzátorů, které se v případě nutnosti připojují na síť, protože úbytky napětí v síti způsobuje hlavně induktivní reaktance sítě. Při připojení kondenzátorů na síť, tak vznikne kapacitní zátěž a úbytek napětí bude kompenzován. [24]

Při provozu obloukových pecí (pecních transformátorů) dochází ke značně složitým jevům v elektrických obvodech, protože elektrický oblouk sám o sobě má zcela výjimečné elektrické vlastnosti a to i při poměrném klidném hoření, natož při roztavení vsázky. Z toho důvodů se musí daná zařízení co nejlépe kompenzovat, aby negativní následky na síť byli co nejmenší a hospodárně nejvýhodnější. Využívají se speciální zapojení kabelů pro krátkou cestu, kdy se počítá vlastní a vzájemná indukčnost či regulace výšky elektrod od vsázky.[14]

2.4 Elektrické zařízení obloukových pecí



1 - odpojovač: slouží k odpojení elektrické části od sítě ve vypnutém stavu.

2 - vysokonapěťový vypínač: slouží k vypínání pece za provozu. Vhodná vypínat při minimálním příkonu.

3 - tlumivka: snižuje proudové nárazy do sítě.

4 - vypínač tlumivky: vypíná tlumivku pro co nejvhodnější provoz pece.

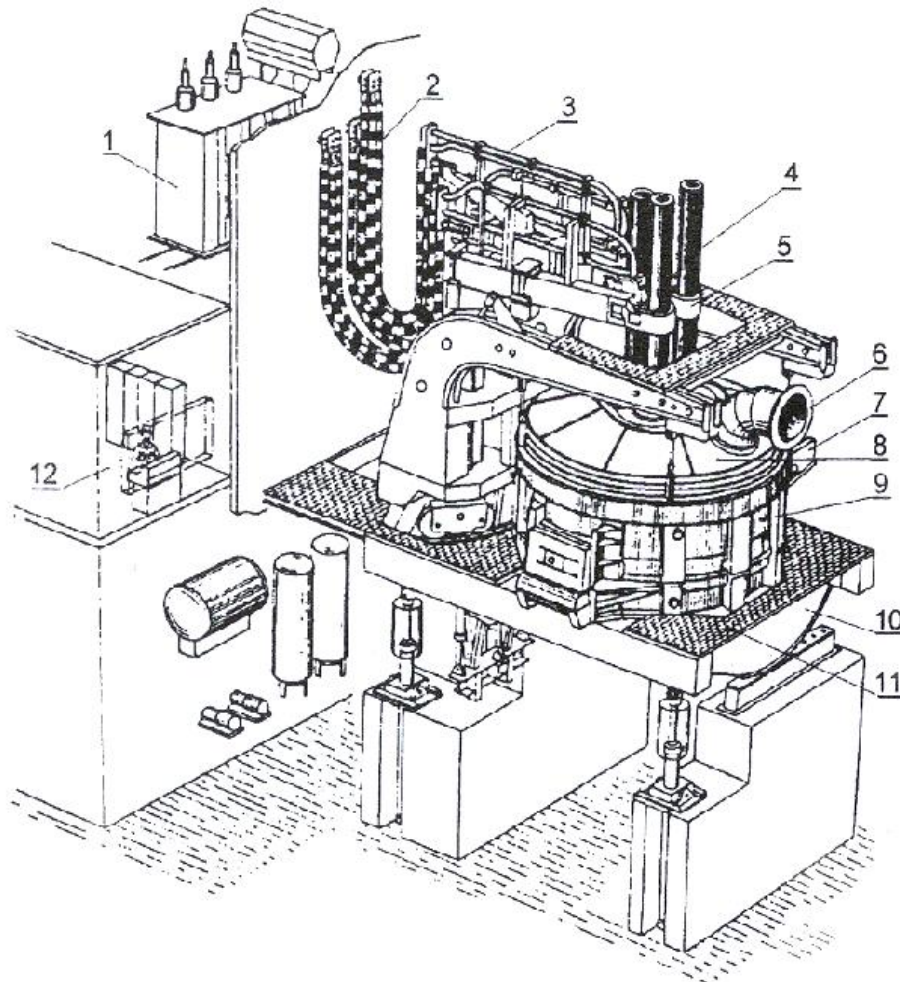
5 - pecní transformátor

6 - zapojení ΔY : reguluje napětí

7 - krátká cesta.

Obr. 2.3 Elektrické schéma obloukové pece [18]

2.5 Oblouková pec



Obr. 2.4 Schéma zařízení obloukové pece [19]

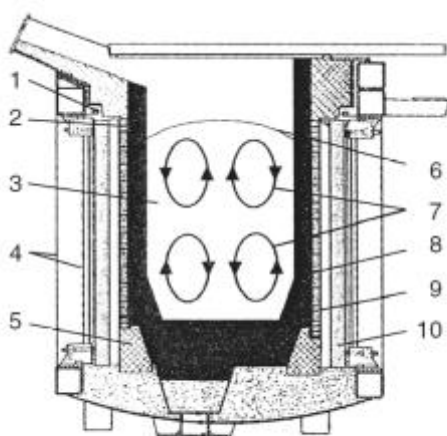
- | | |
|-----------------------------|--|
| 1 - pecní transformátor | 7 - výpust |
| 2 - krátká cesta | 8 - poklop |
| 3 - trubky s chladicí vodou | 9 - pec |
| 4 - elektrody | 10 - jedna ze dvou kolébek umožňující naklánění pece |
| 5 - uchycení elektrod | 11 - podstavec pece |
| 6 - odvod pecních plynů | 12 - řídicí stanoviště |

2.6 Indukční elektrotepelná zařízení

Indukční ohřev je možný jen u elektricky vodivých materiálů. Ve vodivém materiálu, který je vložen do střídavého magnetického pole, se indukují vířivé proudy a daný materiál se zahřívá. Teplo se do materiálu dostává střídavým magnetickým polem a vzniká přímo ve vsázce, která je nejteplejší částí cele soustavy (ostatní části pece se nezahřívají). [14] Prakticky jde o vzduchový transformátor, kde cívka je stranou primární a vsázka je stranou sekundární, která je spojena nakrátko. [20] Vznik tepla přímo ve vsázce, když vsázka není ničím mechanicky vázána patří k největším výhodám indukčního ohřevu. [14] Další vhodnou vlastností je, že volbou kmitočtu můžeme volit tloušťku vrstvy u povrchu vsázky. [21] Indukční ohřev získává stále větší význam v oblasti metalurgie, strojírenství atd.

