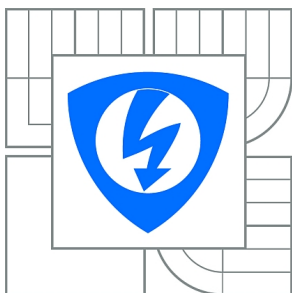


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ

ÚSTAV ELEKTROENERGETIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF ELECTRICAL POWER ENGINEERING

ENERGETICKÉ PROBLÉMY INDUKČNÍCH ELEKTROTEPELNÝCH ZAŘÍZENÍ

ENERGETIC PROBLEMS OF INDUCTION ELECTROHEAT EQUIPMENTS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

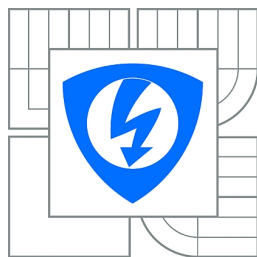
JIŘÍ MILKA

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. ILONA LÁZNIČKOVÁ, Ph.D.

BRNO 2011



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav elektroenergetiky

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor

Silnoproudá elektrotechnika a elektroenergetika

Student: Jiří Milka

ID: 115231

Ročník: 3

Akademický rok: 2010/2011

NÁZEV TÉMATU:

Energetické problémy indukčních elektrotepelných zařízení

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Princip indukčního ohřevu.
2. Indukční pece kelímkové a kanálkové.
3. Elektrické zdroje napájení indukčních pecí.
4. Symetrizační zapojení pro indukční pece.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

podle pokynů vedoucího práce

Termín zadání: 7.2.2011

Termín odevzdání: 26.5.2011

Vedoucí práce: doc. Ing. Ilona Lázníčková, Ph.D.

doc. Ing. Petr Toman, Ph.D.

Předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

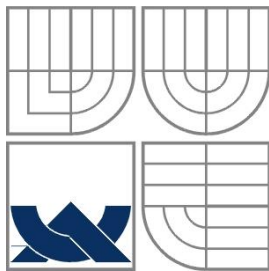
Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných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

Bibliografická citace práce:

MILKA, J. *Energetické problémy indukčních elektrotepelných zařízení*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2011. 51 s. Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Ilona Lázníčková, Ph.D.

Prohlašuji, že jsem svou bakalářskou práci vypracoval samostatně a použil jsem pouze podklady (literaturu, projekty, SW atd.) uvedené v příloženém seznamu.

.....



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ



Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií

Ústav elektroenergetiky

Bakalářská práce

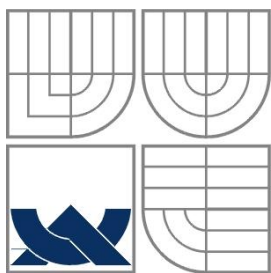
Energetické problémy indukčních elektrotepelných zařízení

Jiří Milka

vedoucí: doc. Ing. Ilona Lázníčková, Ph.D.

Ústav elektroenergetiky, FEKT VUT v Brně, 2011

Brno



BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



Faculty of Electrical Engineering and Communication
Department of Electrical Power Engineering

Bachelor's Thesis

Energetic problems of induction electroheat equipments

by

Jiří Milka

Supervisor: doc. Ing. Ilona Lázníčková, Ph.D.

Brno University of Technology, 2011

Brno

ABSTRAKT

Indukční ohřev se nejvíce používá v metalurgii pro tavení kovových materiálů. Princip indukčního ohřevu vychází z elektromagnetické indukce, jež vyvolá ve vodivém materiálu vířivé proudy ohřívající vsázku.

První část bakalářské práce se věnuje principu indukčního ohřevu. Dále jsou pak uvedeny možnosti aplikace indukčního ohřevu v elektrotepelných zařízeních. Protože je práce zaměřena na energetické problémy vyskytující se při připojení k elektrické síti, tak je v druhé části teoreticky a na příkladech vysvětlena kompenzace a symetrizace indukčních elektrotepelných zařízení.

KLÍČOVÁ SLOVA: induktor; vsázka; indukční pec; kompenzace; symetrizace

ABSTRACT

Induction heating is mostly used for melting metal materials in metallurgy. The principle of induction heating comes from electromagnetic induction which generates eddy currents heating the charge in electrically conducting material.

The first part of the bachelor thesis is devoted to the principle of induction heating. Further, there are possibilities of applying the induction heating in electro heat devices mentioned. As the paper is focused on energy problems appearing when getting connected to the grid, the second part of the paper contains explanation – both theoretical and on examples - of compensation and symmetrization of induction electro heat devices.

KEY WORDS: inductor; charge; induction furnace; compensation; symmetrization

OBSAH

SEZNAM OBRÁZKŮ.....	10
SEZNAM TABULEK	12
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	13
1 ÚVOD.....	14
2 VZNIK TEPLA V INDUKČNÍCH ZAŘÍZENÍCH	15
2.1 PRINCIP INDUKČNÍHO OHŘEVU	15
2.2 HLOUBKA PROSTUPU ELEKTROMAGNETICKÉ ENERGIE	15
2.3 ÚČINNOST INDUKČNÍHO OHŘEVU	16
3 INDUKČNÍ ELEKTROTEPELNÁ ZAŘÍZENÍ.....	17
3.1 INDUKČNÍ KELÍMKOVÉ PECE.....	17
3.1.1 HLAVNÍ KONSTRUKČNÍ ČÁSTI.....	18
3.1.2 VZDUTÍ VSÁZKY	18
3.1.3 VYZDÍVKA KELÍMKOVÝCH PECÍ	18
3.1.4 VSÁZKA	19
3.1.5 TAVENÍ.....	19
3.1.6 INDUKČNÍ KELÍMKOVÉ PECE S VODIVÝM KELÍMKEM	20
3.1.7 INDUKČNÍ KELÍMKOVÁ PEC VE FIRMĚ ŠMERAL BRNO.....	20
3.2 INDUKČNÍ KANÁLKOVÉ PECE	27
3.2.1 PECE S ODKRYTÝM KANÁLKEM	27
3.2.2 PECE SE ZAKRYTÝM KANÁLKEM	27
3.2.3 USKŘIPOVACÍ JEV (PINCH EFEKT).....	29
3.2.4 KONSTRUKČNÍ ČÁSTI	29
3.3 POVRCHOVÝ OHŘEV	29
3.3.1 INDUKČNÍ KALENÍ.....	29
3.3.2 INDUKČNÍ SVAŘOVÁNÍ.....	30
3.3.3 INDUKČNÍ PÁJENÍ	30
3.3.4 INDUKČNÍ OHŘEV ÚSTŘÍŽKŮ, PŘÍŘEZŮ	31
3.3.5 INDUKČNÍ OHŘEV KONCŮ TYČÍ.....	32
4 ELEKTRICKÉ ZDROJE INDUKČNÍCH ZAŘÍZENÍ.....	33
4.1 NAPÁJENÍ SÍŤOVOU FREKVENCÍ.....	33
4.2 NAPÁJENÍ STŘEDOFREKVENČNÍMI ZDROJI	33
4.2.1 ROTAČNÍ STŘEDOFREKVENČNÍ GENERÁTORY	34
4.2.2 IONTOVÉ MĚNIČE KMITOČTU	35
4.2.3 MAGNETICKÉ NÁSOBIČE KMITOČTU.....	36
4.2.4 TYRISTOROVÉ MĚNIČE KMITOČTU	36
4.3 NAPÁJENÍ VYSOKOFREKVENČNÍMI ZDROJI.....	37
5 ENERGETICKÉ PROBLÉMY INDUKČNÍCH ZAŘÍZENÍ.....	38
5.1 KOMPENZACE JALOVÉHO VÝKONU	38
5.1.1 ÚČINÍK	38
5.1.2 DŮSLEDKY ŠPATNÉHO ÚČINÍKU.....	38

5.1.3 NÁVRH KOMPENZACE	39
5.1.4 ZPŮSOB KOMPENZACE	40
5.1.5 REGULACE KOMPENZAČNÍ BATERIE	41
5.2 SYMETRIZAČNÍ ZAPOJENÍ PRO INDUKČNÍ PECE.....	42
5.2.1 NESYMETRICKÉ ZATÍŽENÍ SÍTĚ	42
5.2.2 PŘIPOJENÍ INDUKČNÍCH PECÍ K ELEKTRICKÉ SÍTI	42
6 PŘÍKLADY ŘEŠENÍ PROBLÉMU.....	47
6.1 VÝPOČET KOMPENZACE	47
6.2 VÝPOČET SYMETRIZAČNÍHO ZAŘÍZENÍ ZAPOJENÉHO DO HVĚZDY	48
6.3 VÝPOČET SYMETRIZAČNÍHO ZAŘÍZENÍ ZAPOJENÉHO DO TROJÚHELNÍKA.....	49
7 ZÁVĚR.....	50
POUŽITÁ LITERATURA	51

SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obr. 2.1 Princip indukčního ohřevu.....</i>	<i>15</i>
<i>Obr. 3.1 Kelímková pec.....</i>	<i>17</i>
<i>Obr. 3.2 Kelímková pec se železným jádrem.....</i>	<i>20</i>
<i>Obr. 3.3 Ovládací panel.....</i>	<i>22</i>
<i>Obr. 3.4 Část tyristorového měniče.....</i>	<i>22</i>
<i>Obr. 3.5 Indukční kelímková pec při odlévání</i>	<i>23</i>
<i>Obr. 3.6 Čerpadla na chladicí vodu.....</i>	<i>23</i>
<i>Obr. 3.7 Vyzdívka pece po skončení životnosti</i>	<i>24</i>
<i>Obr. 3.8 Částečné vybourání vyzdívky</i>	<i>24</i>
<i>Obr. 3.9 Kelímek připraven k vyzdívání.....</i>	<i>25</i>
<i>Obr. 3.10 Vyzděné dno kelímku a vsazena šablona</i>	<i>25</i>
<i>Obr. 3.11 Kompletně dozděný kelímek.....</i>	<i>26</i>
<i>Obr. 3.12 Vložené vibrační zařízení.....</i>	<i>26</i>
<i>Obr. 3.13 Kjellinova indukční pec.....</i>	<i>27</i>
<i>Obr. 3.14 Indukční kanálková pec.....</i>	<i>28</i>
<i>Obr. 3.15 Bubnová kanálková pec</i>	<i>28</i>
<i>Obr. 3.16 Indukční kalení.....</i>	<i>30</i>
<i>Obr. 3.17 Indukční svařování.....</i>	<i>30</i>
<i>Obr. 3.18 Indukční pájení.....</i>	<i>31</i>
<i>Obr. 3.19 Indukční ohřev úlomků a ústřížků</i>	<i>31</i>
<i>Obr. 3.20 Ohřev konců tyčí</i>	<i>32</i>
<i>Obr. 4.1 Zapojení indukční pece na síť</i>	<i>33</i>
<i>Obr. 4.2 Rotační generátor</i>	<i>34</i>
<i>Obr. 4.3 Iontový měnič.....</i>	<i>35</i>
<i>Obr. 4.4 Pulsující usměrněné napětí</i>	<i>35</i>
<i>Obr. 4.5 Magnetický měnič</i>	<i>36</i>
<i>Obr. 4.6 Tyristorový měnič kmitočtu.....</i>	<i>37</i>
<i>Obr. 4.7 Vysokofrekvenční zdroj</i>	<i>37</i>
<i>Obr 5.1 Diagram účinníku před kompenzací</i>	<i>40</i>
<i>Obr. 5.2 Připojení jednofázové pece k síti</i>	<i>42</i>
<i>Obr. 5.3 Kompenzace jalového výkonu</i>	<i>42</i>
<i>Obr. 5.4 Zapojení do trojúhelníka.....</i>	<i>44</i>

<i>Obr. 5.5 Fázorovém diagram při zapojení do trojúhelníka</i>	<i>44</i>
<i>Obr. 5.6 Zapojení do hvězdy</i>	<i>45</i>
<i>Obr. 5.7 Fázorový diagram při zapojení do hvězdy.....</i>	<i>45</i>
<i>Obr. 5.8 Scottovo zapojení</i>	<i>46</i>
<i>Obr. 5.9 Symetrizační zapojení dvoufázové sítě.....</i>	<i>46</i>

SEZNAM TABULEK

<i>Tab. 1 Vliv frekvence na hloubku vniku δ</i>	16
<i>Tab. 2 Vliv teploty na účinnost indukčního ohřevu</i>	16
<i>Tab. 3 Závislost účinnosti na poměru d/δ</i>	16

SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

Veličina	Symbol	Jednotka
hloubka vniku	δ	m
permeabilita	μ	$\text{H}\cdot\text{m}^{-1}$
hustota	ρ	$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$
konduktivita	σ	$\text{S}\cdot\text{m}^{-1}$
frekvence	f	Hz
vzdutí vsázky	h	m
účinník	$\cos \varphi$	-
kapacita	C	F
proud	I	A
indukčnost (vlastní, vzájemná)	L, M	H
počet závitů	N	-
příkon	P_1	W
činný výkon	P_2	W
činitel jakosti	Q	-
jalový výkon	Q_2	VAr
rezistence	R	Ω
napětí	U	V

1 ÚVOD

Cílem práce je porozumění a následný popis energetických problémů indukčních elektrotepelných zařízení, které nastanou po připojení k elektrické síti.

Práce je koncipována do dvou hlavních částí. Vzhledem k tomu, že práce pojednává o indukčních elektrotepelných zařízeních, je první část věnována principu indukčního ohřevu a aplikaci v jednotlivých zařízeních. Druhá část se věnuje energetickým problémům, jež jsou kompenzace jalového výkonu a symetrizační zařízení pro připojení nesymetrické zátěže k trojfázové síti.

V druhé kapitole je rozebrán princip indukčního ohřevu, vliv frekvence na rozložení vyvíjeného tepla v ohřívaném materiálu a účinnost indukčního ohřevu. Další kapitola je věnována popisu jednotlivých elektrotepelných zařízení. Ve čtvrté kapitole jsou rozebrány jednotlivé druhy elektrických zdrojů, které napájejí indukční zařízení.

Pátá kapitola se zabývá kompenzací, výpočtem účinníku, návrhem paralelní kompenzace, která je nejpoužívanější u všech zařízení, jež potřebují ke svému provozu jalový výkon. Dále je zde pojednáváno o připojení indukčních pecí k síti.

V poslední kapitole je provedena praktická ukázka možného výpočtu kompenzace elektrické indukční pece. V dalším příkladu je ukázán výpočet symetrizačního jednofázového zařízení.

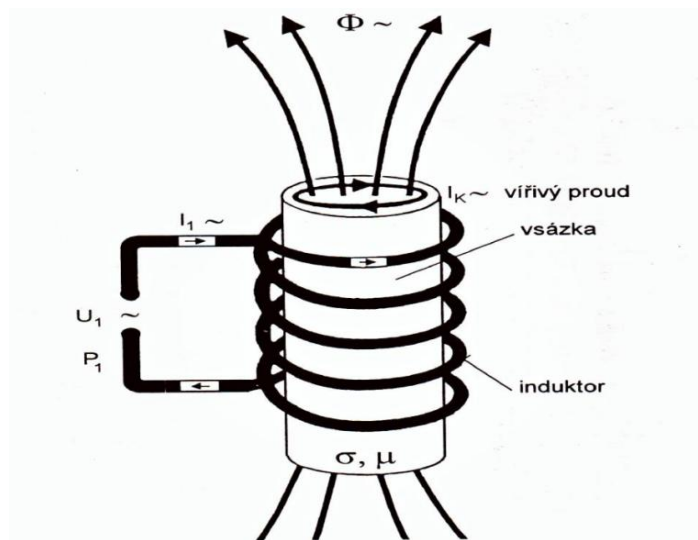
I když indukční ohřev je už dlouho známý, největší rozvoj nastal až s objevem polovodičových součástek, jež umožnily vývoj frekvenčních měničů. Ty se vyskytují ve zdrojích napájející tato zařízení.

2 VZNIK TEPLA V INDUKČNÍCH ZAŘÍZENÍCH

Indukční ohřev je elektrický ohřev, který důsledkem elektromagnetické indukce vyvolá ve vodivém materiálu vířivé proudy ohřívající vsázku.

2.1 Princip indukčního ohřevu

Indukční zařízení, které je znázorněno na Obr. 2.1 [1], se skládá z cívky (induktoru), zdroje střídavého proudu a z ohřívaného předmětu (vsázky). Prochází-li střídavý proud rovinným induktorem, potom vzniká v jeho okolí rovinné elektromagnetické vlnění. Průchodem proudu válcovou cívkou vznikne uvnitř válcové elektromagnetické vlnění. V předmětu, který se nachází uvnitř induktoru, se indukuje napětí, jež má za následek vznik vířivých proudů. Tyto proudy se ve vodivém předmětu uzavírají a vzniklý ztrátový výkon ohřívá vsázku. Indukční zařízení si lze představit jako transformátor, kde cívka je primární stranou a vsázka sekundární [1].



Obr. 2.1 Princip indukčního ohřevu

Induktor je koncová část zdroje, jímž protéká střídavý proud generovaný měničem kmitočtu a v jeho okolí se vytváří elektromagnetické pole. Induktor bývá vyroben z dutého měděného vodiče, jímž protéká chladicí kapalina. Pro dosažení co největší účinnosti ohřevu je potřeba, aby induktor byl co nejbližší ohřívanému tělesu. Proto podle tvaru ohřívaného materiálu se používají různé induktory.

Účinnost indukčního ohřevu závisí na vhodném impedančním přizpůsobení induktoru a na zvoleném tvaru. Nachází-li se induktor blízko roztavené vsázce, potom hrozí jeho přehřátí.

2.2 Hloubka prostupu elektromagnetické energie

Hloubka vniku δ je vzdálenost od povrchu materiálu, kam prostoupí elektromagnetická energie a přemění se v teplo. Vhodnou volbou frekvence napájecího proudu, jež se hojně využívá v praxi, můžeme ovlivnit rozdělení tepla vyvíjeného ve vsázce a hloubku vniku δ záření vypočítanou dle vztahu [1]

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega \cdot \mu \cdot \sigma}}, \quad (1)$$

kde $\omega = 2\pi f$, f je frekvence, μ je permeabilita a σ je konduktivita.

Zvolením velkého kmitočtu dojde k ohřevu tenké vrstvy na povrchu tělesa, naopak použitím malé frekvence dojde k prohřátí celé vsázky. U oceli se volí hloubka vniku pro prohřátí, tedy magnetický materiál. Nevhodně zvoleným kmitočtem může dojít k přehřívání povrchu vsázky. K maximálně efektivnímu prohřátí materiálu v co nejkratším čase je vhodné, aby průměr byl přibližně 3,5 krát větší než δ .

V Tab. 1 [1] jsou uvedeny hodnoty hloubky vniku závislé na použité frekvenci od 50 Hz do 1 MHz pro ocel, hliník a měď. Z tabulky je patrné, že při změně materiálu hloubka vniku také mění. V pásmu hloubky prohřátí se přemění 86 % celkové energie a v další části vsázky zbývajících 14 %.

