VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV ELEKTROENERGETIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF ELECTRICAL POWER ENGINEERING

ENERGETICKÉ PROBLÉMY ELEKTROTEPELNÝCH ZAŘÍZENÍ

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE VOJTĚCH POPELÁŘ
AUTHOR

BRNO 2012

VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav elektroenergetiky

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor
Silnoproudá elektrotechnika a elektroenergetika

Student: Vojtěch Popelář
Ročník: 3

ID: 125602
Akademický rok: 2011/12

NÁZEV TÉMATU:

Energetické problémy elektrotepelných zařízení

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Elektrotepelná zařízení - odporové, indukční a obloukové pece.
2. Připojení elektrotepelných zařízení k síti, symetrizace, kompenzace.
3. Řešení připojení konkrétního elektrotepelného zařízení k síti.
4. Zhodnocení použitých způsobů připojení elektrotepelných zařízení k síti.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

podle pokynů vedoucího práce

Termín zadání: 6.2.2012

Termín odevzdání: 25.5.2012

Vedoucí práce: doc. Ing. Ilona Lázničková, Ph.D.
Konzultanti bakalářské práce:

doc. Ing. Petr Toman, Ph.D.
předseda oborové rady

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií
Ústav elektroenergetiky

UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

Bibliografická citace práce:

POPELÁŘ, V. ENERGETICKÉ PROBLÉMY ELEKTROTEPELNÝCH ZAŘÍZENÍ. BRNO: VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ, FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ, 2012. 48 S. VEDOUCÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE DOC. ING. ILONA LÁZNIČKOVÁ, PH.D.

Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. Díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

Vojtěch Popelář

……

Tímto bych chtěl poděkovat vedoucí mé práce doc. Ing. Iloně Lázničkové, Ph.D. za pomoc při tvorbě této práce. Dále bych rád poděkoval pracovníkům rozvodny Královopolské, a.s. za jejich vstřícnost a poznatky z praktického řešení dané problematiky.

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV ELEKTROENERGETIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF ELECTRICAL POWER ENGINEERING

ENERGETICKÉ PROBLÉMY ELEKTROTEPELNÝCH ZAŘÍZENÍ

POWER ENGINEERING ISSUES OF ELECTROTHERMAL DEVICES

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE VOJTĚCH POPELÁŘ
AUTHOR

VEDOUCÍ PRÁCE doc. Ing. ILONA LÁZNIČKOVÁ, Ph.D.
SUPERVISOR

BRNO 2012

ABSTRAKT

Elektrické pece jsou jedním z největších odběratelů elektrické energie. Mají velký negativní vliv na elektrizační soustavu. Proto je nutná optimalizace jejich pracovního procesu.

Práce se zabývá energetickými problémy elektrických pecí velkých výkonů. První část obsahuje teoretický přehled druhů elektrických pecí, jejich typů, vlastností a možností připojeni k elektrizační soustavě. Pro tuto práci byly vybrány pece odporové, indukční a obloukové.

V druhé části je pak rozebrán problém kompenzace účiníku cosφ a problém nesymetrického odběru elektrické energie. U obou těchto problémů jsou uvedeny možnosti odstranění, či zmenšení negativních vlastností těchto jevů. V závěru této části je příklad návrhu kompenzačního a symetrizačního zařízení pro vybrané typy elektrických pecí.

KLÍČOVÁ SLOVA: odporová pec; indukční pec; oblouková pec; kompenzace; symetrizace

ABSTRACT

Electric furnaces are one of the largest consumers of elektricity. They have a large negative impact on the electricity grid. Therefore, it is necessary to optimize their work process.

The thesis deals with energetic problems of high power electric furnaces. The first part provides a theoretical overview of types of electric furnaces, their types, properties and possibility of connecting to the electricity grid. For this work were selected resistance furnaces, induction furnaces and arc furnaces.

The second part analyzes the problem of correcting power factor cosφ and the problem of unbalanced electricity consumption. For both these problems are given the possibilities for removing or reducing the negative characteristics of these phenomena. At the end of this section is an example of compensating equipment design and symmetrizating device design for selected types of electric furnaces.

KEY WORDS: resistance furnace; induction furnace; arc furnace; compensation; symmetrization

OBSAH

SEZNAM OBRÁZKŮ 9

SEZNAM TABULEK 10

ÚVOD 11

1 CÍLE PRÁCE 12

2 ELEKTRICKÉ ODPOROVÉ PECE 13

2.1 ÚVOD 13

2.2 NÁVRH VÝKONU ODPOROVÉ PECE 13

2.3 MATERIÁLY A SOUČÁSTI ELEKTRICKÝCH ODPOROVÝCH PECÍ 14

2.4 TYPY ELEKTRICKÝCH ODPOROVÝCH PECÍ 15

2.4.1 KOMOROVÁ PEC 15
2.4.2 ŠACHTOVÁ PEC 16
2.4.3 ZVONOVÁ PEC 16
2.4.4 ELEVÁTOROVÁ PEC 16
2.4.5 PRŮBĚŽNÉ KONTINUÁLNÍ PECE 17
2.4.6 NÍZKOTEPLOTNÍ PECE 18
2.4.7 PŘÍMÝ ODPOROVÝ OHŘEV 18

2.5 REGULACE TEPLOTY ELEKTRICKÝCH ODPOROVÝCH PECÍ 18

3 ELEKTRICKÉ OBLOUKOVÉ PECE 20

3.1 ELEKTRICKÉ ZAŘÍZENÍ OBLOUKOVÝCH PECÍ 20

3.2 PŘIPOJENÍ OBLOUKOVÝCH PECÍ K NAPÁJECÍ SÍTI VYSOKÉHO NAPĚTÍ 20

3.3 MOŽNOSTI SNÍŽENÍ RUŠIVÝCH ÚČINKŮ OBLOUKOVÝCH PECÍ NA NAPÁJECÍ SÍŤ VN 21

3.4 ELEKTRODY 21

3.5 AUTOMATICKÁ REGULACE POLOHY ELEKTROD 22

3.6 DRUHY OBLOUKOVÝCH PECÍ 23

3.6.1 TAVÍCÍ OBLOUKOVÉ PECE NA OCEL 23
3.6.2 RUDNÉ TERMICKÉ OBLOUKOVÉ PECE A PECE NA FEROSLITINY 23

4 INDUKČNÍ ELEKTROTEPELNÁ ZAŘÍZENÍ 24

4.1 PRINCIP 24

4.2 DRUHY INDUKČNÍCH PECÍ 24

4.2.1 KELÍMKOVÁ PECE S NEVODIVÝM KELÍMKEM 24
4.2.2 KELÍMKOVÉ PECE S VODIVÝM KELÍMKEM 25
4.2.3 KANÁLKOVÉ INDUKČNÍ PECE 26
4.2.4 INDUKČNÍ PROHŘÍVACÍ ZAŘÍZENÍ 26
4.2.5 INDUKČNÍ ZAŘÍZENÍ NA POVRCHOVÝ OHŘEV 26

4.3 PŘIPOJENÍ INDUKČNÍCH PECÍ NA SÍŤ 27

4.3.1 NAPÁJENÍ SÍŤOVÝM KMITOČTEM 50 HZ 27
4.3.2 NAPÁJENÍ STŘEDOFREKVENČNÍMI ZDROJI NAPÁJENÍ 27

4.3.3 VYSOKOFREKVENČNÍ NAPÁJECÍ ZDROJE 28

5 KOMPENZACE 29

5.1 KOMPENZACE JALOVÉHO VÝKONU ELEKTROTEPELNÝCH ZAŘÍZENÍ 29

5.1.1 DRUHY KOMPENZACE U ODBĚRATELE 31
5.1.2 KOMPENZAČNÍ PRVKY 34
5.1.3 KOMPENZACE ELEKTRICKÝCH ODPOROVÝCH PECÍ 35
5.1.4 KOMPENZACE ELEKTRICKÝCH PECÍ OBLOUKOVÝCH 35
5.1.5 KOMPENZACE ELEKTRICKÝCH INDUKČNÍCH PECÍ 35

5.2 PŘÍKLAD NÁVRHU KOMPENZACE PRO ELEKTRICKOU INDUKČNÍ PEC 36

6 SYMETRIZACE 40

6.1 SYMETRIZACE JEDNOFÁZOVÉ PECE 40

6.2 SYMETRIZACE DVOUFÁZOVÉ PECE 41

6.3 SYMETRIZACE TŘÍFÁZOVÉ PECE 43

6.4 PŘÍKLAD VÝPOČTU SYMETRIZAČNÍHO ZAŘÍZENÍ 43

6.4.1 PŘÍKLAD VÝPOČTU SYMETRIZAČNÍHO ZAŘÍZENÍ ZAPOJENÉHO DO HVĚZDY 43
6.4.2 PŘÍKLAD VÝPOČTU SYMETRIZAČNÍHO ZAŘÍZENÍ ZAPOJENÉHO DO TROJÚHELNÍKA 44

6.5 ZHODNOCENÍ POUŽITÝCH ZPŮSOBŮ PŘIPOJENÍ ELEKTROTEPELNÝCH ZAŘÍZENÍ K SÍTI 45

7 ZÁVĚR 46

POUŽITÁ LITERATURA 47

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 2-1 Topný článek [2] 15
Obr. 2-2 Komorová pec [4] 15
Obr. 2-3 Šachtová pec [5] 16
Obr. 2-4 Elevátorová pec [6] 17
Obr. 2-5 Průběžná pec [4] 18
Obr. 3-1 Oblouková pec s rozžhavenými elektrodami [7] 20
Obr. 3-2 Grafitové elektrody [8] 22
Obr. 4-1 Indukční ohřev [9] 24
Obr. 4-2 Cívka s vodním chlazením [10] 25
Obr. 5-1 Fázorové diagramy kapacitního a induktivního charakteru jalového výkonu 29
Obr. 5-2 Graf závislosti činné a jalové složky ztrát na účiníku pro R=10 Ω a I=10 A 30
Obr. 5-3 Schéma individuální kompenzace 32
Obr. 5-4 Schéma skupinové kompenzace 33
Obr. 5-5 Schéma centrální kompenzace 34
Obr. 5-6 Kondenzátorová baterie 35
Obr. 5-8 Regulátor jalového výkonu NOVAR 1106 / 1114 [19] 39
Obr. 6-1 Schéma jednofázové symetrizace a) pro zapojení v trojúhelníku, b)pro zapojení do hvězdy 41
Obr. 6-2 Schéma Scottova zapojení 42
Obr. 6-3 Schéma zapojení zvláštního symetrizačního zapojení pro dvoufázovou pec 43

SEZNAM TABULEK

Tab. 4-1 Tabulka hodnot frekvencí pro různé průměry vývalků *26*

Tab. 4-2 Závislost hloubky vniku a hloubky prohřátí na frekvenci při kalení *26*

Tab. 5-1 Parametry indukční pece na tavbu litiny *37*

Tab. 5-2 Parametry kompenzační jednofázové baterie *38*

ÚVOD

Elektrotepelná zařízení mají v našem světě nezastupitelné místo. V hutnickém i obráběcím průmyslu se každým dnem využívá potenciál elektrických pecí, jako je dobrá regulace teploty, rovnoměrný ohřev, který je při výrobních procesech velice důležitý, nebo třeba jednoduchá a bezpečná obsluha těchto strojů.

Jejich přínos je pak znát v podstatě ve všech odvětvích průmyslu, kde se pracuje s kovovými obrobky. Skoro každá firma, která zpracovává kovy, vlastní nějaký druh elektrické pece, který se hodí pro tu či jinou činnost. Jelikož elektrické pece jsou jedním z největších odběratelů elektrické energie na relativně malém prostoru a každý druh elektrické pece se k napájecí síti chová jiným způsobem, musíme vědět jak jednotlivé druhy připojovat a jak zamezit případným haváriím.

1 CÍLE PRÁCE

Cílem práce je seznámit se s některými druhy elektrických pecí. Pro rozsah této práce byly vybrány pece odporové, obloukové a indukční pece. Seznámení zahrnuje způsob vzniku tepla v těchto pecích, seznámit se s jejich součástmi, výkony, údaji o účinnosti, jejich výhodami a nevýhodami, a hlavně se způsoby, jakými se připojují na síť a jak tuto síť ovlivňují.

Dalším cílem je zhodnotit typy kompenzací jalových výkonů odebíraných těmito pecemi a symetrizací odebíraného výkonu z třífázové soustavy, kterou jsou napájeny. To vše je potřeba pro bezproblémový chod pecí a co nejmenší negativní dopady jejich provozu na elektrickou síť a jiná zařízení k ní připojená.

Praktickou částí práce je návrh kompenzačního a symetrizačního zařízení pro dané parametry pecí.

2 ELEKTRICKÉ ODPOROVÉ PECE

2.1 Úvod

Teplo u elektrických odporových pecí vzniká buď v topných článcích, nebo v předmětu protékaném elektrickým proudem.

Jak již název napovídá důležitým parametrem zde bude elektrický odpor *R*, který je obsažen ve vztahu pro výpočet tepla [1]

$$Q = P \cdot t = R \cdot I^2 \cdot t \quad [\mathrm{J}, \mathrm{W}, \mathrm{s}, \Omega, \mathrm{A}] \tag{2.1}$$

Samotný odpor vodiče o délce *l* a průřezu *S* se pak dá vyjádřit vzorcem[1]

$$R = \rho \cdot \frac{l}{S} \quad [\Omega, \Omega \cdot \mathrm{mm}^2 \cdot \mathrm{m}^{-1}, \mathrm{m}, \mathrm{mm}^2] \tag{2.2}$$

kde

ρ je rezistivita.