2.6.1 Indukční tavící pec kelímková

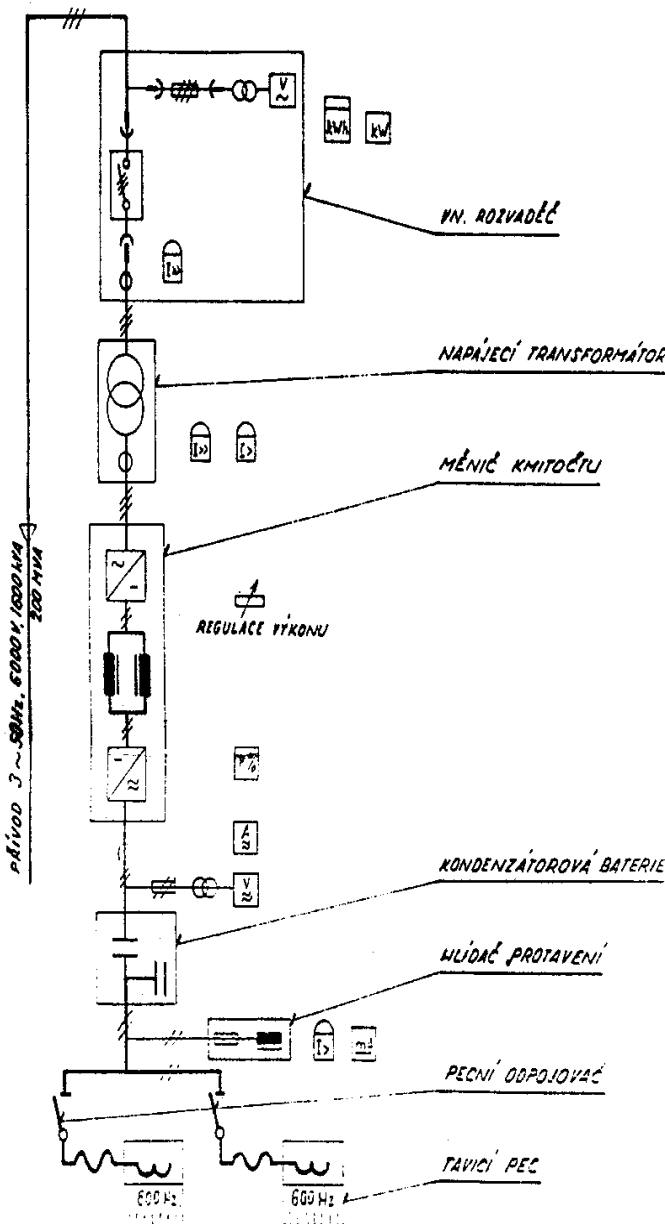
Na vnější straně keramického kelímku (8) je umístěn induktor (9), který je vodou chlazen z důvodu vysokých procházejících proudů (tisíce ampérů). Induktor je napájen ze zdroje střídavého proudu frekvencemi v rozmezí 50 Hz až 4000 Hz. Vlivem indukovaných vířivých proudů a elektrodynamických sil dochází uvnitř kelímku k intenzivnímu proudění materiálu (7), což se projeví kopulovitým zaoblením horní hladiny (6). Díky pohybu taveniny je zaručeno rovnoměrné promísení základní oceli s letovacími přísadami.



- 1 - kroužek spojený nakrátko
- 2 - vodou chlazený prstenec
- 3 - tavenina
- 4 - ocelová kostra
- 5 - betonový prstenec
- 6 - kopulovitá horní hladina
- 7 - pohyb taveniny
- 8 - kelímek
- 9 - induktor
- 10 - svazek plechů [22]

Obr. 2.5 Kelímková indukční pec [22].

2.6.2 Indukční tavící pec kelímková



Obr. 2.6 Elektrické schéma středofrekvenční pece

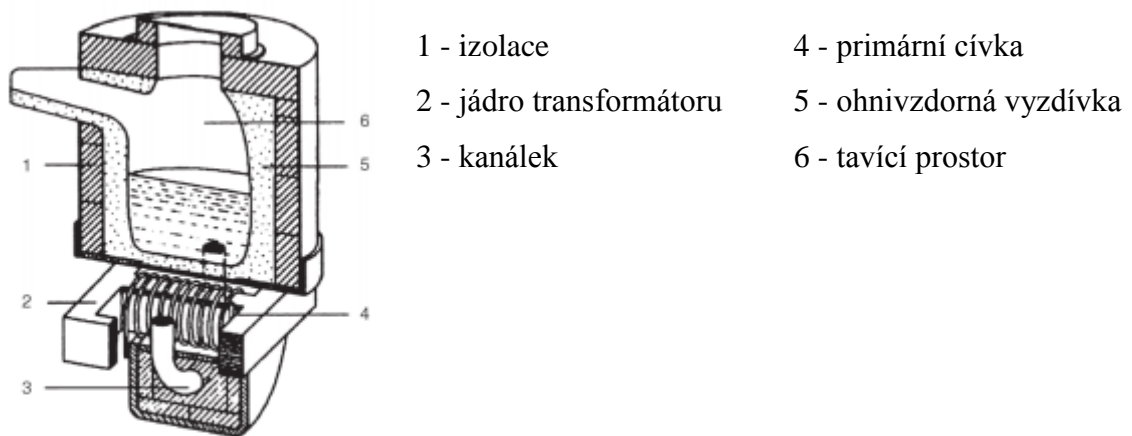
Zdrojem tepla u indukčních pecí jsou indukované proudy. Středofrekvenční indukční pece pracují s příkonem 500 - 1000 kW/tun. Pro slévárny přesného lití se staví nejčastěji pece s váhou tavby 40 až 250 kg, pro ostatní slévárny oceli 0,5 až 10t. U pecí na síťovou frekvenci (50 Hz) je možné použít s ohledem na víření lázně maximální příkon 300 kW/tun. Výrobnost pece závisí především na instalovaném příkonu zdroje. U pecí na síťovou frekvenci je možné instalovat výkonný zdroj jen u pecí s větší hmotností vsázky. Indukční pec je operativní tavící agregát vhodný pro přerušovaný provoz. U výkonných pecí jsou doby tavby kratší než jedna hodina. Při době odlévání 30 min. jsou schopny dvě indukční pece plynule zásobovat formovací linku tekutým kovem. V indukční peci nedochází k samovolnému nauhličování vsázky a jsou pro vhodné pro výrobu ocelí s nízkým obsahem uhlíku.[19]

Pece pracují se střední frekvencí (250 až 600 Hz). Pece na síťovou frekvenci jsou ve slévárnách oceli méně časté. S vyšší frekvencí (až 4000 Hz) pracují pece s malou hmotností vsázky používané jako laboratorní. Schéma středofrekvenční elektrické indukční pece kelímkové je na obr. 1.4. Pec je napájena ze sítě vysokého napětí přes pecní transformátor. Z pecního transformátoru je napájen měnič frekvence proudem o napětí obvykle do 6000 V. Proud je nejprve usměrňován na polovodičových diodách, vyhlazen tlumivkou a výkonovými tranzistory se vytváří potřebná

frekvence. Tranzistory jsou řízeny a frekvenci je možno plynule měnit. Proudem o střední frekvenci je napájen induktor. [15].

2.6.3 Kanálková indukční pec

Pro tavení neželezných kovů se používá kanálková indukční pec. Tavenina je umístěna v kotlíku s ohnivzdornou vyzdívkou (5). Pod kotlíkem je uložena primární cívka (4), navinutá na feromagnetickém jádru (2). Induktor z ohnivzdorného materiálu je obepnut jedním nebo několika kanálky (3), které ústí do taveniny. Roztavený kov uvnitř kanálku vytváří sekundární závit nakrátko a vlivem elektrodynamických sil proudí z kanálků do taveniny, hydrostatickým tlakem natéká do kanálku kov nový. Tímto způsobem je vsázka intenzivně promíšena. [18]



Obr. 2.7 Kanálková indukční pec [18]

3 Měření odběru pecních transformátorů

3.1 Úvod

Měření bylo provedeno pro firmu Plzeňská energetika a.s., která distribuuje elektrickou energii pro firmu Pilsen steel s.r.o. Pro připojení pecových transformátorů je uvažován pecový systém „W11“ v rozvodně ELU III. Přípojnice „W11“ je napájena transformátorem T1 ze sítě 110 kV. Transformátor T1 má nominální napěťový převod 110 kV/22 kV a nominální výkon 40 MVA. Do pecového systému přípojnice „W11“ jsou připojeny 3 pecní transformátory o výkonech do 15 MVA. Dané měření mělo za úkol zjistit možnost připojení motorgenerátoru o výkonu 7,75 MVA. Připojením motorgenerátoru do přípojnice „W11“ by došlo ke snížení odběru ze sítě 110 kV a zároveň by částečně eliminoval poklesy napětí vlivem připojených obloukových elektropecí. Měření ukazuje jaké možné vlivy mohou působit na připojené motorgenerátory při současném provozu elektropecí a to zejména zjištění možných negativních vlivů na jejich životnost a případné zvýšení počtů výpadků či vyšší poruchovost.