Tab. 1 Vliv frekvence na hloubku vniku δ

f [Hz]			50	1 000	10 000	1 000 000
δ [mm]	Měď	20°C	9,5	2,1	0,67	0,067
		1100°C	31,8	7,1	2,25	0,22
	Hliník	20°C	12,2	2,7	0,86	0,086
		660°C	31,5	7,0	2,2	0,22
	Ocel	20°C	8,0	1,8	0,56	0,056
		800°C	71,2	15,9	5,0	0,5

2.3 Účinnost indukčního ohřevu

Účinnost je závislá na tvaru induktoru, který by měl co nejvíce kopírovat tvar vsázky, materiálu a teplotě ohřívajícího tělesa. Elektrická účinnost je závislá na poměru tloušťky vsázky d ku hloubce vniku δ . V Tab. 2 [1] je uvedena elektrická účinnost indukčního ohřevu závislá na teplotě ϑ ohřívajícího materiálu. V Tab. 3 [5] je vyjádřen vliv poměru d/δ na účinnost indukčního ohřevu.

Tab. 2 Vliv teploty na účinnost indukčního ohřevu

	Ocel		Hliník		Měď	
ϑ [°C]	20	800	20	660	20	1 100
$\eta_{\text{el max.}}$ [%]	93	88	56	77	50	77

Tab. 3 Závislost účinnosti na poměru d/δ

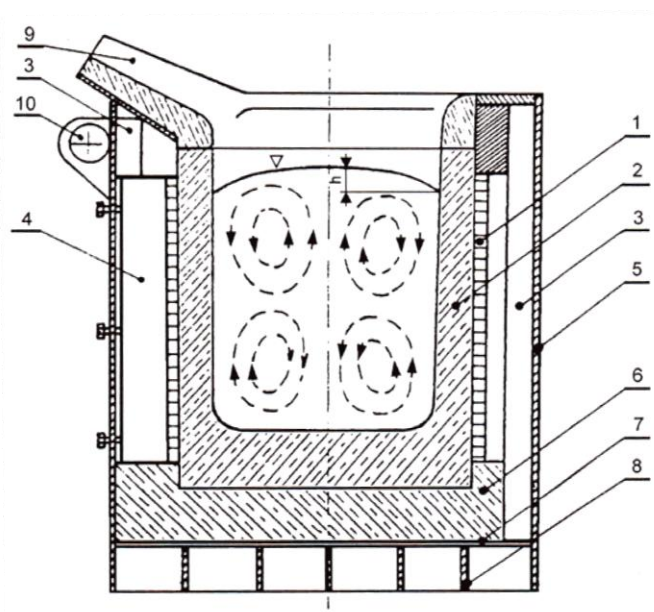
d/δ	8	6	4	2	1	0,6	0,4
η [%]	95	85	65	30	10	4	1

3 INDUKČNÍ ELEKTROTEPELNÁ ZAŘÍZENÍ

Indukční ohřev bývá zpravidla aplikován ve více typech elektrotepelných zařízení. Nejčastěji je použit pro tavení vsázky v indukčních pecích. Dále jej lze s výhodou využít ke kalení, svařování nebo prohřívání materiálu. Indukční pece jsou zařízení, které mají vyhřívaný prostor vyzděný výduskou pro omezení tepelných ztrát z nístěje. Indukční ohříváče na rozdíl od pecí nemají pracovní komoru.

3.1 Indukční kelímkové pece

Kelímkové pece se používají pro tavení nejrůznějších kovů, výrobu vysoce kvalitních ocelí a také na přehřívání předem roztavených kovů. Konstrukce kelímkové pece je zobrazena na Obr. 3.1 [1].



Obr. 3.1 Kelímková pec

Kruhová ohřívací cívka 1 je nejčastěji vinuta dutým měděným vodičem čtyřhranného průřezu, kterým protéká chladicí kapalina. Uvnitř induktoru se nachází keramický kelímek 2 z křemičitého písku. Jako stínění pece se používají svazky transformátorových plechů 3, které jsou umístěny po obvodu vnitřní části pláště pece 5. Tyto svazky svádějí magnetický tok, aby neovlivňoval konstrukční části pece. Ve středních azbestocementových trámčích 4 je umístěna cívka. Dno pece 6 je tvořeno cihlovou keramickou vyzdívkou. Pod ním je umístěn stínící měděný plech 7, zabraňující pronikání magnetického toku do mřížového dna pece 8. Pro odlévání se používá hubice pece 9. Pro vyklápění, či odpich je na peci umístěna osa 10.

Pec s hmotností vsázky 2 až 3 tuny oceli napájí zdroj o frekvenci 600 až 1 000 Hz.

Mezery mezi závity cívky se vyplní izolačními vložkami o takové tloušťce, aby namáhání izolace bylo přibližně 15 V na 1 mm. Rychlost chladicí kapaliny procházející dutinou cívky se volí 1,5 až 2 ms⁻¹. Maximální teplota chladicí vody má být 60 °C, přičemž musí odvést elektrické ztráty až 25 % z příkonu a teplo, které prochází stěnou kelímku o teplotě až 1650 °C.

3.1.1 Hlavní konstrukční části

Plášť pece – je vyroben z ocelového plechu válcového tvaru. Plášť je velmi důležitý k eliminaci magnetického pole, které vzniká vně induktoru. Nejčastěji se ještě mezi plášť a cívku umísťují transformátorové plechy, jež působí jako stínící člen.

Induktor – obepíná celý kelímek. Je tvořen měděnou trubicí čtvercového nebo kruhového průřezu.

Víko pece – jsou jím osazovány pece od hmotnosti nad 3 tuny. Otáčení se zajišťuje buď ručně, nebo pomocí hydrauliky. Víko je vyrobeno z ocelového plechu a vyzdženo žáruvzdornou hmotou [4].

3.1.2 Vzduť vsázky

V důsledku indukování vířivého proudu a rozložení elektromagnetického pole vznikají ve vsázce elektrodynamické síly, které mají radiální a axiální složku. Tyto síly nejsou rovnoměrně uspořádány po šířce a délce vsázky. Díky tomu dochází k cirkulaci taveniny, což způsobí, že uprostřed kelímku dochází ke vzduť vlivem přetlaku a u stěn vtéká do podtlaku. Rychlost cirkulace a velikost vzduť je závislá na geometrických a elektrických parametrech pece. Optimální víření má velmi dobrý vliv na homogenitu taveniny co do složení tak i do teploty. Rychlost cirkulace se v průřezu mění. Osa víru taveniny se nachází asi ve 2/3 poloměru vsázky, kde je rychlost víření nulová. Rychlost taveniny v ose je přibližně stejná jako v blízkosti stěny [3]. Vzduť h se dá vyjádřit vztahem [1]

$$h = K \frac{P_1}{\rho} \sqrt{\frac{\mu_r \sigma}{f}}, \quad (2)$$

kde je P_1 příkon na jednotku plochu vsázky, K konstanta, ρ je hustota, μ_r permeabilita vsázky, σ konduktivita.

3.1.3 Vyzdívka kelímkových pecí

Ke zhotovení nevodivé vyzdívky se používá Silikamix, což je suchá dusací hmota (výduska) s obsahem kyseliny borité H_3BO_3 0,8 - 1,4 %. Jedna výduska vydrží 30 taveb. Vyrábějí se výdusky na bázi korundu, které vydrží i 100 taveb. Dusací hmota by při vyzdívání pece neměla být vlhká, jinak hrozí zničení pece.

Induktor je zalitý žárobetonem, na který se dávají neferitové desky. Nejdříve se dno kelímku vysype výduskou až k prvnímu závitě a poté se vloží do kelímku šablona. Dále se volný prostor mezi šablonou a pecí vysype dusací hmotou. Ta se 10 hodin sintruje. Pokud pec není dostatečně vysušená, tak nenaskočí. Dále se už může začít s tavbou oceli s obsahem uhlíku. Po ukončení první tavby tavič nechá přibližně hodinu taveninu v kelímku, aby došlo k řádnému spečení výdusky, než dojde k odpichu. Poté už se může tavit šedá tvárná litina. Po prvních třech tavbách lze tavit i vysokolegované oceli.

Opravy vyzdívky kelímku jsou závislé na stavu výdusky po ukončení tavby. Dále se sleduje, zda stěny nejsou zeslabeny na více jak polovinu vydusané vrstvy. Při větším opotřebení prudce roste teplota chladicí vody. Po skončení kampaně výdusky je nutné kelímek vybourat.

Spotřeba dusací hmoty na výrobu nové výdusky je 900 kg a na opravu 450 kg. Nynější cena Siliky je přibližně 7 900 Kč za tunu.

3.1.4 Vsázka

Materiál pro vsázení do indukční pece musí být mnohem kvalitnější, tzn. obsah fluoru, síry, chromu a uhlíku musí být menší, než co se dává do obloukových pecí. Materiál určený ke vsázení se skládá ze 70 % vratného materiálu (nálitky, vlastní zmetky, zbytky z předchozích taveb) a 30% šrotu s nízkým obsahem uhlíku.

Vsázka nesmí obsahovat materiál neznámého složení, který může do tavby vnést nečistoty. Překročí-li nějaký prvek v tavbě mezní hodnotu, poté je-li to možné, se provede změna značky tavené oceli. Nelze – li to provést, vsázka se nařadí šrotem.

3.1.5 Tavení

Doba od připojení pece k elektrické síti až po odebrání vzorku z tavby na zjištění chemického složení se nazývá údobím tavení. Během tavení je důležité sledovat proces tavení vsázeného materiálu a hodnoty elektrických parametrů pece. V případě vzepření vsázky v kelímku musí tavič srazit sochorem materiál, aby nedošlo k přehřátí již roztaveného materiálu, který je pod vzpříčeným kusem. Dále je zakázáno sochor opírat o stěnu kelímku. Podle tavení a poklesu vsázky v peci se přidává další. Do roztaveného materiálu se nesmí přidávat chladné, či vlhké kusy [4].