Jelikož je tato veličina u většiny materiálů závislá na teplotě, musíme ji přepočítat dle vztahu [1]

$$R_\vartheta = R \cdot (1 + \alpha \cdot \Delta\vartheta) \quad [\Omega, \Omega, {}^\circ\mathrm{C}^{-1}, {}^\circ\mathrm{C}] \tag{2.3}$$

kde

α je teplotní součinitel odporu.

2.2 Návrh výkonu odporové pece

Při návrhu odporové pece se dle teploty v peci musí navrhnout počet vrstev stěny pece, jejich tloušťka a vhodný materiál. V závislosti na jakosti materiálu vrstev stěny a jejich tloušťkách, se pak mění velikost ztrát samotné pece. Všechny tyto atributy se musí volit ve vhodném poměru kvality a ceny [1].

Potřebný příkon pece je závislý na množství materiálu (vsázky), době za kterou se má tento materiál ohřát a samozřejmě na hodnotě výstupní teploty. Všechny tyto závislosti jsou obsaženy ve vztahu [1]

$$P_{pece} = (1{,}1 \div 1{,}5) \cdot \frac{Q_{ohř}}{t_{ohř}} \ [\mathrm{kW}]. \tag{2.4}$$

Součinitel $(1{,}1 \div 1{,}5)$ je součinitel bezpečnosti, jenž zastupuje potřebu zvýšit výkon pece v důsledku zhoršení tepelné izolace vyzdívky během provozu, snížení napájecího napětí atd [1].

2.3 Materiály a součásti elektrických odporových pecí

Žáruvzdorná vyzdívka

Ohraničuje pracovní prostor uvnitř pece. Musí odolávat vysokému žáru, prudkým změnám teplot a to vše bez popraskání. Dále je požadována dlouhá životnost, chemická stálost a nesmí reagovat se vsázkou, ani topnými články [1].

Tepelná izolace

Materiály, z nichž je tepelná izolace zhotovena, mají přirozenou (azbest), nebo umělou (skleněná vata) poréznost (pórovitost) [1].

Skříň pece

Skříně pecí jsou zhotovovány z ocelových plechů a profilů. Pokud jsou některé součásti zhotoveny z litiny nebo ocelolitiny, tak pracují při normální teplotě a nejsou na ně kladeny žádné zvláštní požadavky [1].

Topné články

Topné články jsou základní částí celé odporové pece. Pracují v oblastech s vysokou teplotou, a proto jsou na ně kladeny následující požadavky [3]

- vysoká rezistivita,
- malý teplotní koeficient odporu,
- stálost elektrických vlastností,
- stálost rozměrů,
- opracovatelnost.

Konstrukce topných článků

Topné články odporových pecí se velkou většinou zhotovují z odporových drátů nebo pásů. Drátové články jsou ve tvaru meandrů, u nichž je přesně stanoveno stoupání meandrů a délka ramene. Průměry drátů jsou v rozmezí 3 až 7 mm (Obr. 2-1).

Pásové topné články mají taktéž tvar meandrů a jsou pro ně přesně definovány údaje o stoupání meandru, poloměr ohybu pásu i poměr stran pásu [3].

Obr. 2-1 Topný článek [2]

2.4 Typy elektrických odporových pecí

Typů elektrických odporových pecí je velké množství. Liší se dle požadované teploty, velikosti ohřívaných obrobků, či velikostí tepelných ztrát. Zde je přehled několika z nich.

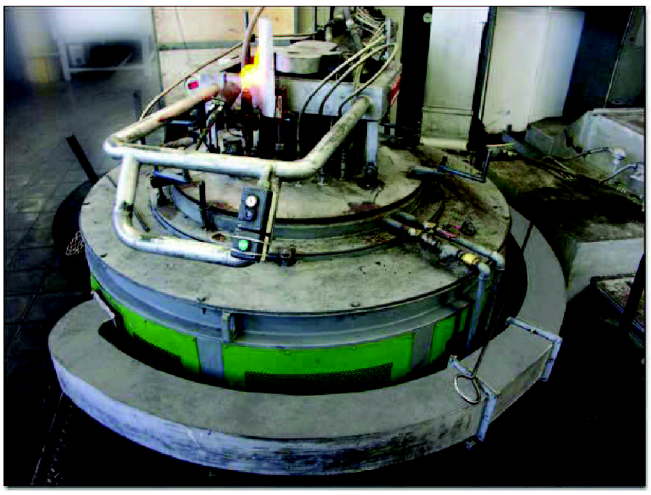
2.4.1 Komorová pec

Komorová pec má vyzdívku ze dvou vrstev. Jedné žáruvzdorné a jedné tepelně-izolační. Na přední straně jsou dveře, které se používají pro plnění a vyprazdňování pece. U malých pecí bývají tyto dveře na ruční, nebo nožní pohon, u větších se pak používají hydraulické, pneumatické nebo motorické pohony. Jsou zde velké požadavky na těsnost, aby se co nejvíce potlačila tepelná ztráta. Komorové pece dosahují tepelných ztrát 20 až 40 % jejich jmenovitého výkonu. Topné články se nacházejí většinou na bočních stěnách a dně. Pro dosažení lepšího teplotního rozložení bývají články zabudovány i do zadní stěny a dveří. Nevýhodou tohoto typu pecí je dlouhá doba ohřevu a problematické docílení stejné teploty v celém prostoru pece. Výhodou komorových pecí je možnost ohřevu libovolných předmětů [3].

Obr. 2-2 Komorová pec [4]

2.4.2 Šachtová pec

Šachtové pece mají kruhový, čtvercový nebo obdélníkový průřez. Nahoře bývají otevřené nebo s víkem, které zajišťuje lepší tepelnou izolaci než dveře komorové pece. Topné články těchto pecí jsou umístěny ve stěnách a celá pec je vybavena několika teplotními pásmy, aby se docílilo rovnoměrného ohřevu. Jelikož se často využívají k ohřívání hřídelí a trubek, mívají značnou hloubku (10 m i více). Proto bývají zapuštěné do země, čímž se sníží prostorové nároky. Celkově v porovnání s komorovými pecemi v nich dochází k menším tepelným ztrátám dosahujícím 15 až 25 % jmenovitého výkonu. Na manipulaci se samotným ohřívaným předmětem nám stačí jednoduchá zdvihadla. Jelikož je často vyžadované pomalé ochlazování a to by nám způsobilo vychladnutí vyzdívky, probíhá většinou ochlazování mimo pec [3].



Obr. 2-3 Šachtová pec [5]

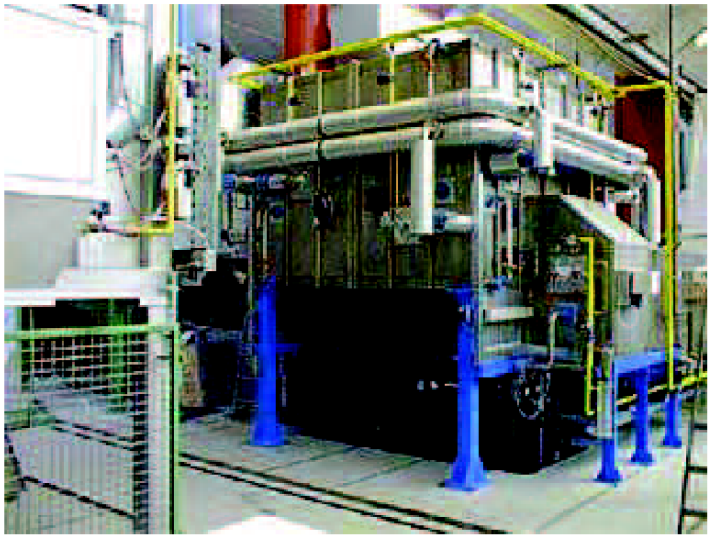
2.4.3 Zvonová pec

Zvonová pec je tvořena válcovou nebo hranatou komorou, která je dole otevřená. Další částí je podstavec (nístěj), na kterém jsou ohřívané předměty přikryty žáruvzdorným ochranným příklopem. Na ten se přiklopí komora, v které jsou topné články umístěny do stěn. Někdy bývají topné články i v podstavci. Připojení zvonu je zajištěno buď ohebným kabelem, nebo konektory. Po ukončení ohřevu se zvon vypne, pomocí jeřábu se přesune na další podstavec s ohřívaným předmětem a mezitím dochází k ochlazování první vsázky jen pod žáruvzdorným příklopem. Jelikož manipulační doba, kdy přemisťujeme zvon, se pohybuje mezi 4 a 5 minutami, dochází jen k malému ochlazení vyzdívky zvonu. To má za následek malé tepelné ztráty, které se pohybují mezi 10 až 15 % celkového teplo akumulovaného v peci. Počet podstavců na jeden zvon je závislýma době ochlazování vsázky. Pokud se doba ochlazování rovná době ohřevu, stačí podstavce dva. Pokud je dvojnásobná, potřebujeme podstavce tři. Celkové ztráty tohoto typu pecí jsou 10 až 20 % jmenovitého výkonu [3].

2.4.4 Elevátorová pec

Elevátorová pec je založena na podobném principu jako pec zvonová, akorát s tím rozdílem že pec je pevně připevněná na sloupech a pod ní se nachází hydraulicky nebo mechanicky ovladatelná plošina či vozík se vsázkou. Alternativa s vozíkem, který má tepelnou izolaci a žáruvzdornou výstroj, má výhodu v tom, že se může naplnit a chladit mimo prosto pece. Jediná ztráta akumulovaného tepla pak vzniká přímo na chladnoucím vozíku. Topná tělesa jsou

umístěna ve stěnách pece, občas i ve stropě a nístěji či vozíku. Ztráty jsou obdobné jako u zvonové pece, tedy 10 až 20 % jmenovitého výkonu [3].



Obr. 2-4 Elevátorová pec [6]

2.4.5 Průběžné kontinuální pece

Průběžné kontinuální pece jsou primárně určeny k ohřívání velkého počtu relativně malých výrobků na teplotu 900 °C. Místo nístěje je použit nekonečný dopravní pás. Pro lehké součásti je vyroben z pletiva, pro těžší z ražených desek spojených spojkami nebo čepy a pro velké zatížení je se zhotovuje z řetězů. I když je pás zhotoven ze žáruvzdorného materiálu, prodlužuje se a jeho spodní díl se nechá volně viset. Pokud je celý pás i s poháněcím a vratným bubnem v pásmu s vysokou teplotou, musíme tyto bubny chladit vodou. Jinou možností je posunout bubny mimo tuto oblast a akceptovat tepelné ztráty vyzářené pásem mimo oblast s vysokou teplotou.

Pokud je v procesu potřebné pomalé ochlazování, může se k peci připojit chladící komora. Průběžné pece se dají i spojovat. Většinou se spojují kalící a popouštěcí pece s kalícími lázněmi, čistícími a sušícími zařízeními.

Topné články jsou umístěny většinou ve stropě a dně, pod horní úrovní pásu. Na boční stěny se umisťují jen zřídka [1].

Obr. 2-5 Průběžná pec [4]

2.4.6 Nízkoteplotní pece

Nízkoteplotní pece mají oproti pecím středoteplotním odlišnou konstrukci a přenos tepla. Největší část tepla se přenáší konvekcí. Hranice mezi těmito dvěma typy pecí se pohybuje mezi 600 až 700 °C. U nízkoteplotních pecích s nucenou cirkulací se používá ventilátor k dosažení rovnoměrného rozložení tepla [1].

2.4.7 Přímý odporový ohřev

Aby byl přímý odporový ohřev dostatečně rovnoměrný, musí být délka ohřívané tyče nejméně 10x větší než její průměr. Dalším problémem je zvětšující se elektrický odpor při zvýšení teploty. U oceli se odpor může zvýšit až 7x při ohřátí z 20 na 1200 °C. Proto během ohřevu zvyšujeme napětí pomocí přepínání odboček na primárním vinutí transformátoru.

Pro zkrácení doby ohřevu jsou zařízení na přímý ohřev navrhovány ve stovkách kW. U jednofázových zařízení nad 500 kW je nutné použít symetrizační zařízení [1].

2.5 Regulace teploty elektrických odporových pecí

Regulace teploty elektrických odporových pecí se dělí na regulaci skokovou a regulaci plynulou.

Regulace skoková

Nejjednodušším způsobem skokové regulace je zapínání a vypínání celého příkonu pece. Dalšími alternativami jsou přepínání sekcí hvězda, trojúhelník a přepínání skupin odporových článků [1].

Plynulá regulace

Regulace plynulá je zprostředkována polovodičovými prvky. Obsahují typy obvodů, zapínací a řídící. Zapínací obvody zajišťují pouze zapnutí tyristorů vždy na začátku kladné půlvlny napětí. Řídící obvody navíc zajišťují plynulé řízení okamžiku zapnutí tyristorem během kladné půlvlny napětí. Na řídící signál jsou kladeny různé požadavky na jeho šířku, velikost, strmost atd.

Maximální rovnoměrnost teploty u většiny odporových pecí je $\pm 5°C$. Pokud je vyžadována vyšší přesnost a rovnoměrnost ohřevu, vybavují se pece topnými pásy, které se regulují samostatně [1].