3.1.1 Měření

Pro objektivní posouzení možnosti připojení motorgenerátoru do této sítě bylo měření realizováno v síti 22 kV. Napětí se měřilo na sekundární straně pecových transformátorů s převodem 22 000 V/ 100 V. Proudů se měřily na sekundární straně napájecího transformátoru 110 kV/ 22 kV. Měření bylo provedeno pomocí proudových transformátorů s převodem 1250 A/ 1 A a pomocí měřících proudových kleští MN71 s rozsahem 2 A. Měření bylo zaměřeno na monitorování parametrů sítě a na sledování abnormálních jevů v síti vyvolaných proměnlivým odběrem i poruchovým stavem.

Monitorování parametrů sítě bylo zaměřeno na sledování úrovně napětí a proudového zatížení. Dále byl zaznamenáván i tok činného a jalového výkonu v jednotlivých fázích. Dalším sledovaným parametrem bylo i harmonické zkreslení v napětí a proudu. Měřené parametry sítě byly zaznamenávány každou sekundu vždy jako průměrná hodnota za 1s. U vybraných veličin je možné kromě průměrné hodnoty získat i minimální a maximální hodnotu.

Pro monitorování abnormálních jevů byl aktivován i záznam poruchových dějů (tzv. transientní záznamy) a událostí překračující zdané limitní hodnoty. Pro dané záznamy byly měřeny pouze hodnoty fázových napětí a fázových proudů. Délka záznamu jedné události je

nastavena na 10s. Každý naměřený vzorek z měřicího kanálu (3x napětí a 3x proud) byl ukládán s periodou 9600 vzorků za sekundu. Při zaznamenávání tří fázových napětí a tří fázových proudů je každou sekundu záznamu uloženo vždy 57 600 naměřených vzorků. Měření abnormálních jevů se aktivuje automaticky od překročení mezí pro napětí a pro proud. Jako napěťové meze fázových napětí byly pro běžné napětí zadány v rozsahu od 10 500V až 14 000 V (nominální napětí je 12701 V). Běžné meze pro proudový odběr byly zadány od 0 A do 1000 A efektivní hodnoty proudu a do 1400 A pro špičkové hodnoty proudu. Celkově bylo zaznamenáno 4300 událostí.

3.1.2 Monitorování zatížení

Během monitorování zatížení byly zaznamenávány průměrné hodnoty fázových napětí a proudů za 1 sekundu. Dále byly zaznamenávány údaje pro harmonickou analýzu a výkonové zatížení. Dané výsledky jsou zaznamenány jako časové průběhy v grafech. V případě grafického znázornění tří fází je zde použito barevné odlišení jednotlivých fází.

1. fáze - tmavě modrá barva
2. fáze - červená barva
3. fáze - zelená barva

3.2 Monitorování fázových napětí

Sdružená hodnota napětí ani nulová složka napětí měřeno nebylo. Měřeno bylo pouze fázové hodnoty napětí

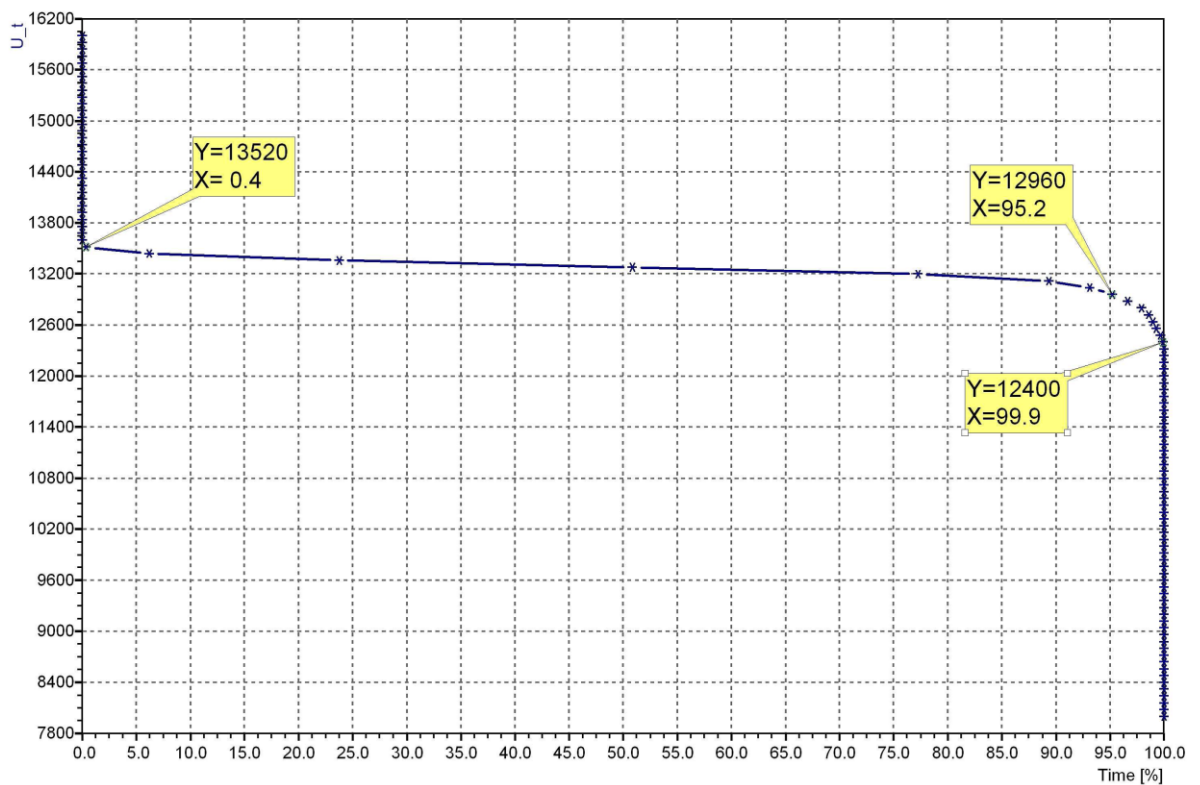


Obr. 3.1 Průběh fázových napětí za celé sledované období v síti 22 kV

Za sledované období se průměrné fázové hodnoty napětí pohybovaly v rozmezí hodnot od 11 700 V až do cca 15 000 V. Časový průběh napětí vykazuje značné kolísání. V relativně klidné části se napětí mění o cca desítky voltů s většími změnami na úrovni sta voltů. Tyto změny se náhodně opakují v intervalech jednotek minut až desítek minut. Během měření v síti byla zaznamenána jedna zemní porucha. Zemní porucha byla ve fázi L2.