Po roztavení vsazeného kovu je vhodné do kelímku přidat struskotvorné látky. Je - li kelímek pece vyzděn křemičitou vyzdívkou, pak se přidává křemenný písek nebo drcené sklo. U zásaditých a neutrálních vyzdívek se jako struskotvorná látka používá vápno. Struska je v tomto případě důležitá v zamezení oxidace kovu a tepelným ztrátám. Dále tavič kontroluje teplotu vsázky a odebere vzorek. Ten po označení pošle do chemické laboratoře.

Indukční kelímková pec s vodivým stínícím pláštěm

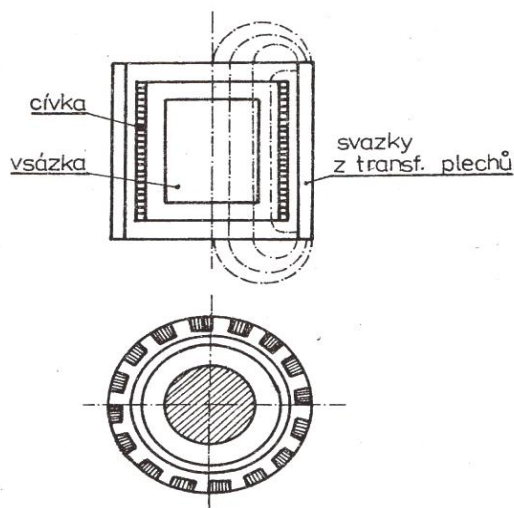
Abychom zmenšili magnetický tok procházející vně cívky na minimum, použijeme vodivý plášť umístěný souose s induktorem. Tím zmenšíme nežádoucí ztráty.

Ztráty v plášti jsou malé, je-li tloušťka pláště $s = \frac{\pi}{2} \cdot \delta$. V praxi se z mechanického namáhání volí plášť silnější.

Indukční pec s vnějším jádrem z železných plechů

Opatříme- li pec stínícím pláštěm z většího počtu transformátorových plechů umístěných na vnitřní straně pecního pláště, zmenší se magnetický odpor a tím vzroste magnetický tok cívkou. Vzroste vlastní indukčnost L_2 a vzájemná indukčnost M_{12} . Schematicky si lze tuto pec představit na Obr. 3.2 [3].

Výhody pece s jádrem oproti peci s pláštěm jsou v menším počtu závitů cívky a menší kondenzátorovou baterií. Dále vyšší užitný výkon při menších ztrátách. Účinnost pece se o 5% zvedla oproti peci s pláštěm, avšak výrobně je dražší a při poškození kelímku může dojít k úplnému zničení pece



Obr. 3.2 Kelímková pec se železným jádrem

3.1.6 Indukční kelímkové pece s vodivým kelímkem

Pece s vodivým kelímkem mají oproti nevodivému kelímku výhodu ve větší účinnosti při tavení dobře vodivých materiálů, jako jsou měď, hliník a jejich slitiny. Kelímek vyrobený z ocelolitiny se používá pro tavení hliníku při nižších teplotách. Pro vyšší teploty se zhotovují grafitové kelímky ze směsi šamotu a grafitu. Se zvětšující procentní účastí grafitu ve směsi roste vodivost kelímků. Vysoká vodivost ovšem není žádoucí.

Pro zmenšení ztrátového tepelného toku mezi kelímkem a vodou chlazenou cívkou se vkládá keramická izolační vrstva.

Elektromagnetické vlnění, které je vyzářené induktorem vlivem průchodu střídavého elektrického proudu, vstupuje do stěny kelímků, kde jeho větší část se změní na teplo a zbytek projde stěnou a zahřívá přímo vsázku.

Rozhodující je vzájemný poměr mezi tlouškou stěny a hloubkou vniku δ . Je-li tlouška stěny proti hloubce vniku velká, potom se všechna elektromagnetická energie přemění ve stěně kelímků [1].

3.1.7 Indukční kelímková pec ve firmě Šmeral Brno

Pro lepší pochopení problematiky indukčních zařízení autor bakalářské práce navštívil provoz slévárny ve firmě Šmeral Brno, a.s., kde měl možnost shlédnout indukční kelímkové pece.

Historie

Historie společnosti Šmeral sahá do května roku 1861, kdy Ignác Storek založil slévárnu s kuplovnou v dnešním areálu firmy. Hlavními odběrateli odlitků byly textilní a strojní společnosti, dále pak státní dráhy a cukrovary. V letech 1902 až 1910 došlo k velkému rozmachu a rozsáhlé rekonstrukci firmy. Od roku 1919 se začaly vyrábět Kaplanovy turbíny. V roce 1920 se začalo s výrobou tvářecích lisů, která pokračuje dodnes a tvoří 42% všech vyrobených strojů. Firma Ignác Storek byla roku 1949 převzata organizací Spojené strojírný

a slévárny B. Šmerala, n.p. Dnes firma vyrábí stroje pro kovárny a lisovny v leteckém, automobilovém a zemědělském průmyslu.

Produkce slévárny

Provoz slévárny vyrábí nejčastěji odlitky armatur, mlecích desek, drtících plášťů a čelistí, dále pak odlitky pro tvářecí lisy.

Materiály pro odlitky jsou uhlíkaté a nízkolegované oceli, austenitické manganové oceli, žáruvzdorné oceli, korozivzdorné oceli, litina s kuličkovým grafitem.

Indukční pece

Provoz slévárna vlastní 3 indukční pece o obsahu 2,2 tuny. Napájejí se středofrekvenčním tyristorovým měničem Veritherm M. Jedná se o kelímkové pece dodané roku 1975 firmou Brown Boveri. Při každé tavbě pracuje jen jedna pec. Pokud se jedná o slévanou tavbu, tak společně pracují dvě pece. Během dne většinou probíhají 3 tavby.

Základní parametry indukčního zařízení:

- obsah vsázky.....2,2 t,
- frekvence.....750 Hz,
- vstupní napětí.....22 kV,
- transformované napětí.....775 V,
- napětí na pecích.....2100 V,
- výkon kondenzátorové baterie....16197,3 kVAr,
- výkon pece.....1125 kW.

Následující obrázky ilustrují provoz slévárny a indukční kelímkové pece.

Na Obr. 3.3 je zobrazen ovládací panel, k němuž má přístup hlavní tavič. Ten má možnost sledovat výkon, napětí a proud procházející pecí. Podle těchto parametrů dokáže poznat, zda tavba probíhá v pořádku. Nastane – li nějaký problém při tavbě, okamžitě se to promítne na snížení výkonu pece. Většinou se jedná o vzpříčení neroztavení vsázky v kelímku. Obr. 3.4 zobrazuje část tyristorového měniče, který napájí induktor kelímkové pece. Jak je z obrázku patrné, tak i měnič musí být chlazen vodou, aby nedošlo k přehřátí součástek. Při odpichu natavené vsázky se pec natočí do horizontální polohy, což je patrné z Obr. 3.5. Další důležitou součástí indukčního zařízení jsou čerpadla na chladicí kapalinu, která jsou vidět na Obr. 3.6.

Na Obr. 3.7 až Obr. 3.12 je prezentováno vybourání dusací hmoty, které skončila životnost a následné vyzdívání indukční kelímkové pece.



Obr. 3.3 Ovládací panel



Obr. 3.4 Část tyristorového měniče



Obr. 3.5 Indukční kelímková pec při odpichu



Obr. 3.6 Čerpadla na chladící vodu



Obr. 3.7 Vyzdívka pece po skončení životnosti



Obr. 3.8 Částečné vybourání vyzdívky



Obr. 3.9 Kelímek připraven k vyzdívání



Obr. 3.10 Vyzděné dno kelímku a vsazena šablona



Obr. 3.11 Kompletně dozděný kelímek



Obr. 3.12 Vložené vibrační zařízení

3.2 Indukční kanálkové pece

Kanálkové pece se používají na tavbu slitin mědi, zinku, hliníku a dále na přehřívání předem roztavené litiny, jako speciální dávkovače taveniny. Při tavení hliníku nastává zanášení kanálků, proto se kanálky provádějí s přímkovými částmi vertikálními a přímkovou částí horizontální.

Tyto pece se používají v nepřetržitém provozu, protože mají větší energetickou účinnost než pece kelímkové. Při první tavbě se do nich musí nalít tekutý kov. Nehodí se pro časté střídání vsázky.

Kanálkovou pec si můžeme představit jako transformátor s uzavřeným železným jádrem, jehož primární stranou je cívka připojena na síť a sekundární je kanálek vyplněný roztaveným kovem.

Jednou z výhod kanálkových pecí je vysoký účinek a dále napájení o síťové frekvenci. Výkon pece lze regulovat přepínáním odboček na primárním vinutí napájecího transformátoru. Provozní a pořizovací náklady těchto zařízení jsou nízké.

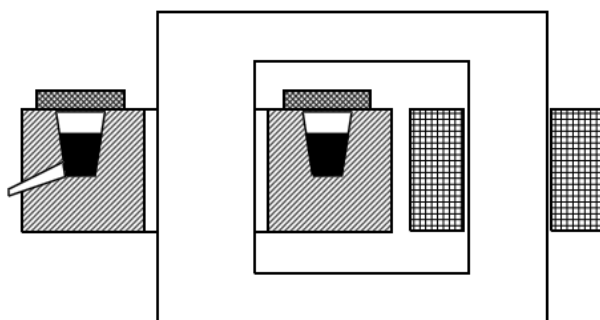
Vyzdívka kanálkových pecí je složitá a tedy velmi náchylná k poruchám. Při zamrznutí kovu v kanálku a opětovnému náběhu se vyzdívce snižuje životnost. Udrží – li se kov v tekutém stavu při sníženém výkonu, energetická účinnost pece klesá.