3 ELEKTRICKÉ OBLOUKOVÉ PECE

3.1 Elektrické zařízení obloukových pecí

V elektrických obloukových pecí teplo k roztavení vsázky vzniká z elektrického oblouku, který hoří mezi elektrodami a vsázkou. Z oblouku do vsázky se teplo přenáší hlavně sáláním, ve vsázce pak vedením a prouděním [1].

Elektrické zařízení má velký dopad na pořizovacích nákladech elektrických pecí a na jejich chodu. Jednotlivé části elektrického zařízení můžeme rozdělit dle jejich funkce na

- silnoproudý elektrický obvod,
- obvod automatické regulace pohybu elektrod,
- měřicí přístroje, ochrany, blokování a signalizace,
- řídící počítač [1].

Obr. 3-1 Oblouková pec s rozžhavenými elektrodami [7]

3.2 Připojení obloukových pecí k napájecí síti vysokého napětí

Obloukové pece jsou jedním z největších odběratelů elektrické energie. Zároveň zatěžují síť vn nepravidelně proměnlivými špičkami proudů, které dosahují hodnot od nuly (pro přerušení oblouku) do trojnásobku jmenovitého proudu (při zkratu elektrod s taveninou). To způsobuje nepříjemné kolísání proudů, které ovlivňuje ostatní elektrická zařízení napájená z téže soustavy. Citlivé jsou na toto kolísání zejména televizory a výpočetní technika [1].

Tento problém se dá v praxi řešit připojením obloukových pecí na vlastní systém napájení. U závodů, kde je tento způsob neproveditelný, se zjišťuje hodnota zkratového výkonu a posuzuje

se, zda rušivé vlivy se udrží v přijatelných mezích. V praxi to znamená, že napětí nesmí kolísat o více než 0,35 % jeho jmenovité hodnoty. V tom případě musí být zkratový výkon v místě napojení přívodu pro elektrické obloukové pece 60krát větší než výkon pecního transformátoru

3.3 Možnosti snížení rušivých účinků obloukových pecí na napájecí síť vn

Omezení zkratových a velkých proudů

Připojením reaktoru do série s pecním transformátorem se dosáhne snížení špiček proudů, při kterých dochází k největším úbytkům. Kvůli stabilitě je však nutné připojit tlumivku, která může být i v několikastupňovém uspořádání [1].

Zvětšení zkratového výkonu v místě připojení

Podle výkonu pecního transformátoru lze zjistit požadovanou velikost zkratového výkonu a upravit ho na požadovanou hodnotu [1].

Možnosti navýšení zkratového výkonu v místě připojení

- zesílení sítě, což znamená zdvojení přívodů, zvýšení výkonu transformátoru, připojení nového generátoru. Jedná se však o nákladnou variantu,
- připojením synchronního kompenzátoru do vhodného místa sítě,
- sériovou kompenzací,
- paralelní kompenzací [1].

Zmenšení kolísání jalového příkonu elektrické obloukové pece

Zmenšení kolísání jalového výkonu se v praxi dosahuje kompenzací jalového výkonu. Jelikož elektrické obloukové pece patří do induktivního druhu zátěže, musíme logicky kompenzovat odběr jalové složky výkonu opačným druhem zátěže, tedy kapacitním (kondenzátory) [1].

Pecní transformátory a tlumivky

Pecní transformátory se v důsledku častého proměnlivého zatížení, způsobeného zkratem mezi vsázkou a elektrodou, značně odlišují od klasických silových transformátorů. Jeho sekundární strana pracuje s poměrně nízkou hodnotou napětí avšak velkou hodnotou proudu. Musí však regulovat sekundární napětí v širokých mezí a to kvůli velkým sekundárním proudů lze provádět jenom pomocí změny závitů na primární straně.

Tlumivka zapojená mezi výkonovým vypínačem a pecním transformátorem má za úkol omezit hodnotu zkratových proudů při dotyku elektrody se vsázkou. Bývají několikastupňové a uložené v transformátorové nádobě. Nejčastěji jsou připojeny k transformátoru při zapojení do trojúhelníka, kde jsou vyšší hodnoty napětí [1].

3.4 Elektrody

Elektrody jsou jednou z nejdůležitějších součástí elektrické obloukové pece. Dochází na nich k samotnému vzniku oblouku a tudíž i k jejich opalování. Tvoří tak značnou část provozních nákladů [1].

Na elektrody jsou kladeny následující požadavky

- dobrá elektrická vodivost,
- vysoká mechanická pevnost,
- vysoká oxidační hodnota,
- malý obsah popela a síry.

Pro obloukové pece se používají tři druhy elektrod

- uhlíkové,
- grafitové (Obr.3-2),
- násypné.

Obr. 3-2 Grafitové elektrody [8]

3.5 Automatická regulace polohy elektrod

Vzájemná poloha elektrody zásadně ovlivňuje hoření oblouku mezi těmito dvěma částmi elektrické obloukové pece. Tudíž je regulaci polohy přikládána velká důležitost.

Hlavním úkolem automatické regulace polohy je udržet ve značně proměnlivých podmínkách konstantní hodnotu energie přiváděné do pracovního prostoru.

Důležitá je také reakční rychlost. Požaduje se co nejrychlejší nastavení požadovaného stavu po změně vlastností pracovního prostoru. Žádná regulace není bezodezvová. Naší snahou je však tuto odezvu snížit na minimum. V praxi se používají dva typy regulace. Proudonapěťová, která dokáže samočinně zapálit oblouk, a diferenciální regulace, která udržuje konstantní poměr proudu a napětí.

Další součástí, kde při regulaci mohou nastat prodlevy, jsou druhy ovládání pohybu elektrod. Ty závisí na druhu použitých pohonů. V zásadě se používají dva druhy ovládání pohybu:

- elektromechanické ovládání,
- hydraulický mechanizmus ovládání (vyznačuje se minimálním zpožděním) [1].

3.6 Druhy obloukových pecí

3.6.1 Tavící obloukové pece na ocel

Součástí obloukových tavících pecí na ocel je vana vyzděná zásaditou vyzdívkou. Dosahují výkonu až desítek MW. Zajímá nás především optimální provozní režim, který je závislý na několika technologických faktorech (jakosti elektrod, složení vyzdívky nebo konstrukci samotné pece). Co je však nejdůležitějším ovlivňujícím faktorem je zvolený elektrický režim pece. Regulace je prováděna buď změnou napětí přiváděného na elektrody, nebo změnou délky oblouku [1].

Pro zjištění optimálního chodu elektrické obloukové pece se používají pracovní charakteristiky. Nejprve si silový obvod pece nahradíme jednoduchým náhradním schématem a veličiny tohoto schématu zjistíme nejčastěji měřením nakrátko. Z těchto hodnot můžeme na pracovní charakteristice vyznačit proud odpovídající maximálnímu primárnímu výkonu *I'* a maximální proud na oblouku *I''*. Ty jsou hlavními faktory pro určení optimálního chodu pece. Musíme brát také zřetel na fakt, že s narůstajícím proudem dochází k rychlejšímu opalování elektrod, což má za následek větší provozní náklady [1].

3.6.2 Rudné termické obloukové pece a pece na feroslitiny

Rudné termické obloukové pece se dle technologického hlediska rozdělují na redukční a rafinační.

Redukční pece, pracující s kontinuálním procesem (vypouštějí slitinu a strusku v určitých intervalech). Jako redukční prvek je u nich použit uhlík. V současné době jsou u tohoto typu pecí používány výhradně samospékávé Soedebergovy elektrody[1].

V případě rafinačních pecí se jedná o periodický proces tavení. Redukčním prvkem bývá křemík nebo hliník. Oblouk se v průběhu tavení z počáteční zakryté polohy vytáhne nad hladinu taveniny. Transformátory rafinačních pecí mají menší výkony než transformátory redukčních pecí v důsledku chemických reakcí vznikajících během tavení[1].

U pecí na feroslitiny jsou největším problémem boční proudy, které nám zhoršují technologický režim pece a přehřívají vsázku, což má za následek přemístění chemických reakcí do vyšších vrstev a následný vznik strusky. Boční proudy vznikají v důsledku nerovnoměrného rozložení proudů ve vaně pece. Tento problém se řeší buď přepnutím pece na nižší napěťové stupně, nebo se elektrody zastrčí hlouběji. Druhá varianta má však za následek posunutí pracovního bodu do oblasti s menší elektrickou účinnosti, v důsledku zvětšení proudu elektrod [1].

4 INDUKČNÍ ELEKTROTEPELNÁ ZAŘÍZENÍ

4.1 Princip

Jak je již z názvu patrné, tak každé indukční elektrotepelné zařízení bude obsahovat indukčnost, neboli jeho součástí bude cívka. Ta je navinuta okolo elektricky vodivé vsázky. Proudem protékaná válcová cívka vyzařuje do svého okolí válcové elektromagnetické vlnění. To ve vsázce vyvolává indukované proudy, jejichž působením se vsázka zahřívá (Obr. 4-1).

Důležitým faktorem je hloubka vniku elektromagnetického záření, které je závislé na frekvenci a určí se pomocí vztahu [3]

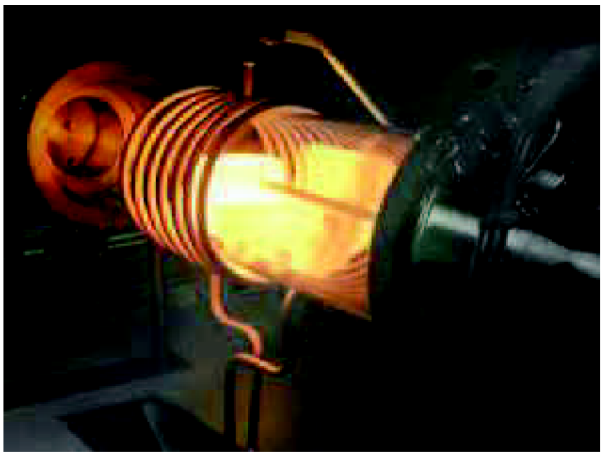
$$\delta = \sqrt{\frac{2}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot \mu \cdot \sigma}} \ [\mathrm{m}] \tag{4.1}$$

f frekvence $[\mathrm{Hz}]$

μ permeabilita $[\mathrm{VS/Am}]$

σ konduktivita $[\mathrm{S/m}]$

Dalším důležitým pojmem je elektrická účinnost indukčního ohřevu, která je závislá na poměru d/δ. Písmeno d označuje průměr vsázky. Dále je účinnost závislá i na materiálu vsázky a její teplotě [1].



Obr. 4-1 Indukční ohřev [9]

4.2 Druhy indukčních pecí

4.2.1 Kelímková pece s nevodivým kelímkem

Kelímkové pece s nevodivým kelímkem se používají k tavení kovů a výrobě kvalitních ocelí. Napájejí se různým kmitočtem v závislosti na velikosti pecí. Velké pece jsou napájeny kmitočtem cca 500 Hz, menší až kmitočtem 4 kHz. Mají také velký rozptyl co se týče množství vsázky a to od 10 kg oceli až do 60 tun oceli [1].

V důsledku tlaku silokřivek na vsázku vzniká u stěn kelímku podtlak a v ose taveniny přetlak. To má za následek silné víření taveniny. Hlavním parametrem je zde vzdutí taveniny ve středu kelímku, které je vyjádřeno vztahem [1]

$$h = K \cdot \frac{P_1}{\rho} \cdot \sqrt{\frac{\mu_r \cdot \sigma}{f}} \quad \left[\mathrm{mm}, -, \mathrm{kW}, \mathrm{kg} \cdot \mathrm{m}^{-3}, -, \mathrm{S} \cdot \mathrm{m}^{-1}, \mathrm{Hz}\right] \tag{4.2}$$

P_1 příkon na jednotku plochy vsázky (válcová plocha přivrácená k cívce),

K konstanta,

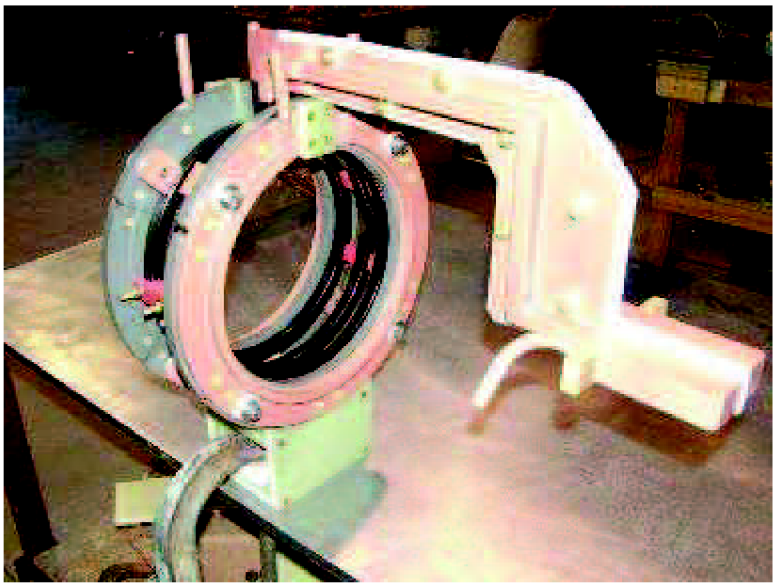
ρ měrná hmotnost vsázky,

μ_r relativní permeabilita vsázky (většinou = 1),

σ konduktivita,

f kmitočet proudu v cívce.