Obr. 3.2 Detail časového průběhu průměrných hodnot změn fázových napětí za 4 sekundy při výrazném poklesu napětí

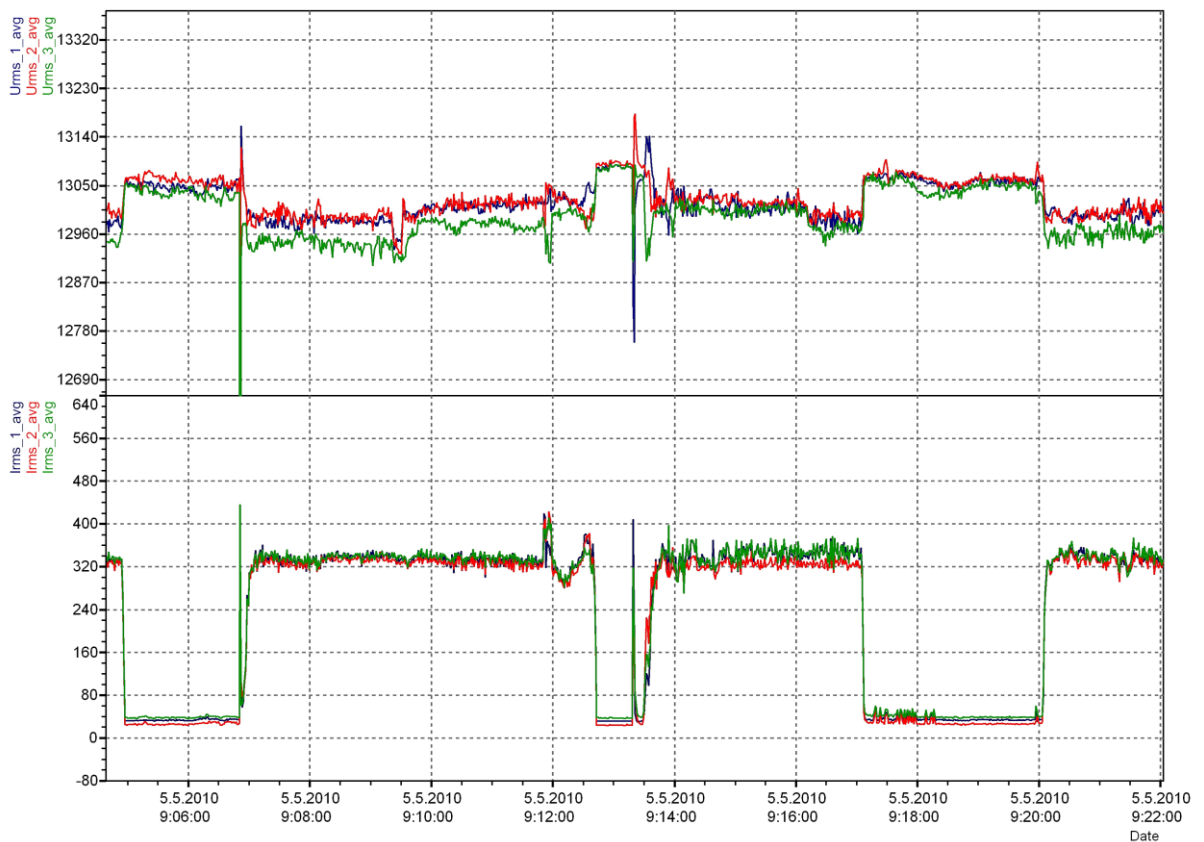


Obr. 3.3 Doba trvání napětí

V daném grafu můžeme vidět procentuální velikost fázového napětí ve sledovaném období. 99.9% doby bylo fázové napětí vyšší než 12 400 V (k tomu je sdružená hodnota 21 447 V). 95 % doby bylo fázové napětí vyšší než 12 960 V (k tomu je sdružená hodnota 22 440 V). 0.4% doby bylo fázové napětí vyšší než 13 520 V (k tomu je sdružená hodnota 23 400 V). Z daných údajů je zřejmé, že udržovaná hodnota sdruženého napětí je v síti nejčastěji v rozmezí 22,4 kV – 23,4 kV. Jen nepatrná část připadá na nižší nebo vyšší úroveň napětí kolem 13 00 V. Z toho je zjevné, že výkyvy napětí jsou skutečně krátkodobé a rychle odezní.

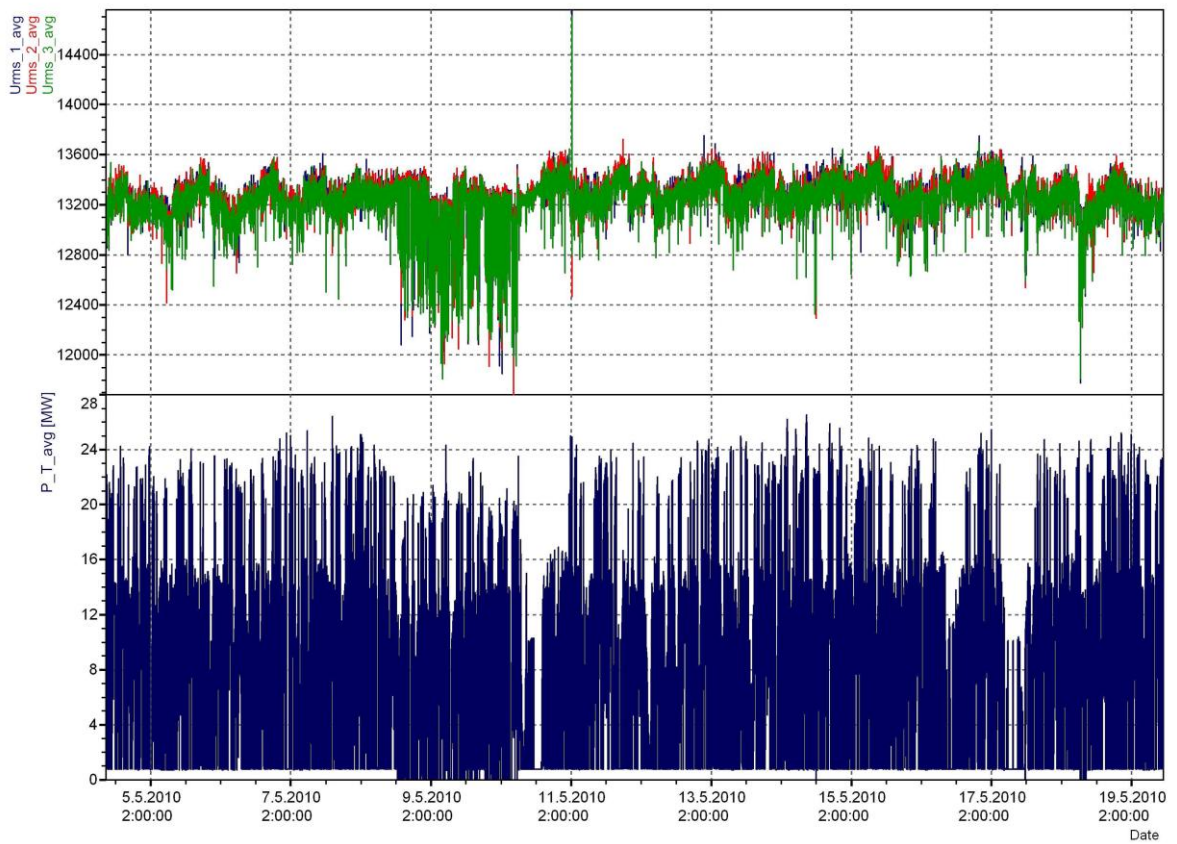
3.3 Časový průběh napětí a proudu

Pro zjištění zda poklesy napětí mají příčinu v napájené technologii (pecové transformátory) nebo zda jsou přenášeny z napájecí sítě je důležité porovnat časové průběhy napětí a proudu. Rovněž je důležité porovnat časové průběhy odebíraného jalového a činného výkonu.