Obsah kanálkových pecí je v rozsahu od 300 do 300 000 kg. Pece o obsahu větším než 10 000 kg se používají udržení teploty a homogenizaci roztavených slitin.

3.2.1 Pece s odkrytým kanálkem

Pec s odkrytým kanálkem se začaly používat pro své dobré vlastnosti. Jsou vhodné pro tavbu barevných kovů, zejména mědi, niklu a hliníku. Na obrázku Obr. 3.13 [8] je zobrazeno schéma Kjellinovy indukční pece. Dosahuje se zde k lepší homogenitě lázně, protože dochází při provozu k většímu víření vsázky.

Aby se zlepšil účinek, používal se napájení těchto pecí speciální jednofázový generátor. Hladina taveniny je v kanálku šikmá, což je způsobeno elektrodynamickými silami a vede k míchání taveniny.



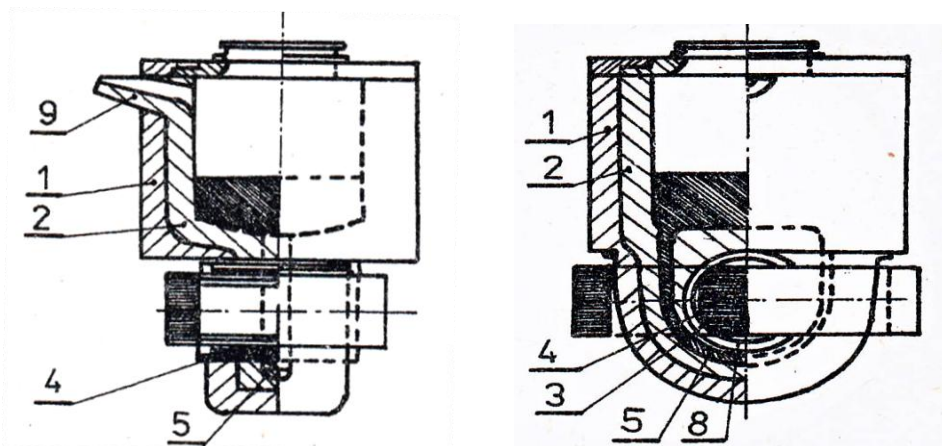
Obr. 3.13 Kjellinova indukční pec

3.2.2 Pece se zakrytým kanálkem

Pec se zakrytým kanálkem, která je zobrazena na Obr. 3.14 [8] má kanálek zapuštěný do dna. Tato zařízení jsou stavěna pro síťovou frekvenci. Jejich magnetický tok prochází železným jádrem z elektrotechnických plechů, a proto mají větší účinek. Tím je nižší

magnetizační proud v cívce a na chlazení stačí ofukování vzduchem. Elektromagnetické pole vlivem víření tekutiny odtlačuje kov od stěn kanálku ke středu. Podél stěn natéká chladnější kov a středem je ohřátý vytlačován zpět do vany. Tím je zaručena homogenita po celém objemu.

Aby se dosáhlo rovnoměrného zatížení třífázové sítě, připojují se na jednu vanu dva až tři kanálkové induktory [3].

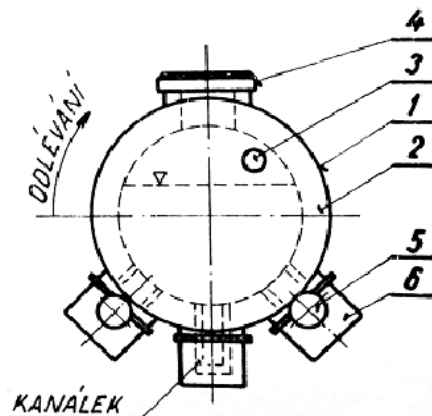


Obr. 3.14 Indukční kanálková pec

Na Obr. 3.14 je znázorněná pec s kruhovým kanálkem 5. Válcová stěna má dvouvrstvou vyzdívku. Vnitřní vrstva 2 je vyplněna z keramického materiálu, vnější vrstva 1 působí jako tepelná izolace, proto je složena z lehčeného šamotu. Transformátor 3 je v plášťovém provedení, na jehož středním sloupku je umístěná pecní cívka 4. Okolo cívky je vzduchová mezera 8 určená na chlazení vzduchem z ventilátoru. Hubice 9 slouží k odlévání vsázky. Při odlévání se nechává roztavený materiál zaplňující kanálek a dno pece pro další tavbu. Pec se potom zaplní šrotem, který se taví předeřátou vsázkou u dna pece.

Bubnové pece

Jsou to vysokoobjemové kanálkové pece na 30 tun litiny. Na Obr. 3.15 [8] je vidět indukční bubnová pec. Pec tvoří vana 1, která je vyzděna vyzdívkou 2. Lící otvor je vyznačen na obrázku číslem 3. Sázeční otvor opatřen víkem je označen číslem 4. Buben je uložen na 5, které umožní jeho otáčení do odlévací nebo servisní polohy. Pec je vybavena nejčastěji třemi induktory 6, kde každý je připojen na jednu fázi sítě. V těchto pecích se nejčastěji taví hliník a jeho slitiny.



Obr. 3.15 Bubnová kanálková pec

3.2.3 Uskřipovací jev (Pinch efekt)

Uskřipovací jev se objevuje u kanálkových pecí, kdy při zvýšení výkonu nad určitou hranici v kanálku dojde k odtržení roztaveného kovu od stěny kanálku. V zúženém místě roste proudová, objemová hustota a tlak. Vlivem vysokého tlaku dojde k přiškrcení kanálku, dokud se kanálek nezaškrtní úplně. Hodnota proudu klesne k nule a kov zalije prázdné místo.

Pinch efekt způsobuje výkonové rázy 0 až stovky kW, které mohou zapříčinit kolísání napětí v síti, zvýšení doby tavby a snížení životnosti vyzdívky pece. Aby se zabránilo tomuto jevu, jsou pece vhodně konstrukčně upraveny.

3.2.4 Konstrukční části

Plášť pece - bývá vyroben z ocelového plechu a vydusán žáruvzdornou hmotou do válcového, nebo vanového tvaru.

Víko pece - je zhotoveno z ocelového plechu a vydusáno žáruvzdornou hmotou, kde u pláště víka je azbestová izolační vrstva o tloušťce 5 až 10 mm. U velkých vík na izolační vrstvu tvárnice z hlinitých šamotů o tloušťce 200 – 300 mm. Kdežto u malých vík na izolační vrstvu navazuje dusací vrstva žárobetonu také o tloušťce 200 – 300 mm [4].

3.3 Povrchový ohřev

Indukční ohřev se nepoužívá jen k tavení vsázky v pecích, ale lze se s ním setkat i v jiných aplikacích. Nejběžnější využití indukčního ohřevu je v kalících, svařovacích a pájecích zařízeních. Dále se používá k nahřívání součástek, které se hned zpracovávají na automatizovaných linkách.

3.3.1 Indukční kalení

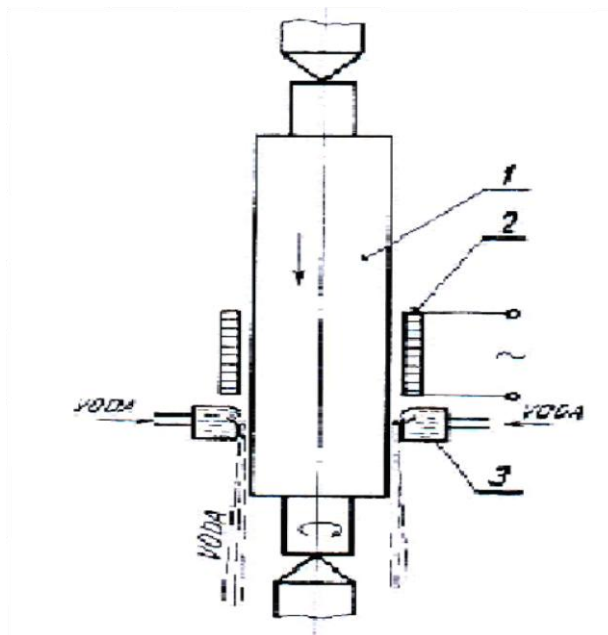
Indukční kalení se používá při výrobě ocelových válců pro válcové stolice, jehož princip je zobrazen na Obr. 3.16. Válcový materiál určený ke kalení se umístí svisle mezi hroty a otáčí se kolem své osy kvůli dodržení symetrie ohřevu. Při kalení rotující válec pomalu prochází induktorem a sprchou. Nejdříve se válec 1 protáhne několikrát induktorem 2 bez ochlazování. Po dosažení určité teploty např. 700 °C, se začne sprchovat a pomalým spouštěním válce do zařízení dochází nejprve v induktoru k dohřátí na konečnou teplotu a ve sprše 3 k prudkému ochlazení.

Kalením materiálu bez předehřevu by docházelo k velkému vnitřnímu pnutí v materiálu a ostrému přechodu z tvrdé na měkkou vrstvu. Toto by při provozu způsobilo tzv. slupkový jev, kdy tvrdá vrstva se odlupuje od jádra a dochází k znehodnocení součástí.

Dnes se frekvence napájecího proudu používá 50 kHz pro předehřev a 150 kHz pro kalení. Příkony zařízení jsou v rozmezí 300 až 1000 kW.

Výhodou povrchového kalení je nedeformování součástky vlivem tepla, a že vnitřek zůstává houževnatý. Vysoký kmitočet (stovky kHz) používáme pro malé hloubky pro kalení u větších součástí.

Technologie kalení drobných součástí využívají ohřívací rychlosti až 1000°C za sekundu. Součást se na kalící teplotu prohřeje pouze propadnutím induktorem [6].