Jelikož proud protékající cívkou dosahuje hodnoty několika tisíc ampér, musí být tato cívka chlazena vodou. Ta je k cívce dováděna izolačními hadicemi (Obr. 4-2).



Obr. 4-2 Cívka s vodním chlazením [10]

4.2.2 Kelímkové pece s vodivým kelímkem

Na rozdíl od kelímkových pecí s nevodivým kelímkem, zde se většina elektromagnetického záření z cívky přemění v teplo v kelímku a menší část ve vsázce. To znamená i menší rozdíl v konstrukci. Aby teplo z kelímku nezhoršovalo chlazení cívky, je od ní kelímek oddělen keramickou izolační vrstvou.

Tento typ kelímkové pece má lepší účinnost, ovšem pouze pro tavení Al a Cu [1].

4.2.3 Kanálkové indukční pece

Kanálkové indukční pece jsou založeny na elektrodynamickém jevu. Samotné tavení probíhá pouze v kanálku, který je obepnut cívkou. Zbytek taveniny zůstává v nístěji nad tímto kanálkem. Právě pomocí elektrodynamického jevu je již roztavená tavenina tlačena vzhůru do nístěje a neroztavená tavenina je vtlačena do vzniklého podtlakového prostoru [1].

Při výměně taveniny musí vždy zůstat třetina předešlé roztavené taveniny v peci. Je to pro to, aby vůbec mohly vzniknout elektrodynamické síly, které budou plynule vytlačovat již roztavený kov do nístěje. Nová vsázka se pak taví v již předehřáté lázni u dna pece [1].

4.2.4 Indukční prohřívací zařízení

U některých technických operací (kování nebo lisování za horka) je potřeba, aby byl daný polotovar rovnoměrně ohřátý. K tomu se v praxi nejčastěji používá indukční ohřívačka. Ta má nejčastěji válcový tvar a její rozměry závisí na ohřívané součásti. Její hlavní částí je cívka, jejíž nejčastější délka bývá 1 m. Do ní se zasouvá součást (vývalek), kterou ohříváme [1].

Na velikosti průměru vývalku je také závislá volba kmitočtu, kterým napájíme cívku. Příklady frekvencí vidíme v Tab. 4-1 [1].

Tab. 4-1 Tabulka hodnot frekvencí pro různé průměry vývalků

f [Hz]	50	500	1000	2000	4000	8000
d [mm]	160-500	80-280	50-180	35-120	22-70	15-50

Za rovnoměrně prohřátý vývalek můžeme považovat takový, u něhož není rozdíl teplot mezi jeho povrchem středem větší než 100°C. Dobu potřebnou k ohřevům určitého druhu vývalku můžeme odečíst z příslušných grafů. Pro zkrácení této doby můžeme použít metody tzv. rychloohřevu. U něho se na straně cívky, kam se vkládá vývalek, zhustí její vinutí [1].

4.2.5 Indukční zařízení na povrchový ohřev

Povrchovým ohříváním rozumíme ohřev řádově do hloubky 10 mm. Pro něj používáme napájení cívky velkým kmitočtem řádově 10^4 až 10^6 Hz. Přiložená tabulka udává, jak velikost prohřáté vrstvy závisí na frekvenci [1].

Tab. 4-2 Závislost hloubky vniku a hloubky prohřátí na frekvenci při kalení

f [kHz]	Hloubka vniku δ [mm] (ocel - 1000°C)	Hloubka ohřáté vrstvy g=(2-3)δ [mm]
10	5	10-15
100	1,6	3,2 - 5
1 000	0,5	1 - 1,5
10 000	0,16	0,3 - 0,5
30 000	0,09	0,2 - 0,3
100 000	0,05	0,1 - 0,15

V praxi se povrchového ohřevu využívá u těchto průmyslových účelů [1]:

Kalení - specifický výkon se pohybuje v rozmezí 1 – 20 kW/cm^2,

- optimální frekvence pro kalení se vypočítá dle vztahu

$$\frac{0{,}015}{d^2} < f < \frac{0{,}25}{d^2} \quad [\mathrm{mm, Hz, mm}] \tag{4.3}$$

d hloubka zakalení,

f frekvence.

Pájení - pro pájení se používaná frekvence pohybuje v rozmezí 2 kHz až 2,5 MHz,

- pájení naměkko – teplota 150 až 450 °C a výkon 0,5 až 5 kW,

- pájení natvrdo – teplota 450 až 1050 °C a výkon 3 až 30 kW.

Svařování trubek - frekvence se pohybuje v rozmezí 8 až 500 kHz,

- výkony dle hloubky prohřátí 50 až 700 kW.

Rafinační přetavování - frekvence se pohybuje v rozmezí od 400 kHz až do 5 MHz,

- výkony od 10 až do 50 kW.

4.3 Připojení indukčních pecí na síť

Pro připojení kanálkových indukčních pecí máme několik možností jak toto připojení provést.

4.3.1 Napájení síťovým kmitočtem 50 Hz

Jednofázové provedení se používá pro pece s jedním kanálkem. Připojují se na sdružené napětí 400 V. Kvůli jasně induktivnímu zatížení sítě musíme provádět kompenzaci na patřičný účiník a dále i symetrizaci, abychom dosáhli stejnoměrného zatížení ve všech třech fázích [1].

Dvoufázová verze se provádí pro pece se dvěma nebo čtyřmi kanálky, kdy dva mají společný transformátor a jejich zapojení je paralelní. I zde je nutná symetrizace, avšak v jiném provedení, než tomu bylo u pecí zapojených jednofázovým provedením [1].

Trojfázové provedení je určeno pro pece se třemi či šesti kanálky. U šesti kanálkového provedení jsou, stejně jako tomu bylo v předchozím případě, vždy dva kanálky připojeny k sobě paralelně a přivedeny na stejné jádro třífázového pecního transformátoru. Pokud je zajištěn stejný odběr všech kelímků, nemusíme u tohoto systému používat symetrizační obvod, protože odběr ve všech fázích je stejný [1].

4.3.2 Napájení středofrekvenčními zdroji napájení

Rotační středofrekvenční generátory jsou založeny na přeměně elektrické energie na energii mechanickou v asynchronním motoru a posléze je opět převedena na elektrickou energii s jinými parametry. To se děje v generátoru ovládaném stejnosměrným budícím proudem. Toto uskupení dodává proudy o kmitočtech 500 až 10 000 Hz.

Tyristorové měniče frekvence fungují na principu usměrnění a rozstřídání elektrického proudu na požadované hodnoty. Skládá se z usměrňovače, meziobvodové tlumivky, která má oddělovací, vyhlazovací a omezovací funkci, a střídače s regulátorem měniče. Ten obsahuje i zařízení pro start měniče. Tyristorové měniče se vyznačují velkou spolehlivostí, protože se zde nevyskytují žádné mechanické součásti, kterým by hrozilo opotřebení, dále bezhlučným chodem a jsou prakticky bezúdržbové [1].

4.3.3 Vysokofrekvenční napájecí zdroje

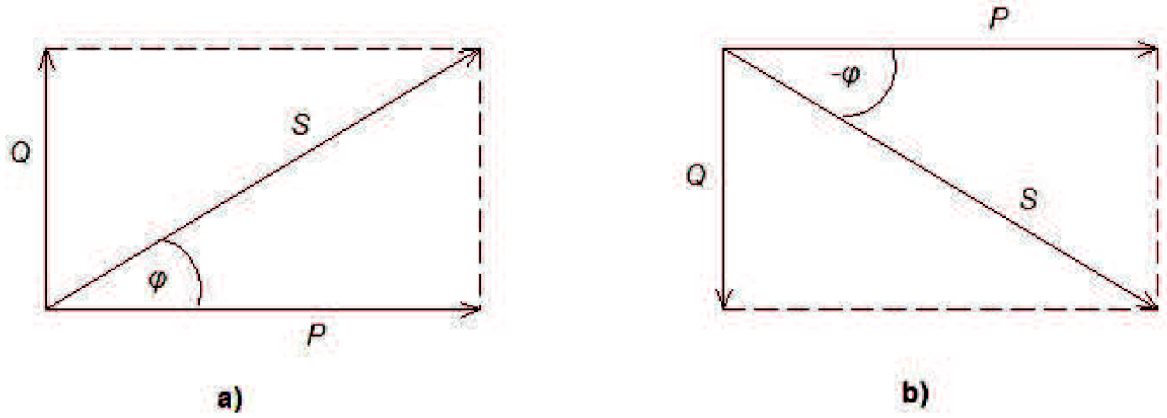
Vysokofrekvenční elektronkový generátor má princip činnosti stejný jako u tyristorového měniče, avšak z důvodů velkých frekvenci je stavba generátoru oproti měniči jiná. Tranzistory měniče jsou nahrazeny výkonovou triodou a jejími dalšími součástmi. Výstupní proud je pak předáván do obvodu samotné pece přes vysokofrekvenční oddělující transformátor. Generují se v něm proudy nad 50 kHz [1].

5 KOMPENZACE

Slovo kompenzace pochází z latinského slova compensatio, které znamená vyvážení, vyvažovat, či náhradu [11]. V elektrotechnice rozeznáváme dva druhy kompenzace. Sériová, která snižuje úbytky napětí u dlouhých vedení. Využívá se pro udržení dovolené odchylky napětí i na konci dlouhého vedení. Naproti tomu paralelní kompenzace neřeší problém úbytku napětí, ale ovlivňuje velikost odebíraného jalového výkonu. Jelikož všechny typy elektrických pecí odebírají ze sítě značnou část jalového výkonu, je pro nás důležitější paralelní typ kompenzace [12].

5.1 Kompenzace jalového výkonu elektrotepelných zařízení

Pojmem kompenzace jalového výkonu rozumíme opatření zajišťující snížení odběru jalového výkonu ze sítě. Ten je způsoben průchodem jalové složky proudu daným obvodem. Dle prvků, kterými proud prochází, rozlišujeme jalové proudy kapacitní a induktivní. Jejich průchodem pak vzniká odběr jalového výkonu kapacitního a induktivního charakteru, jak je znázorněno na fázorových diagramech na Obr. 5.1 [13]. Fázorový diagram a) znázorňuje kapacitní charakter a fázorový diagram b) induktivní charakter jalového výkonu.



Obr. 5-1 Fázorové diagramy kapacitního a induktivního charakteru jalového výkonu

Z těchto diagramů je patrné, že velikost jalového výkonu Q bude ovlivňovat velikost úhlu φ. V praxi se pak používá tzv. účiníku, který je charakterizován funkcí cosinus tohoto úhlu. Požadovanou hodnotu účiníku udává distributor elektrické energie a pohybuje v rozmezí $\cos\varphi = 0{,}95 \div 1$. Pokud dojde u odběratele, odebírajícího elektrickou energii na napěťové úrovni VVN a VN, k překročení těchto hodnot účiníku, bude penalizován dle znění smlouvy [12].

Špatný účiník způsobuje větší ztráty v síti, zapříčiněné jalovou složkou proudu. Pro výpočet ztrát použijeme vztahu 5.1 [13] , který nám znázorňuje ztráty v třífázové soustavě

$$\Delta P = 3 \cdot R \cdot I^2 \quad [\mathrm{W}, \Omega, \mathrm{A}] \tag{5.1}$$

Pokud budeme brát v úvahu proud jako součet činné a jalové složky proudu, dostaneme pro výpočet ztrát vztah [13]

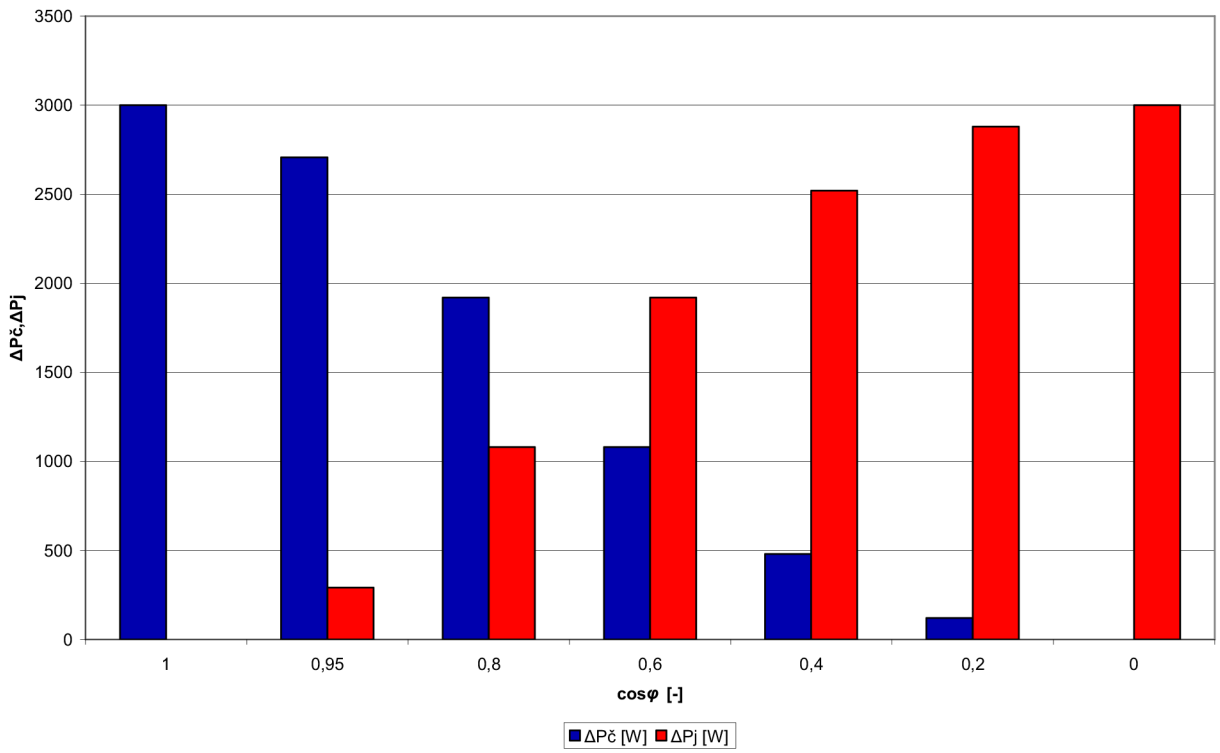
$$I^2 = I_č^{\ 2} + I_j^{\ 2} = I^2 \cdot \cos^2 \varphi + I^2 \cdot \sin^2 \varphi \quad [\mathrm{A}] \tag{5.2}$$

$$\Delta P = 3 \cdot R \cdot I^2 = 3 \cdot R \cdot I^2 \cdot \cos^2 \varphi + 3 \cdot R \cdot I^2 \cdot \sin^2 \varphi \quad [\mathrm{W}, \Omega, \mathrm{A}, -] \tag{5.3}$$