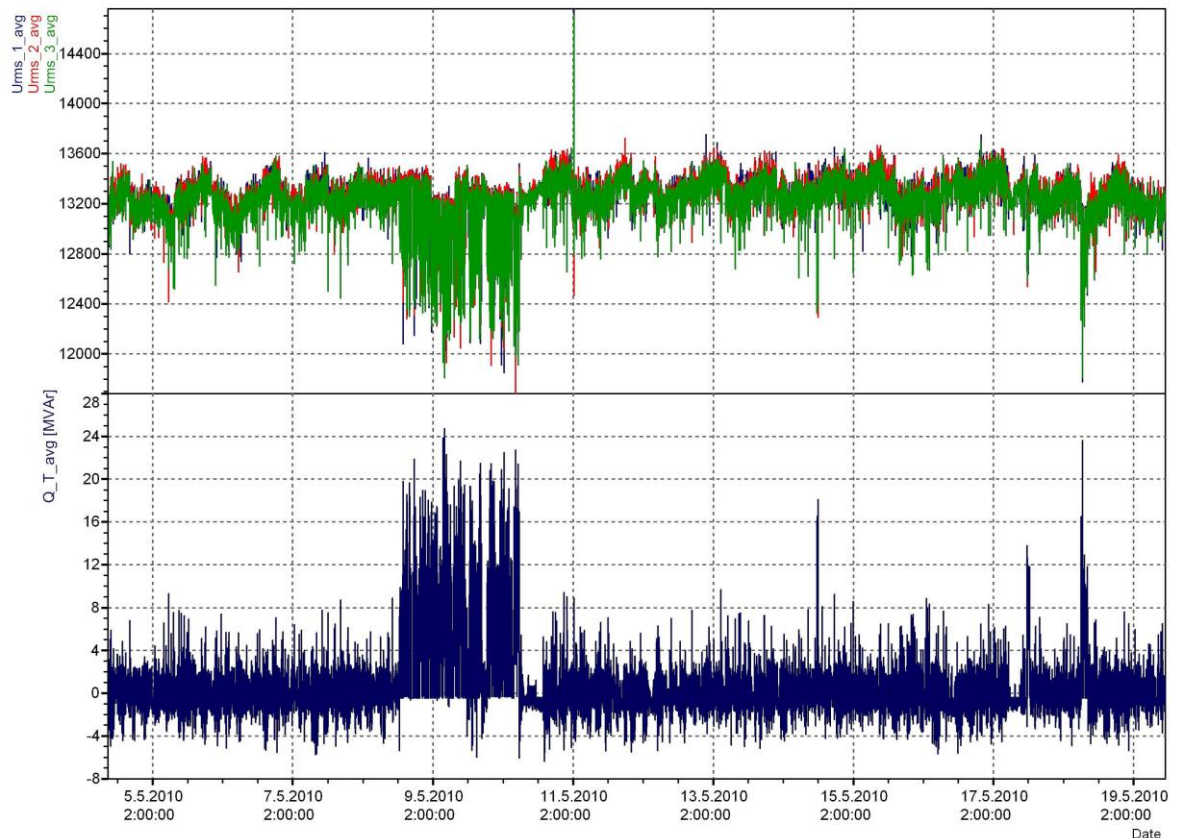


Obr. 3.4 Detail průběhu napětí a proudu

Na základě výsledku měření napětí a proudu je možné konstatovat, že změny v napětí jsou převážně vyvolané napájenou technologií (Pecní transformátory). Při zvýšení proudového zatížení dochází k poklesu napětí a naopak.

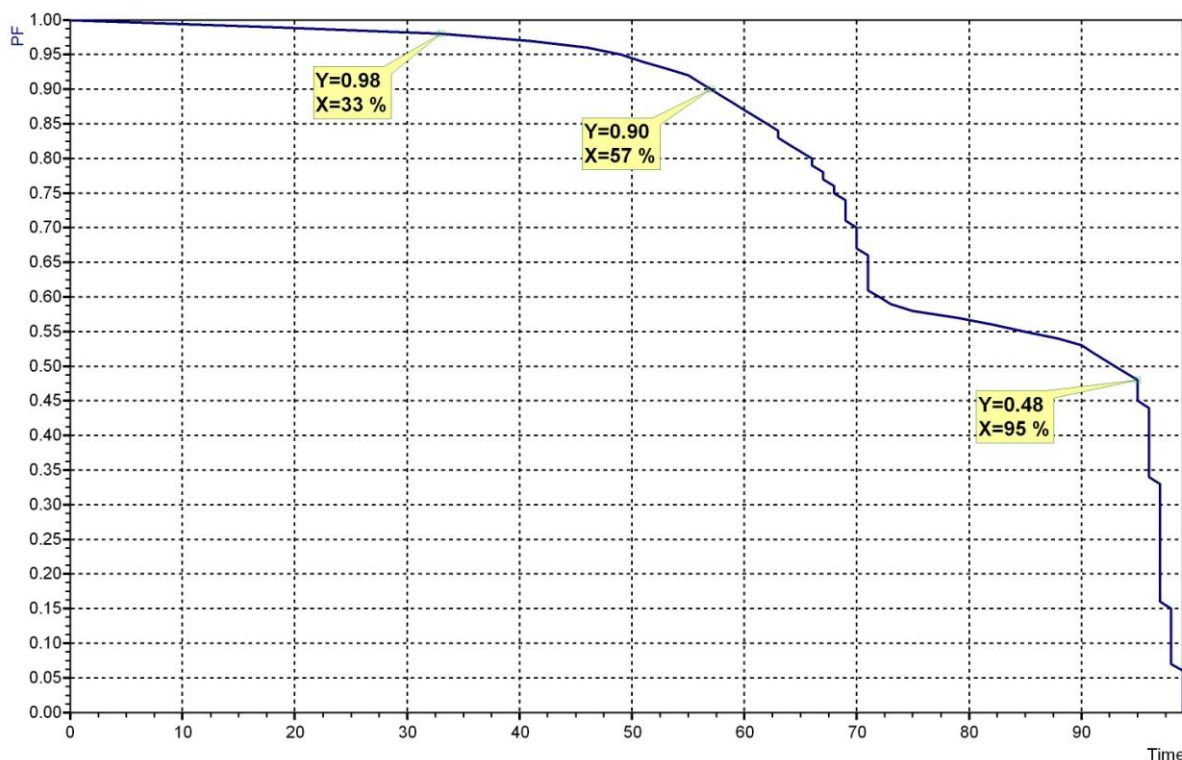


Obr. 3.5 Odebíraný jalový a činný výkon, účinník sítě



Obr. 3.6 Časový průběh napětí a odebraného třífázového činného výkonu

V následujících grafech je vidět, že v určitém okamžiku dochází k nárůstu odebraného jalového výkonu a to až 3-4 násobek. Mimo dané období se jalový výkon mění od cca -4 MVar do +4 MVar. Dochází tak ke střídání překompenzování (“-” jalový výkon kapacitního charakteru) a nevykompenzování jalového výkonu (“+” jalový výkon induktivního charakteru). V období zvýšeného poklesu napětí je odebraný jalový výkon jen výrazně vyšší a pouze pro kladné hodnoty odebraného jalového výkonu. Tento odebraný výkon byl induktivního charakteru a dosahoval hodnoty na úrovni cca 16-24 MVar.