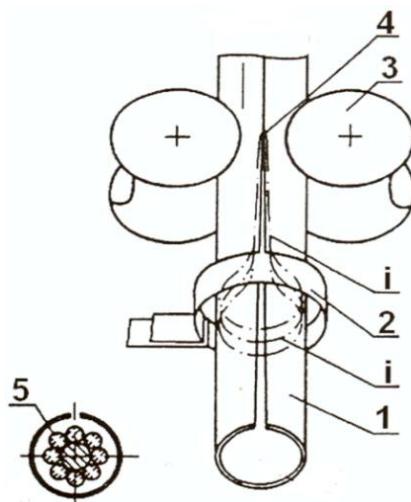
Obr. 3.16 Indukční kalení

3.3.2 Indukční svařování

V průmyslu se používá pro svařování trubek, jehož princip je zobrazen na Obr. 3.17 [1].

Průchodem rovného plechu 1 kladkovým zařízením 3 vzniká stáčením trubka 1, která má jen malou mezeru i mezi hranami pásů. Induktor 2 indukuje proudy v pásu tak, že největší teplota je právě u hran plechu. Přitlačením takto rozehrátých pásů k sobě dojde k pevnému sváru 4, který je pevnější než okolní materiál [5].

Rychlost průchodu plechu svařecím zařízením je 15–100 m/min. Zdroj napájí indukční zařízení o výkonu 50 až 700 kW a frekvenci 8–500 kHz. Maximální průměr trubky je 500 mm.

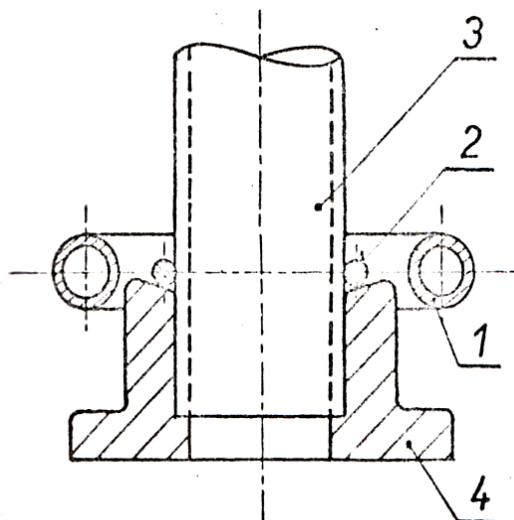


Obr. 3.17 Indukční svařování

3.3.3 Indukční pájení

Pájecí zařízení je znázorněno na Obr. 3.18 [1]. Většinou pracuje na frekvenci od 2 kHz do 2,5 MHz. Využívá speciální induktor, jenž umí pájet 3 různé tvary současně. Při pájení

naměkko lze nastavit teploty v rozsahu 150 - 450 °C s výkony od 0,5 do 5 kW. Pájení natvrdo používá teploty od 450 do 1050 °C a výkony 3 až 30 kW.

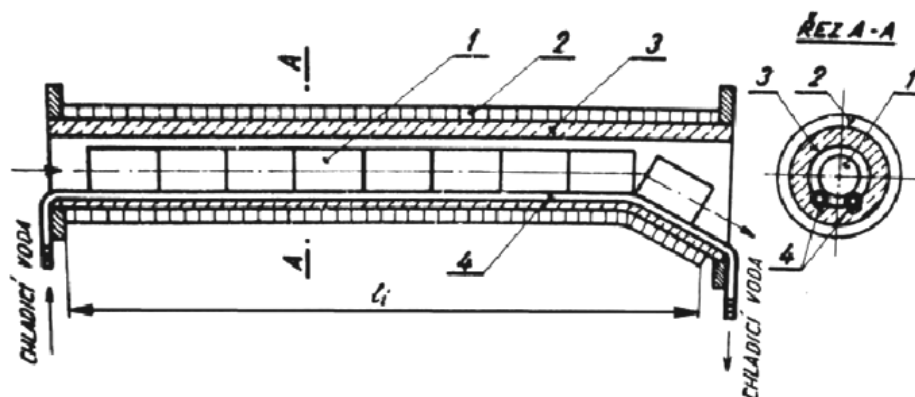


Obr. 3.18 Indukční pájení

Na obrázku je zobrazeno pájení trubky 3 do příruby 4. Trubku s přírubou tavící hmotou 2 obepíná induktor 1. Přivedením vysokofrekvenčního proudu do induktoru se současně zahřívá trubka, příruba a cín, který po roztavení vyplní volný prostor mezi oběma součástkami.

3.3.4 Indukční ohřev ústřížků, přířezů

Na Obr. 3.19 [8] je vidět ohřev ústříhů a úlomků. Konstrukce tohoto ohřevu je řešena jako plně automatizovaná linka. Vsázka 1 je uložena v zásobníku na vstupní straně linky. Určitým mechanismem jsou kusy zasouvány do induktoru 2, který je tvořen dutým měděným vodičem. Induktor je chlazen chladicí kapalinou, která jím protéká. Vsázka se posouvá po vodících trubkách 4, které jsou umístěny na keramické podložce 3. Podložka zde slouží jako tepelná a elektrická izolace. Na výstupu poté vychází kusy, jež mají kovací teplotu. Z obrázku je patrné, že konec ohříváčky má speciální tvar k dosažení rovnoměrného ohřevu součásti a snadnému vypadávání. Výhoda je v tom, že všechny kusy mají stejnou teplotu a četnost vypadávání je konstantní [5].

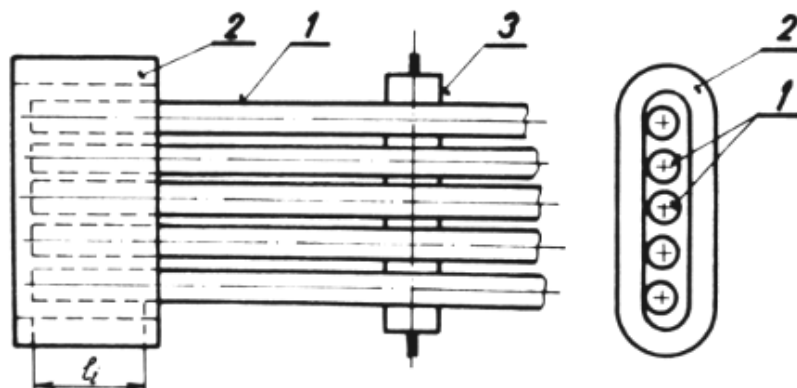


Obr. 3.19 Indukční ohřev úlomků a ústřížků

3.3.5 Indukční ohřev konců tyčí

Ohřev tyčových materiálů, který je zobrazen na Obr. 3.20 [8] se velmi často používá v automobilovém průmyslu. Zde je využit pro předehřev před nakováním na příruby. Je - li potřeba ohřát více tyčí, používá se oválný induktor. V menších provozech se využívá kruhová cívka určená pro jednu tyč.

Nejdříve se umístí chladné tyče 1 do induktoru 2 přes podpěrné kladky 3. Po ohřátí se vymění za další. Tyto systémy jsou dnes již zrobotizovány.



Obr. 3.20 Ohřev konců tyčí

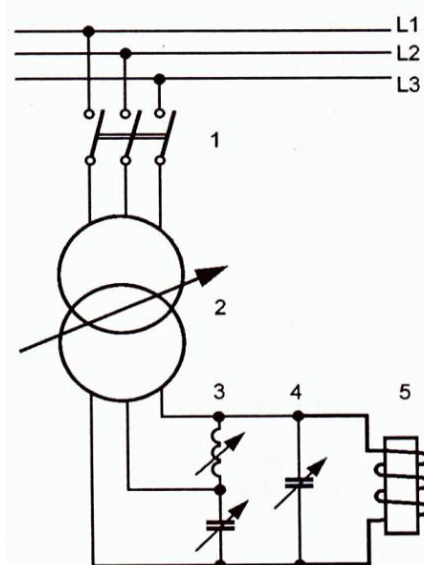
4 ELEKTRICKÉ ZDROJE INDUKČNÍCH ZAŘÍZENÍ

Indukční elektrotepelná zařízení pracují v širokém spektru kmitočtů, proto napájecí zdroje dělíme do třech skupin. Do první patří zdroje se sítovou frekvencí, další jsou středofrekvenční zdroje a do poslední se řadí vysokofrekvenční zdroje.

Indukční kelímkové pece se nejčastěji navrhují pro práci s frekvencemi od 500 do 1000 Hz, proto se napájejí středofrekvenčními zdroji.

4.1 Napájení sítovou frekvencí

Na sítový kmitočet se přímo připojují některé kelímkové pece, indukční ohřívačky pro ohřev válcových těles z oceli o průměru 160 – 500 mm. Indukční zařízení představují jednofázovou zátěž, která nesymetricky zatěžuje trojfázovou síť. Jelikož odebírají značné výkony, je potřeba připojit přes symetrizační zařízení. Takto zapojená pec se chová jako symetrická zátěž. Princip připojení indukčních zařízení je na Obr. 4.1 [3].



Obr. 4.1 Zapojení indukční pece na síť

Výkonovým vypínačem 1 připojujeme regulační transformátor 2 k elektrickému rozvodu. Pomocí symetrizačního obvodu 3 se převede jednofázová na třífázovou symetrickou zátěž. Paralelně k tomu je připojena kondenzátorová baterie 4 pro kompenzaci jalového výkonu odebíraného induktorem 5.