Z tohoto vzorce pak můžeme vyjádřit vztah pro činnou a jalovou složku ztrát [13] a jejich poměr v závislosti na měnící se hodnotě účiníku cosφ (Obr.5.2)

$$\Delta P_č = 3 \cdot R \cdot I^2 \cdot \cos \varphi \quad [\mathrm{W}, \Omega, \mathrm{A}, -] \tag{5.4}$$

$$\Delta P_j = 3 \cdot R \cdot I^2 \cdot \sin \varphi \quad [\mathrm{W}, \Omega, \mathrm{A}, -] \tag{5.5}$$



Obr. 5-2 Graf závislosti činné a jalové složky ztrát na účiníku pro R=10 Ω a I=10 A

Z grafu je patrné, že při dodržení účiníku na hodnotách $1 \div 0{,}95$ se nám na ztrátách na vedení podílí jalová složka ztrát jen minimálně. Z toho vyplývají i výhody kompenzace mezi které patří

- zvětšení přenášeného činného výkonu,
- větší využití rozvodných zařízení,
- zmenšení ztrát v rozvodu elektrické energie,
- zlepšení napěťových poměrů v soustavě spolu se zlepšením symetrie zatížení soustavy a tím zvětšení stability provozu soustavy,
- nehrozí penalizace za špatnou hodnotu účiníku a je možné docílit snížení sazby za odběr elektrické energie [13].

Naproti tomu při nedodržování účiníku u velkých odběratelů elektrické energie má za následek

- zvětšení pořizovacích nákladů všech elektrických zařízení elektrizační soustavy. Dimenzují se podle velikosti zdánlivého výkonu, do kterého se započítává i jalová složka výkonu. Mezi tato zařízení patří například transformátory, výkonové vypínače, měřicí přístroje, jistící přístroje a další, jejichž pořizovací náklady jsou značné,
- zvětšení ztrát v rozvodné síti,
- zhoršení stability přenosu elektrické energie,
- snížení účinnosti alternátorů, transformátorů a dalších zařízení,
- a v neposlední řadě penalizace za nedodržení účiníku v mezích daných smlouvou [13].

5.1.1 Druhy kompenzace u odběratele

5.1.1.1 Kompenzace individuální

Individuální kompenzace je prováděna přímo na svorkách spotřebiče (Obr. 5-3) [14]. Vykompenzována je napájecí síť i rozvod v závodě. Většinou se provádí pro spotřebiče s využitím větším jak 1000 hod/rok [14].

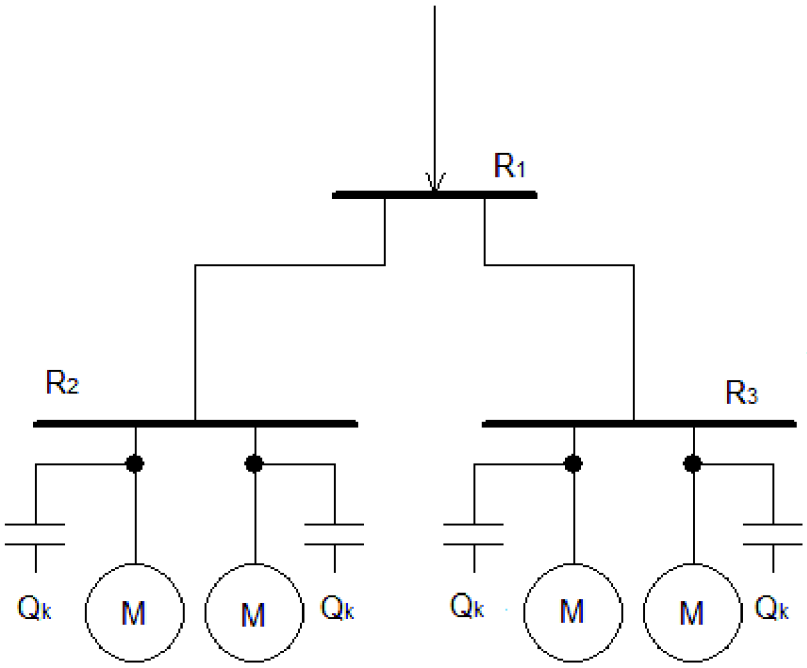
Výhody:

- z hlediska vlastní kompenzace nejlepší,
- zmenší se ztráty na vedení i úbytek napětí,
- nehrozí nebezpečí překompenzování, protože se kondenzátor odpojuje spolu se spotřebičem,
- nevzniká přepětí při zapnutí kondenzátoru.

Nevýhody:

- malé využití kondenzátorů u krátkodobě využívaných strojů,
- vysoké pořizovací náklady.

-



Obr. 5-3 Schéma individuální kompenzace

5.1.1.2 Kompenzace skupinová

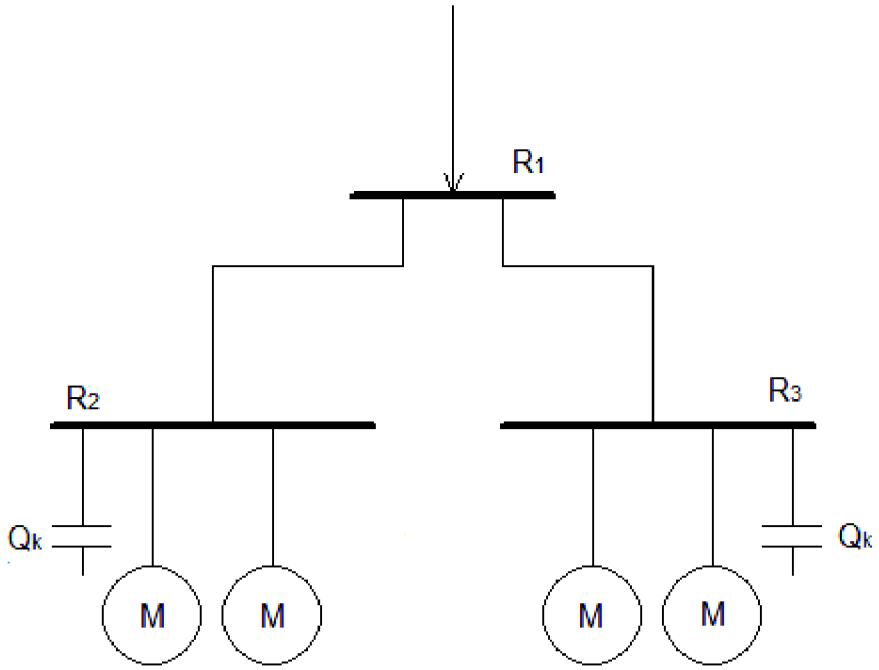
U kompenzace skupinové se kondenzátorová baterie připojuje na svorky podružných rozvaděčů (Obr. 5-4) [14]. Kompenzovaná je síť avšak rozvod za rozvaděčem už ne. Kompenzační prvek je dimenzován podle soudobého jalového výkonu skupiny strojů [14].

Výhody:

- lepší využití kompenzačního prvku (uvažuje se soudobost několika strojů),
- nižší pořizovací náklady než u individuální kompenzace.

Nevýhody:

- nutnost zařazení automatiky (vybíjecí odpory, vypínače apod.),
- vyšší náklady než u centrální kompenzace,
- některé části rozvodu nejsou kompenzovány.



Obr. 5-4 Schéma skupinové kompenzace

5.1.1.3 Kompenzace centrální

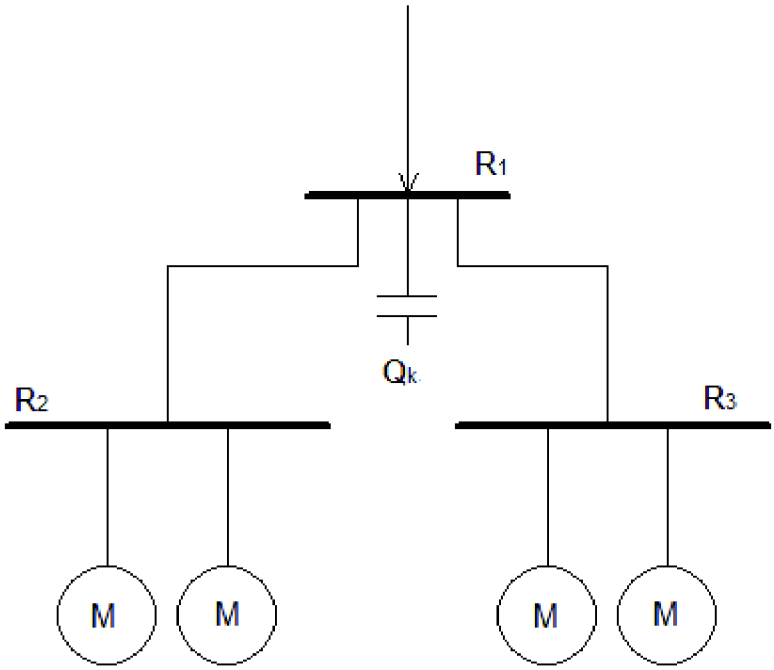
V případě kompenzace centrální se kompenzační prvek nachází v hlavním rozvaděči na přípojnici (Obr. 5-5) [14]. Jedná se o nejlevnější způsob kompenzace za použití automatických regulátorů výkonu [14].

Výhody:

- nejlevnější,
- kompenzační prvek má nejvyšší využití,
- regulace probíhá automaticky,
- snadná kontrola.

Nevýhody:

- celý rozvod za hlavním rozvaděčem je nekompenzovaný,
- je náročná na prostor v rozvaděči.



Obr. 5-5 Schéma centrální kompenzace

5.1.1.4 Kompenzace kombinovaná

U kombinované kompenzace se jedná o kombinaci předešlých způsobů kompenzace. Např. použití individuální kompenzace u stroje s velkým odběrem jalového výkonu a skupinové kompenzace pro skupinu strojů s menším odběrem jalového energie [14].

5.1.2 Kompenzační prvky

Mezi kompenzační prvky patří mimo již zmíněné kondenzátorové baterie (Obr. 5-6) [15], které jsou statickými prvky, i točivé kompenzátory. V podstatě se jedná o synchronní motory nekonající činnou práci. Z toho důvodu se mohou dimenzovat na nižší zatížení. Hlavní rozdíl mezi synchronním motor a kompenzátorem je však v jejich buzení. Buzení kompenzátorů musí být daleko silnější než u motorů, protože právě buzením stroje můžeme měnit velikost účiníku a to ve velkém rozsahu od podbuzení, které se rovná indukčnímu zatížení, až po přebuzení, které zosobňuje zatížení kapacitní. I přes tuto přednost, se v průmyslu synchronní kompenzátory nevyužívají. Je to způsobeno hlavně jejich potřebou velké údržby oproti statickým kondenzátorovým bateriím. Ty navíc nemají žádné mechanické části, které by podléhaly opotřebení a i spínání jejich odboček se dnes již provádí bezkontaktními polovodičovými spínači s velkou spolehlivostí [16].

Statické kondenzátorové kompenzátory mají i své nevýhody. Jednou z nich je možný výskyt přepětí v obvodu s kondenzátorem při přechodových jevech, jako je např. spínání či vypínání. Dále pak, že i po odpojení od zdroje na nich přetrvává napětí. To je potřeba nějakým způsobem vybít. K tomu se kondenzátory opatřují vybíjecím zařízením. Nejčastěji je toto zařízení zastoupeno vybíjecím rezistorem, v kterém se zbylá naakumulovaná energie přemění na teplo [16].

Obr. 5-6 Kondenzátorová baterie

5.1.3 Kompenzace elektrických odporových pecí

Kompenzace čistě odporové zátěže se může zdát zbytečností, avšak součásti odporových pecí mohou odebírat i jalový příkon ze sítě a ten je potřeba kompenzovat. Mluvíme například o regulaci příkonu dodávaného topným tělesům pece. Kvůli jejich konstrukci nemůžeme použít impulsní regulace, kdy bychom střídavě zapínali a vypínali celý příkon. Proto se používají buď regulační transformátory, nebo fázově řízené spínače napětí, které zajišťují plynulou regulaci. U řízeného spínače napětí se v podstatě jedná o antiparalelně zapojené tyristory. Je zde využita přímá závislost velikosti fázového úhlu na efektivní hodnotě napětí a tím pádem i na příkonu dodávaného příkonu topným článkům. Změnou fázového úhlu dochází k odebírání jalového výkonu ze sítě [17].