Obr. 3.7 Doba trvání účinníku za sledované období

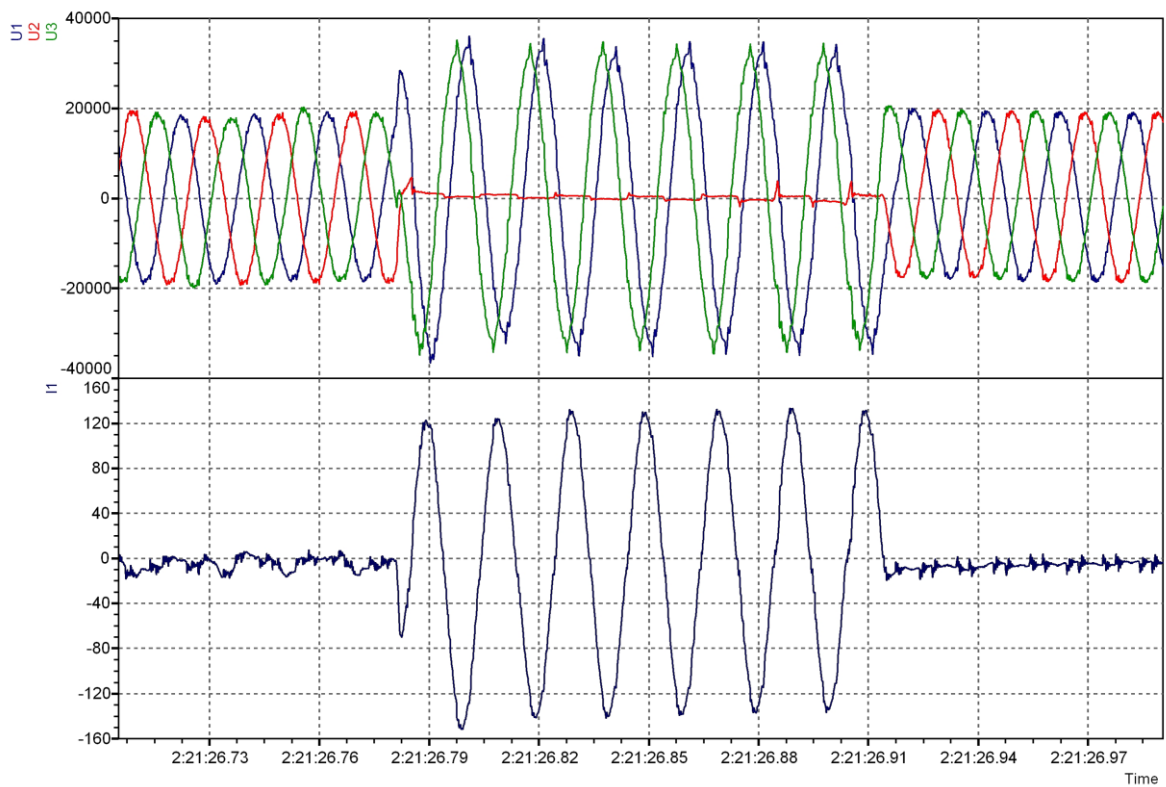
Při běžném provozním stavu byl odebíraný účinník cca 0,95-0,99 s výraznými poklesy hodnoty účinníku. Při zvýšeném poklesu napětí byl zaznamenán celkový pokles hodnoty účinníku o cca 0,25 (účinník okolo 0,7-0,8). Při tomto účinníku je hodnota jalového výkonu srovnatelná s hodnotou činného výkonu. Při sledování grafu lze vyčíst, že účinník nad 0,98 je v síti pouze 33 % času. Lepší účinník nežli 0,9 byl v síti po dobu 57 % času. Pro posuzování parametru sítě se udává hodnota účinníku, která byla v síti po 95 % času. Daný účinník je 0,48. Při účinníku 0,48 odebíraný jalový výkon dosahuje 1,82 násobku odebíraného činného výkonu.

Z naměřených záznamů proudu, činného a jalového výkonu lze usuzovat, že zvýšení pokles napětí a zvýšení výkyvu napětí je zaviněno poruchou neb vypnutím systému kompenzace jalového výkonu. V tomto období dochází ke zvýšení odebíraného jalového výkonu a zhoršení celkového účinníku.

3.4 Zemní spojení v síti 22 kV

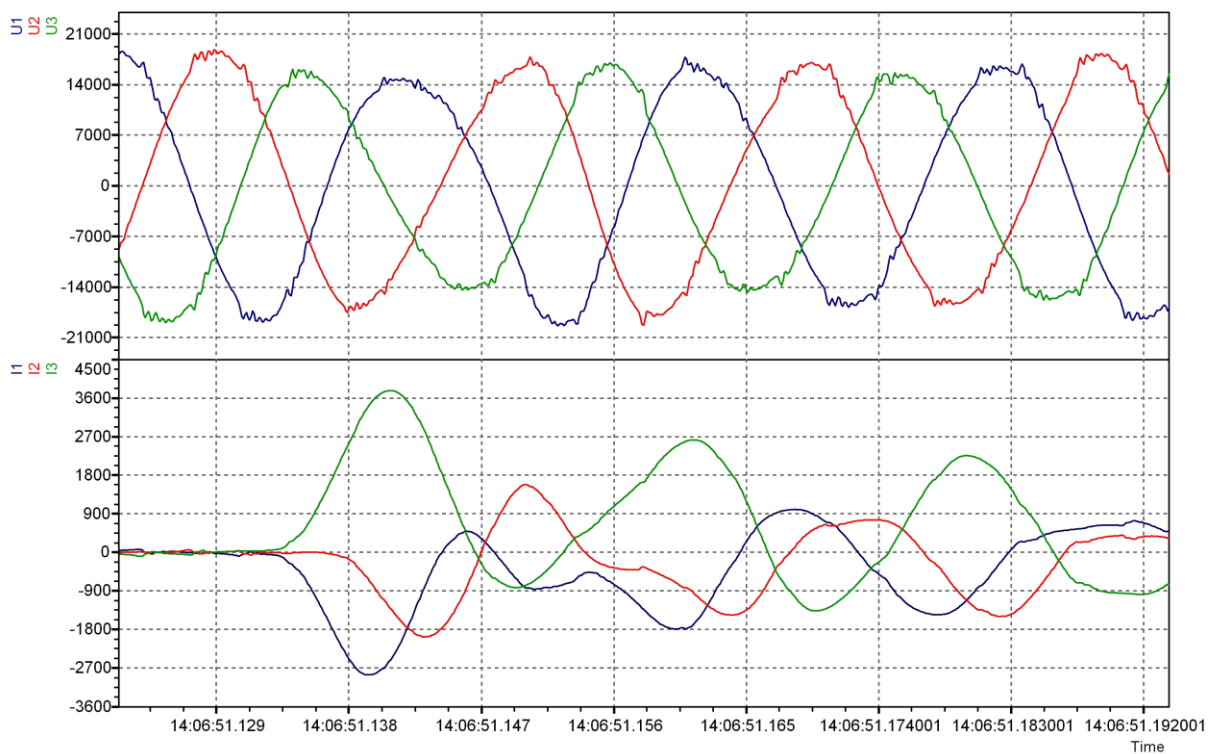
Během měření došlo v síti 22 kV k zemnímu spojení. Zemní spojení bylo vypnuto za 134 ms od vzniku poruchy. Jednalo se o téměř kovové zemní spojení, kdy nulová složka napětí dosahovala hodnoty fázového napětí (100%) a fáze bez poruchy měly proti zemi hodnotu sdruženého napětí. Nulová složka proudu tekoucí z napájecího transformátoru

dosahovala cca 95 A efektivní hodnoty.