4.2 Napájení středofrekvenčními zdroji

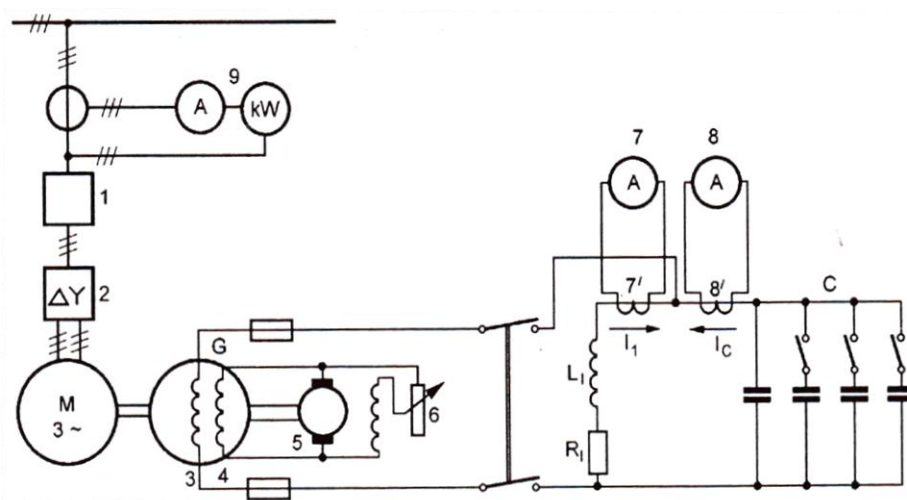
Středofrekvenční zdroje se většinou používaly pro napájení průmyslových pecí. Nejdříve se pro napájení využívaly rotační generátory. Byly to ovšem velké stroje, vyžadující velké prostory k umístění. Měly plno nevýhod, proto se přemýšlelo o způsobech nahrazení za jiné, stejně účinné zdroje. Iontové měniče je měly nahradit. Časem se ukázalo, že to nebyl šťastný nápad, proto se rotační generátory využívaly až do příchodu polovodičových součástek. S nimi bylo možno sestavit malý a účinný frekvenční měnič, který napájel indukční zařízení pracující na středních frekvencích.

4.2.1 Rotační středofrekvenční generátory

Rotační měniče napájejí elektrotepelná zařízení s frekvencí 500 až 10 000 Hz. Stator obsahuje dva druhy drážek. V pracovním vinutí, které je uloženo v menších drážkách, vznikají proudy o větších frekvencích. Vodiče jsou spleteny z měděných drátů se smaltovou izolací. Do větších drážek je vloženo budicí vinutí, jež napájíme stejnosměrným proudem. Může být dvoupólové, čtyřpólové nebo šestipólové. Rotor je vyroben z ocelolitiny a má na povrchu věnec s drážkami, zhotovený z tenkých plechů. Takovýto generátor se označuje jako heteropolární. To znamená, že při pohledu proti ose generátoru je na statoru patrné prostřídání severních a jižních pólů budicího vinutí. Budit se musí stejnosměrným proudem. V minulosti se používal rotační budič připojen ke společné hřídeli generátoru a motoru. Nyní se využívá moderních usměrňovačů, připojených přímo k síti [3].

Elektrická účinnost generátorů klesala, protože ztráty v mědi a železe rostou s frekvencí. Při požadovaném kmitočtu 500 Hz je účinnost kolem 90 %, kdežto při 10 kHz je jen 70 %. Používaly se do doby, než je nahradily elektronkové generátory.

K pohonu rotačních generátorů slouží asynchronní elektromotory s kotvou kroužkovou nebo kotvou nakrátko, napájené z třífázové sítě. Dříve se používalo samostatně stojícího generátoru, k němu připojený motor přes pružnou spojku. Toto provedení zabíralo mnoho místa, proto byla snaha o zmenšení a vytvoření tak nové konstrukce. Soustrojí mělo společný plášť pro generátor i motor s vodním chlazením. Tyto změny vedly ke snížení hluchosti a zmenšení zastavěné plochy.



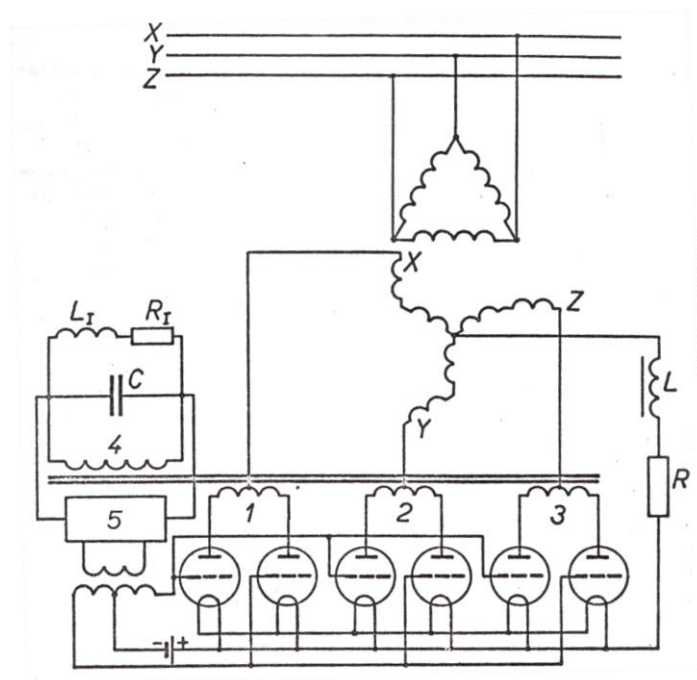
Obr. 4.2 Rotační generátor

Na Obr. 4.2 [1] je znázorněn princip napájení indukční tavicí pece rotačním měničem. Přes olejový vypínač 1 a přepínač hvězda – trojúhelník přivádíme proud z trojfázové sítě do motoru M, který je dále spojen s rotačním heteropolárním generátorem G. Generátor obsahuje pracovní vinutí 3 a budicí 4 vinutí. Rotační budič 5 s derivačním regulátorem 6 dodává budicí proud. Změnou tohoto proudu se mění napětí naindukované do pracovního obvodu, výkon, který je generátorem dodáván do pecního vyladěného obvodu zhotoveného z pecní cívky a paralelně k ní připojené kondenzátorové baterie. Ampérmetry 7 a 8 se přes měniče měří proudy v cívce a v kondenzátorové baterii. Ve vyladěném obvodu jsou tyto proudy prakticky stejné [3].

Kondenzátorová baterie, která dodává induktoru jalový výkon, je s ním spojena pásovými měděnými vodiči o délce je 10 až 20 metrů. Při vyladění obvodu je proud dodávaný kapacitou větší jako proud z generátoru. Je-li jakost oscilačního obvodu tavicí pece $Q_I = 10$ až 12, potom proud I_1 v oscilačním obvodu 10 až 12 krát větší než proud odebíraný z generátoru.

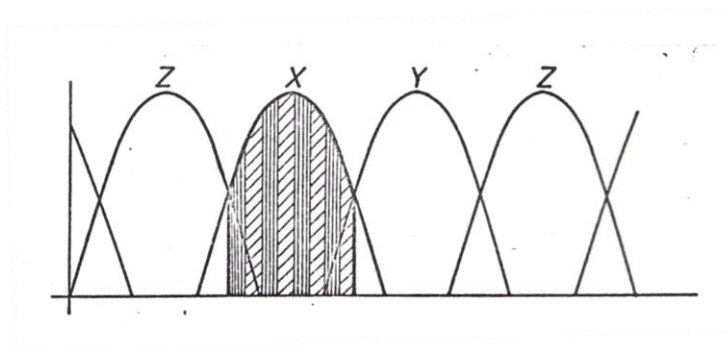
4.2.2 Iontové měniče kmitočtu

Již v 50. letech se začaly vyvíjet iontové měniče kmitočtu. Měly být náhradou za již zastaralé rotační. Hlavní výhoda iontového měniče oproti rotačnímu byla v tom, že při růstu teploty zařízení se nemusela doladovat kapacita. Jelikož zařízení nemá rotující části, jeho celková hmotnost je podstatně menší. Elektrická účinnost měniče dosahovala 92 až 95 %. Nespornou výhodou byla také bezhlučnost.



Obr. 4.3 Iontový měnič

Na Obr. 4.3 Iontový měnič [9] je znázorněn iontový měnič, který je připojen k trojfázové síti přes transformátor zapojený do trojúhelníku – lomené hvězdy. Svorky sekundární strany transformátoru označeny (X, Y, Z) jsou připojeny na středy cívek (1,2,3). Tyto cívky jsou spojeny s anodami tyratronu. Všechny cívky mají společné jádro, k němuž je přivínuto i pracovní vinutí 4. Na Obr. 4.4 [9] je zobrazen průběh usměrněného pulsujícího napětí.

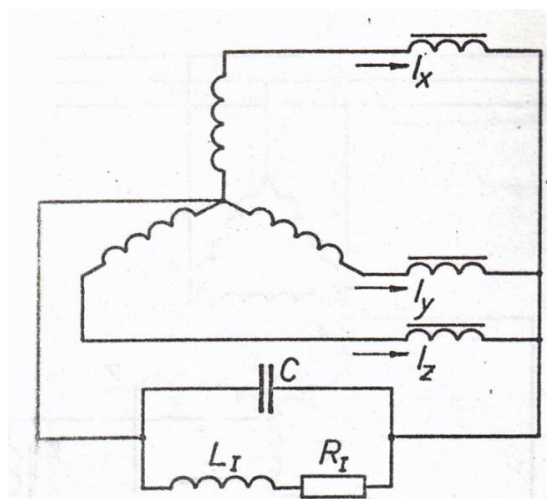


Obr. 4.4 Pulsující usměrněné napětí

Každá fáze je vždy připojena na dva triatrony, z nichž jeden, který má ovládací napětí na mřížce, propouští a druhý je vypnutý. Ovládací elektronika po čase změní polaritu na mřížkách, tudíž první přestane propouštět a druhý začne. Tento děj se stále opakuje. Na pracovním vinutí 4 je připojena pecní cívka (L_I , R_I) a k ní paralelně připojena kondenzátorová baterie C. Proudové rázy procházející od středu cívek k triatronu, který se nachází v sepnutém stavu, dochází k vyvolání magnetického toku v železném jádru. Střídavé magnetické toky naindukují v pracovním vinutí 4 napětí, které napájí pecní obvod. Tento obvod je trvale napájen zvýšenou frekvencí řízenou střídavým spouštěním triatronu v každé fázi. Pomocí zpětné vazby 5 se určuje kmitočet pro buzení triatronu [9].