5.1.4 Kompenzace elektrických pecí obloukových

Kompenzace elektrických obloukových pecí je i přes to, že u obloukových pecí převažuje ohmický druh zátěže, nutná. Způsobují to zařízení, která mají zabránit velkému kolísání napětí při změnách zátěže v důsledku změny délky oblouku. Tyto rozsahy se pohybují od nekonečné impedance, kdy oblouk uhasne, až po nulovou impedanci, to pro případ kdy dojde ke kontaktu elektrody se vsázkou. Pro tyto účely má napájecí transformátor velkou indukčnost a v některých případech je ještě přidána indukčnost reaktoru. To má za následek odběr značného jalového výkonu ze sítě a tím pádem i zhoreční účiníku cosφ [17].

5.1.5 Kompenzace elektrických indukčních pecí

Rozlišujeme zde dva typy připojení indukčních pecí na síť a v závislosti na tom nám vyvstávají odlišné požadavky na kompenzaci.

Připojení indukčních pecí na síťový kmitočet 50 Hz se vyznačuje dvěmi vlastními stupňovitými kondenzátorovými bateriemi. Ty mají za úkol kompenzovat změnu indukčnosti, během tavení a zároveň zaručit symetrický odběr proudů. Pokud jsou tato zařízení v náležitém

technickém stavu, není zde potřeba zvláštní kompenzace. V důsledku stárnutí jednotlivých komponentů však tato nutnost externí kompenzace může nastat.

Pokud indukční pece napájíme středofrekvenčním zdrojem, musíme počítat s jeho řízeným usměrňovačem. Ten způsobuje odběr jalového výkonu. Jelikož změny odběru jalového výkonu nejsou v tomto případě příliš dynamické, postačí nám stupňovitě spínaná kompenzace [17].

5.2 Příklad návrhu kompenzace pro elektrickou indukční pec

Návrh kompenzace začneme určením účiníku cosφ dané pece z příkonu pece P, napájecího sdruženého napětí U_S a provozního proudu I. Vztah na výpočet cosφ odvodíme ze vztahu pro výpočet příkonu [12]

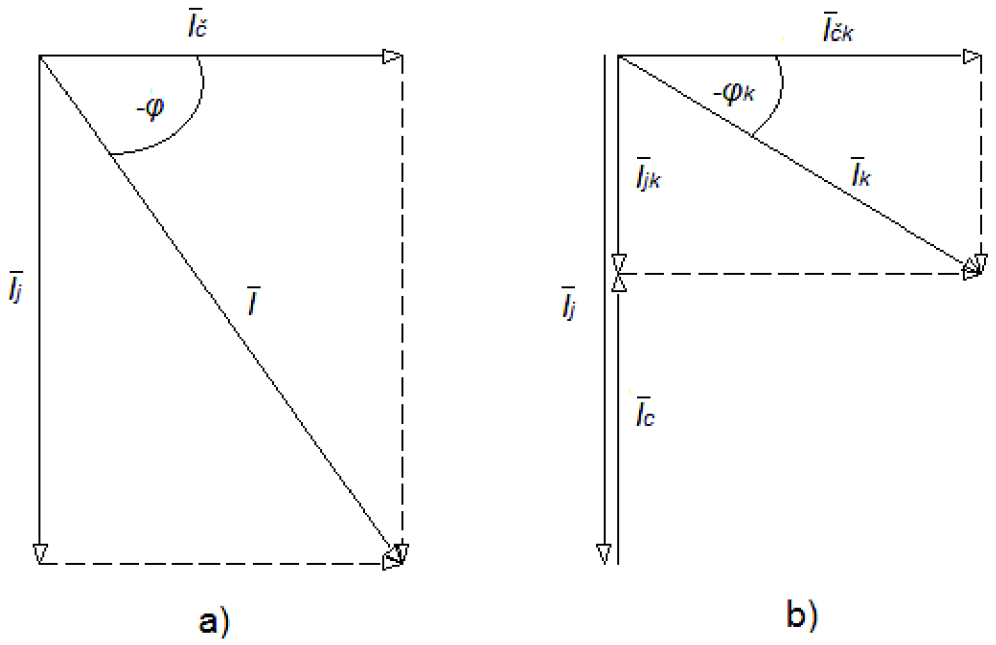
$$P = \sqrt{3} \cdot U_S \cdot I \cdot \cos\varphi \Rightarrow \cos\varphi = \frac{P}{\sqrt{3} \cdot U_s \cdot I} \quad [\mathrm{W, V, A, –}] \tag{5.6}$$

Když je znám účiník, lze určit činnou i jalovou složku proudu za pomoci vztahu [12]

$$\bar{I} = |I| \cdot \cos\varphi + j \cdot |I| \cdot \sin\varphi \quad [\mathrm{A, A}] \tag{5.7}$$

Pro další postup si určíme poměr mezi činnou složkou a jalovou složkou proudu. Z fázorového diagramu (Obr. 5-7a) [12] je patrné, že poměr mezi činnou a jalovou složkou proudu vyjadřuje goniometrická funkce tangens úhlu φ vyjádřená ve vztahu [12]

$$\mathrm{tg}\varphi = \frac{I_č}{I_j} \quad [\mathrm{–, A, A}] \tag{5.8}$$



Obr. 5-7 Fázorové diagramy a) nevykompenzovaného b) vykompenzovaného proudu

Při předpokladu, že po vykompenzování se nám změní velikost jenom jalové složky proudu *Ij* a naopak činná složka proudu $I_č$ zůstane stejná, můžeme na základě vztahu (5.8) vyjádřit vztah mezi jalovou složku proudu před kompenzací I_j a jalovou složkou proudu po kompenzaci I_{jk} [12]

$$\mathrm{tg}\varphi = \frac{I_č}{I_j}\ ;\ \mathrm{tg}\varphi_k = \frac{I_{čk}}{I_{jk}}$$
$$I_č = I_{čk} \Rightarrow \frac{I_j}{\mathrm{tg}\varphi} = \frac{I_{jk}}{\mathrm{tg}\varphi_k} \Rightarrow I_{jk} = \frac{I_j \cdot \mathrm{tg}\varphi_k}{\mathrm{tg}\varphi} \quad [\mathrm{A,A,–,–}] \tag{5.9}$$

Dále určíme proud protékající kompenzačním kondenzátorem I_c. Z fázorového diagramu vykompenzovaného proudu (Obr. 5-7b) je patrné, že proud I_c je rozdílem jalové složky proud před kompenzací *Ij* a jalové složky po kompenzaci I_{jk} [12].

$$I_c = I_j - I_{jk} \quad [\mathrm{A,A,A}] \tag{5.10}$$

Při znalosti proudu protékající kondenzátorem již můžeme vypočítat výkon kompenzační baterie, dle kterého budeme volit danou baterii.

$$Q_c = \sqrt{3} \cdot U_S \cdot I_c \quad [\mathrm{VAr,V,A}] \tag{5.11}$$

Pro návrh kompenzace byla vybrána indukční pec pro tavbu litiny, jejíž parametry udává Tab. 5-1 [18].

Tab. 5-1 Parametry indukční pece na tavbu litiny

Model	Příkon	Proud	Pracovní napětí
	P [kW]	*I* [A]	U_S [V]
GWG-0.75-400/1J	400	650	1500

Začneme určením účiníku cosφ dle vztahu (5.6)

$$\cos\varphi = \frac{P}{\sqrt{3} \cdot U_S \cdot I} = \frac{400 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 1500 \cdot 650} = 0{,}2369 \tag{5.12}$$

Poté dle vzorce (5.7) určíme činnou i jalovou složku proudu

$$\bar{I} = |I| \cdot \cos\varphi + j \cdot |I| \cdot \sin\varphi = 650 \cdot 0{,}2369 + j \cdot 650 \cdot 0{,}9715 = (153{,}99 - j \cdot 631{,}48)\,\mathrm{A} \tag{5.13}$$

Záporné znaménko u jalové složky proudu vyjadřuje induktivní charakter proudu, který je patrný z fázorového diagramu na Obr. 5-7a.

Pro další výpočet si stanovíme požadovanou hodnotu účiníku po kompenzaci. Distributor elektrické energie požaduje účiník v rozmezí $1 \div 0{,}95$. Zvolíme přibližně střední hodnotu $\cos\varphi = 0{,}97$. Pro tuto hodnotu vypočítáme jalovou složku proudu po kompenzaci za použití vztahu (5.9)

$$I_{jk} = \frac{I_j \cdot \mathrm{tg}\varphi_k}{\mathrm{tg}\varphi} = \frac{631{,}48 \cdot 0{,}2506}{4{,}1010} = 38{,}59\,\mathrm{A} \tag{5.14}$$

Dále určíme proud tekoucí kondenzátorovou baterií ze vzorce (5.10)

$$I_c = I_j - I_{jk} = 631{,}48 - 38{,}59 = 592{,}89\,\mathrm{A} \tag{5.15}$$

Nakonec se vypočte dle vzorce (5.11) výkon kapacitní baterie.

$$Q_c = \sqrt{3} \cdot U_S \cdot I_c = \sqrt{3} \cdot 1500 \cdot 592{,}89 = \underline{\underline{1540{,}37\,\mathrm{kVAr}}} \tag{5.15}$$

Vypočítáme si však i výkon jednofázový pro případ, že by bylo nutné volit kondenzační baterie jednofázové do každé fáze v zapojení do hvězdy.

$$Q_c = \frac{U_S}{\sqrt{3}} \cdot I_c = \frac{1500}{\sqrt{3}} \cdot 592{,}89 = \underline{\underline{531{,}46\,\mathrm{kVAr}}} \tag{5.16}$$

Z katalogu firmy ZEZ Silko, s.r.o. vypočteným hodnotám nejvíce odpovídal jednofázový kondenzátor *FRJJS 01-1,5/28/2*, jehož parametry udává Tab. 5-2 [18].

Tab. 5-2 Parametry kompenzační jednofázové baterie

Typ	U_n	C_n (C_T)	Q_n (Q_T)	I_n	I_{max}
	[V]	[μF]	[kVAr]	[A]	[A]
FRJJS 01-1,5/28/2	1500	28 (4+3 x 8)	792 (113,1+3 x 226,3)	528	800

Napětí U_n značí jmenovité napětí, na které je baterie dimenzována. Kapacita C_n označuje celkovou kapacitu všech sekcí kondenzátorové baterie (kapacity jednotlivých sekcí zastupuje veličina C_T a hodnoty jsou uvedeny v závorce). Veličina Q_n představuje jmenovitý jalový (kompenzační) výkon baterie a je součtem jmenovitých jalových výkonů jednotlivých sekcí, jejichž hodnoty jsou zaznamenány v závorce a zastupuje je veličina Q_T. I_n je jmenovitý proud kondenzátorové baterie a proud I_{max} je maximální dovolený proud.

Jelikož některé parametry přesně nevyhovují našim požadavkům, jako například zbytečně předimenzovaný výkon Q_n, můžeme si u výrobce zadat požadované parametry kondenzační baterie, kterou na zakázku vyrobí [19].

Jak je vidět v Tab. 5-2 ve sloupci s velikostí jalového výkonu Q_n, má tato baterie čtyři kompenzační stupně. Jejich připojování a odpojování řídí regulátor jalového výkonu. Tyto plně automatické regulátory měří okamžité hodnoty napětí a proudu, jejich hodnoty převedou z analogové do digitální podoby, se kterou počítají a vyhodnotí, které kompenzační stupně na kondenzátorových bateriích má sepnout či vypnout [20].

Obr. 5-8 Regulátor jalového výkonu NOVAR 1106 / 1114 [19]

Zde ukázaný postup řešení kompenzace je zjednodušený. Například u obloukových elektrických pecí musíme brát ohled i na generování vyšších harmonických, či ovlivňování napájecí sítě kolísáním napětí. Dokonalá optimalizace provozu elektrických pecí velkých výkonů je zdlouhavý proces a optimalizování všech pracovních procesů může trvat i několik měsíců [21].

6 SYMETRIZACE

Pojmem symetrizace rozumíme zajištění stejnoměrného odběru elektrické energie ze všech tří fází napájecí soustavy. Na provedení symetrizačního obvodu má největší vliv počet fází vlastní pece. Liší se provedení symetrizačního obvodu pro jedno, dvou a třífázové pece. Nutností také je dodržet posunutí napětí v jednotlivých fázích o 120° elektrických.