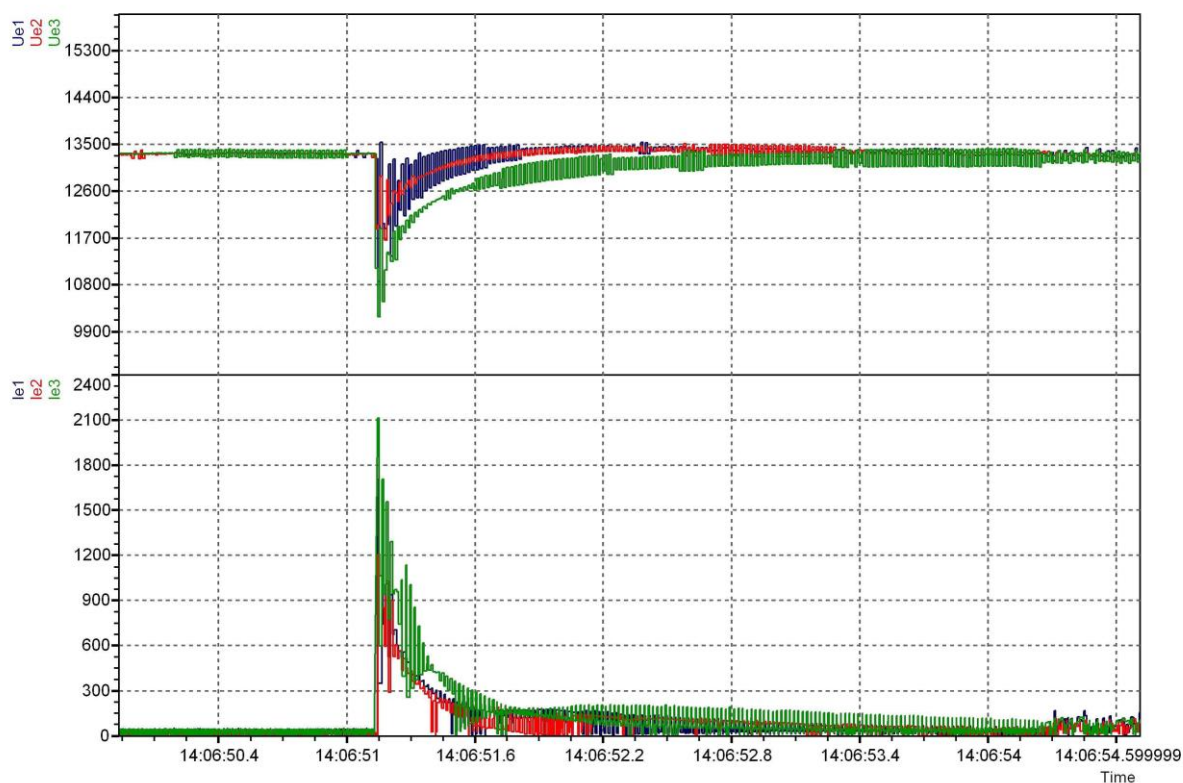


Obr. 3.8 Okamžité hodnoty fázových napětí a nulové složky proudu v době zemního spojení

3.5 Proudový rázy a poklesy napětí



Obr. 3.9 Detail okamžitých hodnot napětí a proudu v době proudových rázů



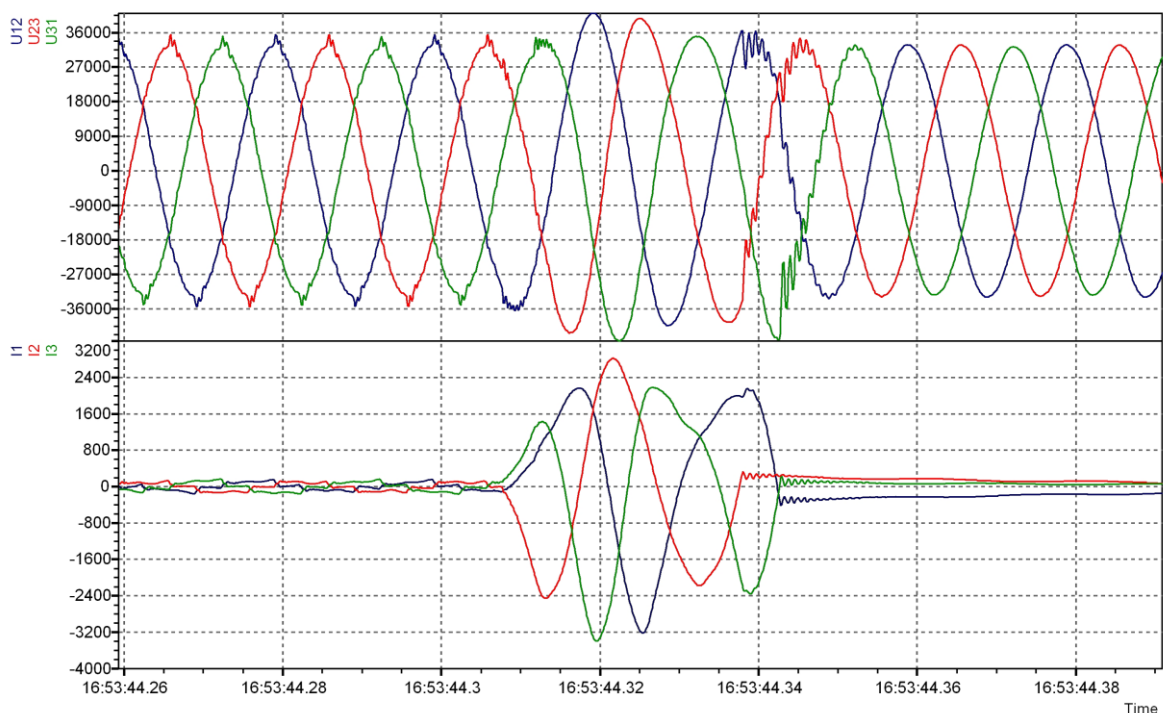
Obr. 3.10 Časový průběh efektivních hodnot fázových napětí a efektivních hodnot fázových proudů (vypočítané hodnoty)

Protože proudy a napětí obsahují větší oddíl harmonických, nelze bez větší chyby určit efektivní hodnotu pouze vydělením amplitudy $\sqrt{2}$, efektivní hodnoty se musí vypočítat podle definice.

V důsledku proudového rázu cca 2100 A dochází k poklesu sdružené hodnoty napětí o cca 5 kV. V amplitudě sdružených napětí jsou změny napětí mezi jednotlivými fázemi značně rozdílné. Vzhledem k vzniku tzv. stejnosměrné složky dochází k vychýlení napětí ve směru kladné amplitudy nebo záporné. Z grafu okamžitých hodnot sdružených napětí jsou patrné rozdíly. V záporné amplitudě činí pak pokles napětí až 10 kV z původních 34,78 kV (efektivní hodnota cca 24,6 kV) na 24,87 kV (efektivní hodnota cca 17,6 kV). Po 100 ms od vzniku proudového rázu je pokles sdružené hodnoty napětí na úrovni cca 1,5 až 2,5 kV (proud dosahuje hodnoty cca 600 až 800 A).

3.6 Proudové rázy a zvýšení napětí

Při vypínání dochází k proudovým rázům spojeným se zvýšením napětí v síti 22 kV. Při vypínání pecních transformátorů dochází, že kompenzace jalové energie reaguje opožděně. Kompenzace se vypíná se zpožděním cca 20 až 30 ms. Po krátkou dobu je tedy síť překompenzovaná a vlivem kapacitního charakteru jalového zatížení dochází na podélné impedanci (induktivní charakter) ke zvýšení napětí. Toto navýšení představuje cca 5 kV na sdružené hodnotě napětí. Napětí v síti 22 kV nabývá krátkodobě hodnoty až 29 kV (v amplitudě přesahuje 41 kV).



Obr. 3.11 Časový průběh okamžitých hodnot sdružených napětí se zvýšením napětí v době proudového rázu.