6.1 Symetrizace jednofázové pece

Pro zajištění symetrizace u jednofázové indukční pece budeme uvažovat plně vykompenzovaný stav, tj. $\cos\varphi = 1$. Takto vykompenzovanou pec nahradíme zatěžovacím rezistorem R_Z vzorec (6.1). Symetrizační obvod se skládá z již zmiňovaného náhradního zatěžovacího rezistoru v jedné větvi, indukčnosti L o vhodné velikosti ve větvi druhé a vhodně veliké kapacity C ve větvi třetí. Jejich vzájemné propojení může být do hvězdy, či do trojúhelníka. Lišit se pak budou velikosti jednotlivých prvků [13]

$$R_Z = \frac{3 \cdot U_f^{\,2}}{P} \quad [\Omega, \mathrm{V}, \mathrm{W}] \text{ zapojení do hvězdy}$$
$$R_Z = \frac{3 \cdot U_s^{\,2}}{P} \quad [\Omega, \mathrm{V}, \mathrm{W}] \text{ zapojení do trojúhelníka} \tag{6.1}$$

Pro zapojení do trojúhelníka (Obr. 6-1a) [13] jsou vzorce pro výpočet prvků L a C následující

$$L = \frac{\sqrt{3} \cdot R_Z}{\omega}\,;\; C = \frac{1}{\omega \cdot \sqrt{3} \cdot R_Z}\,;\; \omega \cdot L = \frac{1}{\omega \cdot C} = \sqrt{3} \cdot R_Z \quad [\mathrm{H}; \mathrm{F}; \Omega] \tag{6.2}$$

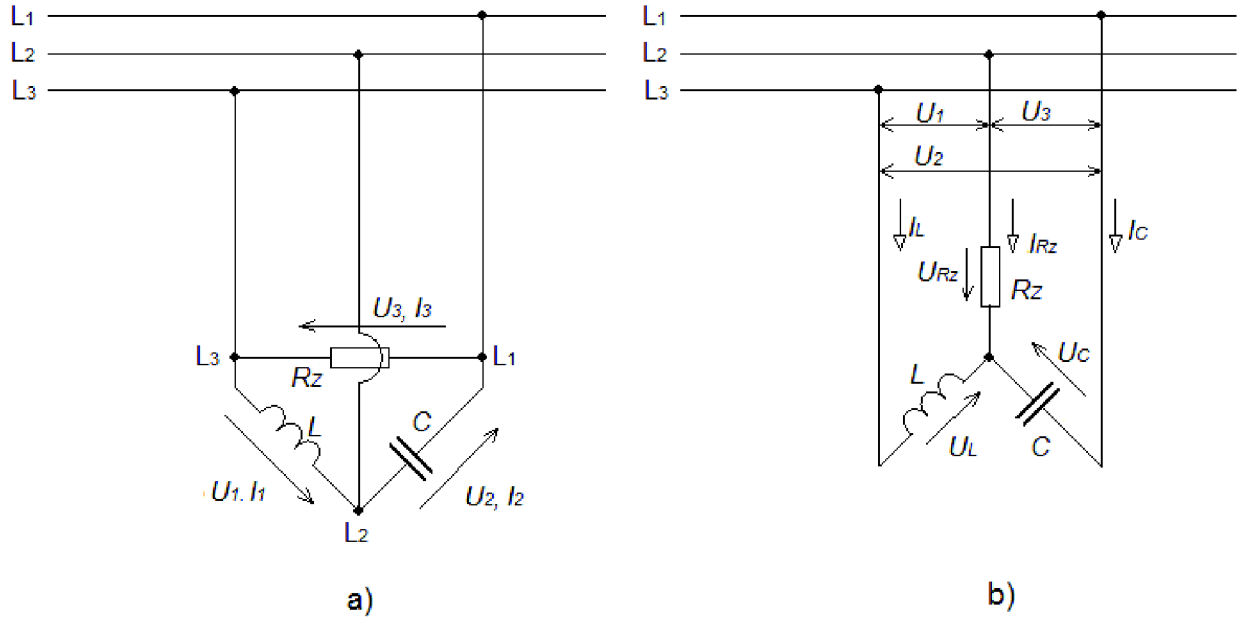
Pro zapojení do hvězdy (Obr. 6-1b) [13] je změna ve vzorcích pro výpočet L a C následující

$$L = \frac{R_Z}{\sqrt{3} \cdot \omega}\,;\; C = \frac{\sqrt{3}}{\omega \cdot R_Z}\,;\; \omega \cdot L = \frac{1}{\omega \cdot C} = \frac{R_Z}{\sqrt{3}} \quad [\mathrm{H}; \mathrm{F}; \Omega] \tag{6.3}$$

Jelikož se prvky L a C často dimenzují podle jalové složky výkonu Q_2, určíme si hodnotu činného výkonu vlastní pece P_2 (6.4) a hodnotu jalového výkonu prvků L a C [13]

$$P_2 = U_2 \cdot I_2 = \frac{U_2^{\,2}}{R_Z} \quad [\mathrm{W}, \mathrm{V}, \mathrm{A}, \Omega] \tag{6.4}$$

$$Q_2 = \frac{U_2^{\,2}}{\sqrt{3} \cdot R_Z} = \frac{P_2}{\sqrt{3}} \quad [\mathrm{VAr}, \mathrm{V}, \Omega, \mathrm{W}] \tag{6.5}$$



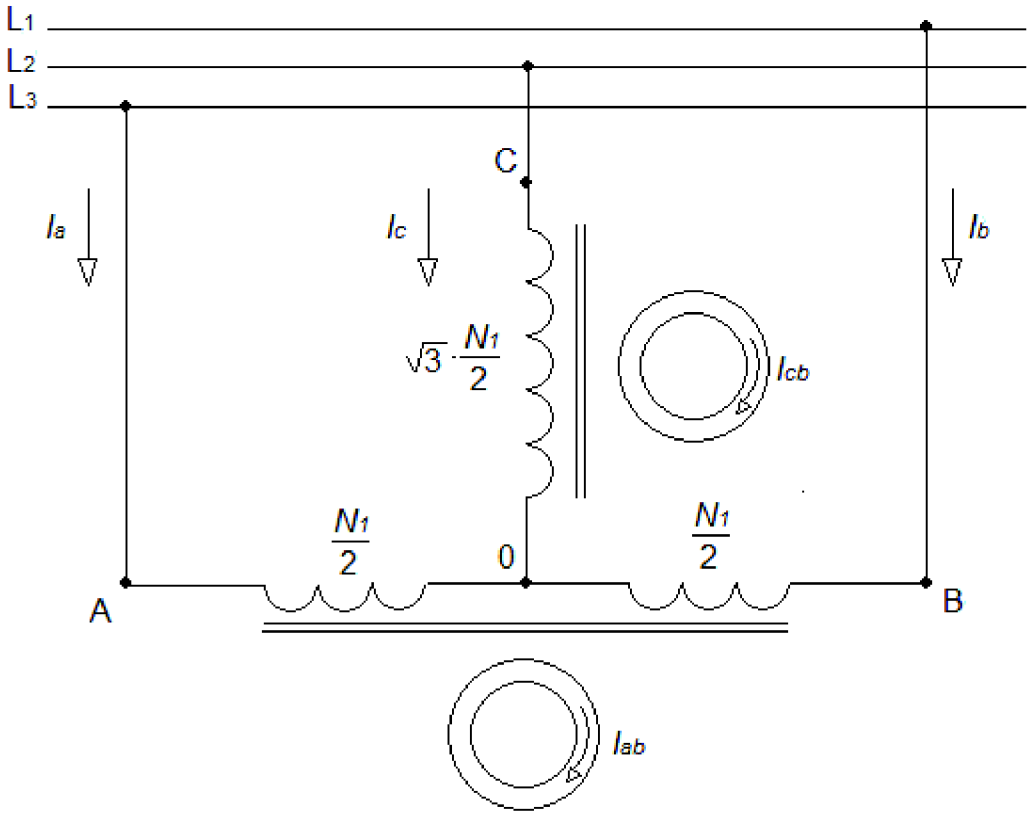
Obr. 6-1 Schéma jednofázové symetrizace a) pro zapojení v trojúhelníku, b)pro zapojení do hvězdy

Symetrizace lze dosáhnout pouze při správném sledu fází. Při připojení pece se symetrizačním zařízením do sítě, se do každého přívodu zapojí ampérmetr. Pokud je sled fází správný, všechny ampérmetry ukáží stejnou výchylku. V opačném případě budou ampérmetry připojené na fázi L1 a L3 ukazovat vyšší výchylku než ampérmetr na přívodu z fáze L2. Pokud k tomu dojde, prohozením libovolných dvou přívodů zajistíme správný sled fází [13].

6.2 Symetrizace dvoufázové pece

Symetrizace pomocí Scottova zapojení

Symetrizace u dvoufázových pecí, jako jsou například indukční pece s dvěma kelímky, je oproti symetrizace jednofázové pece složitější. K jejímu provedení se používá tzv. Scottovo zapojení dvou pecních transformátorů (Obr. 6-2) [13]. Hlavní transformátor, zapojený mezi body A a B, má primární vinutí rozdělené na dvě části, z nichž každá má stejný počet závitů $\frac{N_1}{2}$. Mezi bod C a střed vinutí hlavního transformátoru je připojen tzv. pomocný transformátor, jehož vinutí má počet závitů $\sqrt{3} \cdot \frac{N_1}{2}$. Pokud jsou oba kelímky stejného typu, pak jsou ve všech fázích odbírané proudy stejné, stejně jako indukované proudy v kelímcích a tudíž i množství tepla vzniklého v kelímcích [13].



Obr. 6-2 Schéma Scottova zapojení

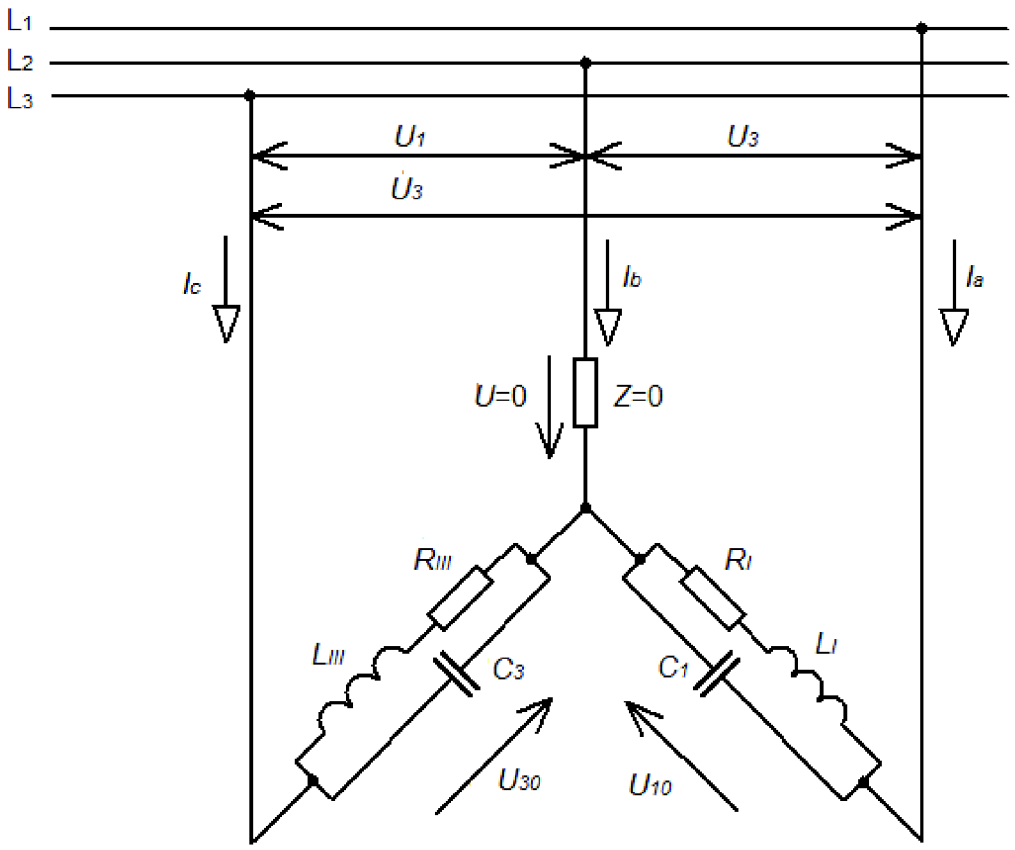
Symetrizace pomocí zvláštního symetrizačního zapojení

Další možností provedení symetrizace dvoufázové pece je zobrazeno na Obr. 6-3 [13]. Toto zapojení má oproti Scottovu zapojení oba pecní transformátory stejné. Rezistor R_I a cívka L_I ve schématu označují výsledný odpor a výslednou indukčnost v první větvi, po převedení hodnot L_2, R_2 vsázky do prvního obvodu. Stejně je tomu i ve třetí větvi s prvky R_{III} a L_{III}. Jak už bylo zmíněno, oba pecní transformátory jsou stejné, což platí i pro oba kanálky pece. Poté můžeme uvažovat za platné rovnice [13]

$$L_I = L_{III} \quad [\mathrm{H}]$$
$$R_I = R_{III} \quad [\Omega] \tag{6.6}$$

Nutností je však zde i optimalizování obvodu obou pecí pomocí paralelních rezonančních kapacit C_1 a C_3. Toho docílíme zařazením kondenzátorů o velikostech dle vztahu [13]

$$C_{1REZ} = C_{3REZ} = \frac{L_I}{R_I^{\,2} + (\omega \cdot L_I)^2} \quad [\mathrm{F,H,\Omega}] \tag{6.7}$$



Obr. 6-3 Schéma zapojení zvláštního symetrizačního zapojení pro dvoufázovou pec

I zde je nutné dodržet správný sled fází. Sled fází opět zjistíme zařazením tří ampérmetrů do všech tří přívodů. V případě že není dodržen správný sled fází bude mít proud *Ib* dvakrát větší hodnotu než zbylé dva proudy. Nápravy dosáhneme prohozením dvou libovolných přívodů [13].

6.3 Symetrizace třífázové pece

Třífázové pece se třemi, nebo šesti kanálky mají třífázový pecní transformátor, u kterého každé jádro nese pecní cívku. Na každou z nich je pak připojen jeden kanálek (pece se třemi kanálky), nebo paralelně dva kanálky (pece se šesti kanálky). Pecní cívky mohou být napájeny jak fázovým napětím (zapojení do hvězdy) tak sdruženým (zapojení do trojúhelníka). V tomto zapojení pece symetricky zatěžují síť. Pro zlepšení účiníku cosφ se do obvodu vkládá třífázová kompenzační kondenzátorová baterie, jak již bylo zmíněno v kapitole kompenzace jalového výkonu [13].

6.4 Příklad výpočtu symetrizačního zařízení

6.4.1 Příklad výpočtu symetrizačního zařízení zapojeného do hvězdy

Pro návrh symetrizačního zařízení byla vybrána jednofázová indukční kelímková pec s těmito parametry. Napájecí napětí pece $400/230\ \mathrm{V}$, frekvence 50 Hz, příkon pece P=16 kW [22].

Dle vztahu (6.1) pro zapojení do hvězdy vypočítáme velikost rezistoru R_Z, který nám nahradí vykompenzovanou pec

$$R_Z = \frac{3 \cdot U_f^{\,2}}{P} = \frac{3 \cdot 230^2}{16 \cdot 10^3} = 9{,}92\ \Omega \tag{6.8}$$

Dále si určíme hodnoty kapacity kondenzátoru a indukčnosti cívky dle (6.3)

$$\begin{aligned} L &= \frac{\sqrt{3} \cdot R_Z}{\omega} = \frac{\sqrt{3} \cdot 9{,}92}{2 \cdot \pi \cdot 50} = 54{,}69\ \text{mH} \\ C &= \frac{1}{\omega \cdot \sqrt{3} \cdot R_Z} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot \sqrt{3} \cdot 9{,}92} = 185{,}26\ \mu\text{F} \end{aligned} \tag{6.8}$$

6.4.2 Příklad výpočtu symetrizačního zařízení zapojeného do trojúhelníka

Pro návrh symetrizačního zařízení byla vybrána jednofázová indukční kelímková pec s těmito parametry. Napájecí napětí pece $400/230\ \text{V}$, frekvence 50 Hz, příkon pece P=16 kW [22].

K výpočtu odporu R_Z, nahrazujícího vykompenzovanou pec, použijeme vzorce (6.1)

$$R_Z = \frac{3 \cdot U_S^{\,2}}{P} = \frac{3 \cdot 400^2}{16 \cdot 10^3} = 30{,}00\ \Omega \tag{6.8}$$

Dále pak určíme hodnoty prvků L a C (6.2).

$$\begin{aligned} L &= \frac{R_Z}{\sqrt{3} \cdot \omega} = \frac{30{,}00}{\sqrt{3} \cdot 2 \cdot \pi \cdot 50} = 55{,}13\ \text{mH} \\ C &= \frac{\sqrt{3}}{\omega \cdot R_Z} = \frac{\sqrt{3}}{2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 30} = 183{,}78\ \mu\text{F} \end{aligned} \tag{6.9}$$

Z těchto vypočtených údajů již můžeme sestavit symetrizační obvod dle zapojení v závislosti na připojeném napětí na indukční peci. Pro připojení pece na fázové napětí, volíme prvky z výpočtu symetrizačního zařízení zapojeného do hvězdy. Pokud je pec připojena na napětí sdružené volíme výsledky výpočtu pro symetrizační zařízení zapojené do trojúhelníka.

6.5 Zhodnocení použitých způsobů připojení elektrotepelných zařízení k síti

Z pohledu ovlivňování napájecí sítě jsou elektrotepelná zařízení velkých výkonů jedním z nejhorších spotřebičů. Aby tomu tak nebylo, musí se každé takové zařízení projít procesem optimalizace připojení k síti. Jedná se o elektrické tavící pece, jejichž příkony jsou ve značném rozpětí závislém na způsobu přeměny elektrické energie na energii tepelnou (odporové, obloukové, indukční), množství taveného materiálu, nebo množství ohřívaného materiálu. Mezi negativní vlastnosti těchto pecí se řadí většinou špatný účiník, nesymetrické zatížení třífázového rozvodu, velké kolísání napětí a u některých i generace vyšších harmonických. K minimalizování těchto jevů existuje několik pracovních postupů.

Pro zlepšení účiníku cosφ se používá paralelní kompenzace zvané také kompenzace jalového výkonu. Metody kompenzace došly v průběhu doby k vývoji hlavně co se týče prostředků zajišťující zlepšení účiníku na požadované hodnoty. Dříve využívané synchronní kompenzátory nahradili statické kondenzátory. Důvodem k tomu byla větší spolehlivost, menší nároky na údržbu a v mnoha případech i menší rozměry. I samotné kompenzační kondenzátory prošly vývojem. Nepoužívají se jednotlivé kondenzátory s pevnou kapacitou a výkonem, ale kondenzátorové baterie, zapouzdřeny v jednom pouzdře, s více sekcemi, jejichž postupné spínání a odpínání zajišťuje jemnější korekci okamžité hodnoty účiníku. Díky novým technologiím jsou kondenzátorové baterie i velkých výkonů kompaktnější. Například pro celý rozvod Královopolské, a.s. napěťové hladiny 6 kV stačí jedna kondenzátorová baterie. Tu řídí automatický regulátor, jehož funkcí je udržovat hodnotu účiníku na dané hodnotě. Celé toto kompenzační zařízení v dnešní době výrobci sestaví dle přání zákazníka do samostatného rozvaděče, takže je zajištěna i přehlednost celého zařízení.

Nesymetrický odběr elektrické energie mají především na svědomí elektrické pece jednofázové a dvoufázové. Toto uspořádání se týká převážně pecí indukčních, kde se počtem fází určuje počet kanálků (kelímků). Zajištění symetrického odběru má na svědomí symetrizační obvod, jehož provedení závisí právě na počtu fází, které daná pec využívá (viz. kap. 6). Pro návrh symetrizace platí dvě základní podmínky. Správné navržení prvku symetrizačního obvodu dle vzorců pro dané schéma (jednofázové, Scottovo, zvláštní symetrizační zapojení pro dvoufázové pece), a za další dodržet správný sled fází. Sled fází se kontroluje pomocí ampérmetru v každém přívodu symetrizačního obvodu.

Velké kolísání napětí a generování vyšších harmonických je doménou obloukových pecí. Tento typ elektrických tavících pecí je z pohledu návrhu připojení k distribuční síti nejhorší. Kromě prvků paralelní kompenzace a symetrizačního obvodu bývají připojeny i kondenzátory pro filtraci vyšších harmonických či dekompenzační tlumivky. Jelikož proces tavby u obloukových pecí je v čase velmi proměnlivý a má dopad na napájecí síť je nutné ho optimalizovat. Tento proces je značně časově náročný (i několik měsíců) a probíhá ve spolupráci s technology a odborníky na danou problematiku.

Celkově je provoz elektrických pecí značně nákladný a i pořizovací náklady se vyšplhávají do značných částek. Kromě pořizovacích nákladů samotné pece musíme počítat pořizovací náklady přívodů a přípojnic, veškeré náklady na řídící zařízení těchto pecí, kompenzačních a symetrizačních prvků, měřící techniky atd.

7 ZÁVĚR

Cílem práce je seznámení se s různými typy elektrických pecí, způsoby připojování na síť a řešení problémů, které vznikají jejich provozem a které mají dopad na rozvodnou soustavu. Pro práci byly vybrány pece odporové, obloukové a indukční, mezi jejichž negativní vlastnosti se počítá nízká hodnota účiníku cosφ oproti požadované hodnotě od distributora elektrické energie, nesymetrický odběr energie ze sítě, vznik vyšších harmonických či kolísání napětí.

Pro rozsah práce byly vybrány postupy pro zlepšení hodnoty cosφ pomocí kompenzace jalového výkonu a postup pro zajištění symetrického odběru pomocí symetrizačního obvodu.

V kapitole č. 5 jsou teoreticky rozebrány důvody kompenzace, možnosti jejího provedení a zařízení, které nám kompenzaci zprostředkovává. Další krok je navrhnutí kondenzátorové baterie pro danou pec. Výpočtem potřebného jalového výkonu pece Q_c, dostaneme parametr, díky kterému můžeme z katalogu vybrat baterii s podobnými parametry. Pro přesnější kompenzaci je tu i možnost výroby kondenzátorové baterie na zakázku s parametry vyhovujícími našim předpokladům.

V kapitole č. 6 je rozebrána problematika symetrizace. Jsou zde uvedeny způsoby zapojení symetrizačních obvodů spolu se schématy a vzorci pro výpočet jednotlivých prvků těchto obvodů. Prakticky zde pak jsou vypočítány prvky symetrizačního obvodu jednofázové indukční pece a to jak pro zapojení do hvězd, tak i do trojúhelníka.

V kapitole s názvem *Zhodnocení použitých způsobů připojení elektrotepelných zařízení k síti* jsou shrnuty získané poznatky a celkově zhodnocena problematika připojení elektrotepelných zařízení velkých výkonů k síti.

POUŽITÁ LITERATURA

[1] HRADÍLEK, Zdeněk, et al. Elektrotepelná zařízení. Vydání 1. Praha : IN-EL, 1997. 170 s. ISBN 80-902333-2-5

[2] Lac.cz [online]. 11.8.2009 [cit. 2011-12-10]. LAC. Dostupné z WWW: http://www.lac.cz

[3] BAXANT, Petr a Jiří DRÁPELA. Užití elektrické energie [online]. VUT Brno, 2007, 18.11.2007 [cit. 2012-05-19]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/

[4] Elektroteplo.cz [online]. 9.2.2006 [cit. 2011-12-10]. ELEKTROTEPLO Kolín s.r.o. Dostupné z WWW: http://www.elektroteplo.cz

[5] Kalirna-zlin.cz [online]. 14.2.2011. 28.2.2003 [cit. 2011-12-10]. Kalírna Zlín Chytil. Dostupné z WWW: http://www.kalirna-zlin.cz

[6] Fornax.cz [online]. 4.8.2005 [cit. 2011-12-10]. FORNAX akciová společnost. Dostupné z WWW: http://www.fornax.cz

[7] Jirásek, J., Vavro, M.: Nerostné suroviny a jejich využití. Ostrava: Ministerstvo školství, mládeže a tělovýchovy ČR & Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, 2008. ISBN 978-80-248-1378-3

[8] Jap.cz [online]. 22.2.2011 [cit. 2011-12-10]. Jap trading s.r.o. Dostupné z WWW: http://www.jap.cz

[9] Rajmont.cz [online]. 22.9.2011 [cit. 2011-12-10]. Rajmont. Dostupné z WWW: http://www.rajmont.cz/

[10] Electroheat-technologies.com [online]. 9.11.2011 [cit. 2011-12-10]. ElectroHeat Technologies. Dostupné z WWW: http://www.electroheat-technologies.com/

[11] Slovník cizích slov. [online]. [cit. 2012-05-19]. Dostupné z: http://www.slovnik-cizich-slov.cz/compensatio.html

[12] BLAŽEK, Vladimír a Petr SKALA. Distribuce elektrické energie [online]. VUT Brno [cit. 2012-05-19]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/

[13] HRADÍLEK, Zdeněk. Elektroenergetika distribučních a průmyslových zařízení. Ostrava: Vydala VŠB-TU Ostrava ve vydavatelství Montanex, 2008, 364 s. ISBN 978-80-7225-291-6.

[14] KLEMŠ, Oldřich. SPŠE MOHELNICE. Kompenzace. SPŠE Mohlenice. Dostupné z: http://www.popihomatros.ic.cz/

[15] Egc-cb.cz [online]. 18.2.2009. 1.2.2002 [cit. 2011-12-10]. EnerGoConsult ČB s.r.o. Dostupné z WWW: http://www.egc-cb.cz/

[16] KLEMŠ, Oldřich. SPŠE MOHELNICE. Kompenzace u energetických podniků. SPŠE Mohelnice. Dostupné z: http://www.popihomatros.ic.cz/

[17] HOLOUBEK, Jiří; KORENC, Vladimír. Kompenzace jalového výkonu v praxi. Vydání 1. Praha : IN-EL, 1999. 123 s. ISBN 80-86230-07-4

[18] DHgate factory. [online]. [cit. 2012-05-20]. Dostupné z: http://factory.dhgate.com/metal-processing-machinery/

[19] ZEZ SILKO Středofrekvenční kondenzátory. In: [online]. [cit. 2012-05-20]. Dostupné z: http://www.zez-silko.cz/PDFs/furnace.pdf

[20] ZEZ SILKO Kompenzace jalové energie [online]. 1.2012[cit. 2012-05-20]. Dostupné z: http://www.zez-silko.cz/PDFs/pfcnew.pdf

[21] HOLOUBEK, Jiří a Jaroslav PAWLAS. Filtračně-kompenzační zařízení velkého výkonu. [online]. s. 4, 11.2007 [cit. 2012-05-20]. Dostupné z: http://www.odbornecasopisy.cz/res/pdf/36196.pdf

[22] ELEKTRICKÉ PECE SVOBODA. [online]. 2009 [cit. 2012-05-20]. Dostupné z: http://www.elpece.cz/5462/pece-kelimkove/