3.7 Shrnutí proudových rázů

Proudové rázy mohou vznikat i proměnlivým zatížením pecního transformátoru (obloukových pecí). Při proměnlivém zatížení provozu může být změna proudového zatížení cca 700 A (z 300 A na 1000 A). Změna zatížení vyvolá změnu sdružené hodnoty napětí cca 1-2 kV. Dále jsou proudové rázy způsobeny zapínáním pecních transformátorů a dochází k nim i při vlastním provozu pecí. Zapínací rázy přesahují v amplitudě hodnoty 3000 A a jsou induktivního charakteru. Tyto proudové rázy vyvolávají velké poklesy napětí v síti. Proudové rázy způsobené provozem pecních transformátorů dosahují nižších amplitudových hodnot

kolem 1600 A. Další typ proudových rázů je způsoben krátkodobým kapacitním překompenzováním. Překompenzování má za následek prudké zvýšení napětí v síti 22 kV. Obdobně ovlivňují napětí i frekvenční měniče nebo jiné polovodičové řízení, které dokáže velmi rychle měnit charakter zatížení od jalového až po zatížení téměř čistě činné. Všechny tyto rychlé změny zatížení se projevují ve změnách úrovně napětí v síti 22 kV. Na sdruženém napětí tak můžeme sledovat jak prudké poklesy napětí o velikosti cca 5 kV, tak i prudká zvýšení sdružených hodnot napětí o cca 5 kV.

3.8 Závěr měření

Na základě měření bylo zjištěno, že síť 22 kV pro napájení pecních transformátorů vykazuje velkou proměnlivost zatížení vlivem obloukových pecí. Vznikají na síti výrazné proudové rázy vyvolané pecemi s amplitudou proudu až na úrovni 4000 A. Jedná se hlavně o zapínání pecí. Četnost proudových rázů je nahodilá a nejde je jakkoliv dopředu určit. Počet proudových rázů u pecových transformátorů o velikosti 2000 A může být až několik desítek za den. Vlivem proudových rázů vznikají na síti poklesy sdružené hodnoty napětí o cca 5-6 kV.

Měření ukázalo jisté problémy pro možné zapojení motorgenerátoru. Proudové rázy mohou ovlivňovat nejen chod samotného generátoru, ale i jeho elektrickou vazbu se sítí. Proudové rázy budou způsobovat mechanické rázy na hřídeli mezi generátorem a motorem. Tyto rázy mohou mechanické propojení motoru a generátoru vážně poškodit. Zvýšení napětí bude způsobovat namáhání izolace generátoru (zejména statorové vinutí).

Závěr

V první části jsem se zabýval teoretickými poznatky a vlastnostmi transformátorů. Transformátory jsou v dnešní době nedílnou součástí našeho života a bez nich by nebyl možný bezpečný a trvalý chod elektrizačních soustav. Již od svého vzniku má transformátor široký rozsah použitelnosti v mnoha odvětvích techniky.

Ve druhé části se pozastavuji nad samotným účelem dané bakalářské práce a to pecní transformátory. Pecní transformátory jsou velmi robustná zařízení, která dodávají elektrickou energii do obloukových, indukčních či odporových pecí. Kvůli proměnlivosti zatížení jsou požadavky pro pecní transformátor náročnější než u klasických distribučních transformátorů vlivem velkých proudových rázů či častému i 200% přetížení.

Ve třetí části jsem díky externím informacím měl možnost zjistit, jak náročné a nepředvídatelné je provozovat pecní transformátor zapojený pro obloukové pece. Na vybraných časových průbězích se snažím ukázat danou záležitost. V praxi se pro připojení velkých obloukových pecí využívá samostatný přípojnícový systém, jelikož připojit k obloukovým pecím (pecním transformátorům) jiná zařízení je velmi problematické a rizikové.

Při psaní této bakalářské práce jsem se dozvěděl spoustu nových informací týkajících se pecních transformátorů a tím si rozšířil své znalosti a poznatky v oboru elektroenergetika. Bylo velmi poučné mít i možnost nahlédnout do firem, jenž se danou tematikou zabývají a vidět na vlastní oči praktickou část problematiky.

Použitá literatura

- [1] SMÍLEK, Jiří. *Elektrické stroje*. [cit. 19.2.2012]. Dostupné z: <http://www.jsmilek.cz/skripta%20pdf/esp%208%20trafa%20skripta.pdf>
- [2] HAMATA, Václav a VOŽENÍLEK, Petr. *Elektrické stroje*. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2001. ISBN 80-01-02109-2.
- [3] PETROV, G.N. *Elektrické stroje 1: Úvod – transformátory*. Praha: Academia, 1980.
- [4] STÝSKAL, Vítězslav. *Transformátory*. [cit. 18.2.2012]. Dostupné z: http://fei1.vsb.cz/kat420/vyuka/Bakalarske_FS/prednasky/sylab_TRANS1_bc%20FS.pdf
- [5] VELESLAV, Mach. *Transformátory*. [cit. 18.2.2012]. Dostupné z: <http://homen.vsb.cz/~mah30/pokrocily/html/6transformatory.html>
- [6] MLČÁK, Tomáš a VRÁNA, Václav. *9. Trasnformátory*. [cit. 18.2.2012]. Dostupné z: <http://fei1.vsb.cz/kat420/>
- [7] Rozhovory s panem Kinským v období 22.3. – 2.4.2012.
- [8] SLIVONĚ, Jakub. *Bakalářská práce: Výkonové transformátory na hladinách vn a vvn*. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2011.
- [9] EMG ZLÍN. *Kompenzace*. [cit. 19.3.2012]. Dostupné z: http://www.emgzlin.cz/menu/kompenzace-o_kompenzaci.html
- [10] HRUŠKOVIČ, Ladislav. *Elektrické stroje*. Bratislava: Slovenská technická univerzita, 1999. ISBN 80-227-1249-3.
- [11] PEŠÁK, František. *Transformátory*. Praha: Elektrotechnický Svaz českomoravský, 1944.
- [12] KREJČÍ, František. *Tlumivka*. [cit. 18.2.2012]. Dostupné z: <http://elektrika.cz/data/clanky/tlumivka>
- [13] POWER-ENERGO. *Výkonové transformátory SEA*. [cit. 19.2.2012]. Dostupné z: <http://www.power-energo.cz/p32-transformatory-sea-vykonove.html>
- [14] Rada, Josef et al. *Elektrotepelná technika*. Praha: SNTL, 1985.
- [15] ŠENBERGER, Jaroslav. *Historie výroby železa a oceli*. [cit. 19.2.2012]. Dostupné z: <http://www.zam.fme.vutbr.cz/~senberger/>
- [16] LANGER, Emil. *Elektrotepelná technika*. Plzeň: VŠSE, 1969.
- [17] Interní materiály firmy Retrofit a ETD transformátory.
- [18] ŠENBERGER, Jaroslav. *Výroba nelegovaných ocelí na odlitky v zásaditých obloukových pecích*. [cit. 19.2.2012]. Dostupné z: <http://www.zam.fme.vutbr.cz/~senberger/>
- [19] POWER WIKI. *Obloukové pece*. [cit. 21.2.2012]. Dostupné z: www.powerwiki.cz/attach/ET2/OBLOUKOVE_PECE--final.ppt
- [20] LANGER, Emil. *Elektrotepelná technika část V. Teorie a výpočty indukčních a dielektrických zařízení*. Plzeň: VŠSE, 1975.
- [21] LANGER, Emil a KOŽENÝ, Jiří. *Elektrotepelná zařízení indukční: základy teorie, výpočty a konstrukce*. Plzeň: VŠSE, 1982.
- [22] PUMA – interaktivní informační portál. *Indukční ohřev*. [cit. 21.2.2012]. Dostupné z: http://panther.feld.cvut.cz/cs/wiki/indukcni_ohrev
- [23] LANGER, Emil. *Elektrotepelná technika Část IV. Indukční pece kanálkové*. Plzeň: VŠSE, 1969.
- [24] MOLNÁR, Miloš. *Zlepšení účinníku v energetice a návrh vhodných kompenzačních prostředků*. [cit. 20.3.2012]. Dostupné z: <http://www.volny.cz/molnarm/pdf/kompenzace.pdf>
- [25] ČERNÝ, Václav. *Elektrický ohřev*. [cit.22.4..2012]. Dostupné z: http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id_document=26215