4.2.3 Magnetické násobiče kmitočtu

Schéma magnetického násobiče je zobrazeno na Obr. 4.5 [6]. Z něj je patrné, že sekundární strana transformátoru je zapojena do hvězdy. Mezi každou fází transformátoru a oscilační obvod jsou vkládány tlumivky s přesyceným jádrem z transformátorových plechů. Takovéto zapojení se chová jako zdroj o trojnásobné frekvenci sítě, tedy 150 Hz. Při využití třetí harmonické lze získat výstupní frekvenci o 450 Hz. Většinou se využívalo jako doplněk k rotačním generátorům.



Obr. 4.5 Magnetický měnič

4.2.4 Tyristorové měniče kmitočtu

Princip zapojení je zobrazen na Obr. 4.6 [2]. Skládá se z usměrňovače, tlumivky a střídače.

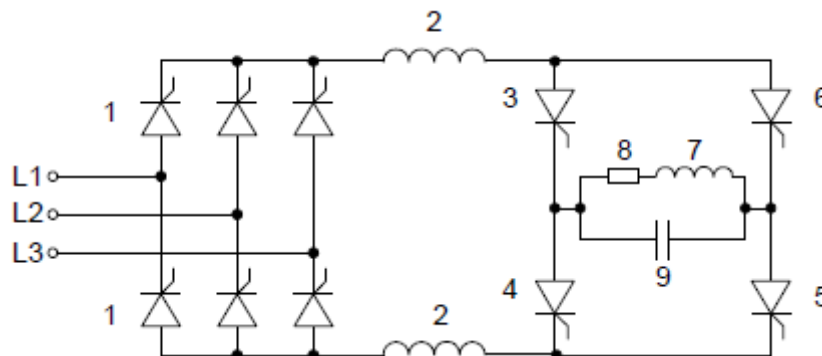
Celořízený trojfázový usměrňovač se skládá ze šesti tyristorů 1 a umožňuje i invertorový chod.

Meziobvodová tlumivka 2 zastává tři důležité funkce v obvodu. Funkce omezovací nastávají při zkratu ve střídači a omezí nárůst zkratového proudu, dokud nezasáhnou nadproudové ochrany. Funkce oddělovací nepřenáší okamžité napěťové rozdíly mezi usměrňovačem a střídačem. Funkce vyhlazovací vyhlazují mírně zvlněný stejnosměrný proud tekoucí z usměrňovače.

Tyristory 3 až 6 představují střídač, mezi které je připojen pecní obvod. Ten se skládá z ohřívací cívky 7; odporu 8, jenž představuje činnou zátěž pece; kompenzační baterie 9. Funkce střídače spočívá ve střídavém spínání dvojic tyristorů. Při sepnutí třetího a pátého

tyristoru teče proud pecním obvodem v jednom směru, kdežto sepnutím šestého a čtvrtého tyristoru je směr proudu opačný. Četnost sepnutí je řízena oscilačním pecním obvodem.

Ke startování měniče je potřeba výboj startovacího kondenzátoru přes startovací tyristor do pecního obvodu. Ten se tlumeně rozkmitá a vytvoří tak impulsy spínající tyristory ve střídači. Startovací baterie a tranzistor není v uvedeném schématu zobrazen [8].



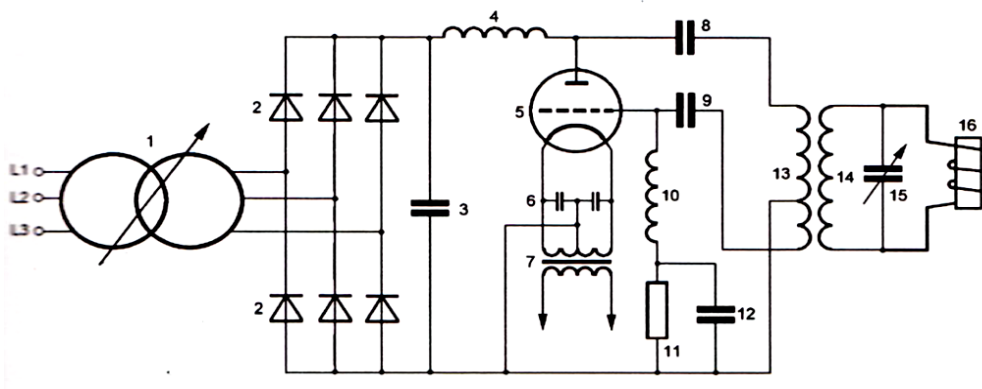
Obr. 4.6 Tyristorový měnič kmitočtu

Velkou nevýhodou těchto měničů je zpětné působení na napájecí síť. Pro potlačení se používají hradící členy a filtry na vyšší harmonické složky [7].

4.3 Napájení vysokofrekvenčními zdroji

Schéma vysokofrekvenčního elektronového generátoru je zobrazeno na Obr. 4.7 [2]. Regulační vstupní transformátor 1 je připojený k síti a napájí usměrňovací diody usměrňovače 2. K vyhlazení napětí se používá kondenzátor 3. Výkonová trioda 5 je připojena přes oddělovací tlumivku 4. Kondenzátory 6 se využívají ke zkratování vysokofrekvenčních složek proudu katod, k nimž se připojuje žhavicí transformátor 7. Oddělovací kondenzátor 8 propojuje tlumivku 4 s primárním vinutím vysokofrekvenčního transformátoru 13. Oddělovací kondenzátor 9 umožňuje průtok střídavých proudů zpětné vazby. Tlumivka 10 zabraňuje zkratování mřížkového napětí transformátorem. Na odporu 11 vzniká záporné napětí mřížky. K sekundárnímu vinutí transformátoru 14 je paralelně připojen kompenzační kondenzátor 15 pro ohřívací cívku indukčního ohřevu 16 [5].

Vinutí vysokofrekvenčního transformátoru v kombinaci s kondenzátorem a induktorem tvoří oscilační obvod, jenž pracuje na dané frekvenci. Zpětná vazba je tvořena odbočkou na primárním vinutí transformátoru a mřížkou triody.



Obr. 4.7 Vysokofrekvenční zdroj

5 ENERGETICKÉ PROBLÉMY INDUKČNÍCH ZAŘÍZENÍ

Elektrotepelné spotřebiče, jako jsou indukční tavicí pece, svařovací a ohřívací zařízení nelze vždy postavit jako třífázové symetrické spotřebiče elektrického proudu. Proto se jejich připojení do sítě řeší pomocí symetrizačních zapojení. Jelikož je symetrizace prováděna paralelní kombinací kondenzátorů a tlumivek, výsledný činný výkon je roven činnému výkonu před symetrizací.

Indukční zařízení potřebují ke svému provozu nejen činnou, ale i jalovou energii, proto musí provozovatel tohoto zařízení zajistit kompenzaci jalového výkonu. Nebude – li kompenzace správně provedena, může odběratel dostat vysokou pokutu.

5.1 Kompenzace jalového výkonu

Elektrotepelná zařízení pracující v průmyslových sítích mívají induktivní charakter. Při tavně se účinnost pece liší od požadovaného. Požadovaný účinnost se nachází v mezích 0,95 a 1,00. To pro provozovatele znamená, že zařízení musí kompenzovat. Zařízení svým provozem nesmí ovlivňovat kvalitu dodávané elektrické energie.

Správně provedená kompenzace sníží odebíraný zdánlivý výkon a proud z napájecího zařízení. Díky tomu dojde k lepšímu využití rozvodných zařízení, zlepšení napěťových poměrů, symetrie zatížení a stability provozu v soustavě.

Nejvýhodnější řešení pro snížení ztrát je paralelní kompenzace. Kapacitní jalový výkon kondenzátorových baterií vykompenzuje induktivní jalový příkon elektrické indukční pece. Toto je nejjednodušší řešení nejvíce využívané v praxi.

5.1.1 Účinnost

Účinnost je vyjádřen podílem činného a zdánlivého výkonu. Činný výkon se dá přeměnit na jinou formu, která je zrovna požadovaná. Zdánlivý výkon je představen jako součin napětí a proudu, procházející daným obvodem. Závisí na vzájemném úhlu mezi napětím a proudem.

Účinnost je bezrozměrná veličina, které může dosahovat hodnot 0 – 1. Účinnost rovný jedné představuje, že výkon dodávaný do zátěže má čistě činný charakter a fázový posuv je nulový. Nulový účinnost představuje výkon dodávaný do zátěže, který má buď kapacitní nebo induktivní charakter a fázový posuv je $\pm 90^\circ$.

Obsahuje-li kompenzovaný obvod součásti nesinusového charakteru, nelze jen uvažovat jalový, nýbrž i deformační výkon. Na základě toho je způsobeno další snížení činného výkonu proti zdánlivému, a tudíž výsledný účinnost je někdy nazýván jako opravdový účinnost [2].

5.1.2 Důsledky špatného účinnosti

Zvětšení pořizovacích nákladů na zařízení, které se dimenzují podle zdánlivého výkonu, zvětšení ztrát v rozvodu elektrické energie, protože ztrátový výkon je přímo úměrný k druhé mocnině jalového výkonu. Uvedené důsledky se projeví na sazbě za spotřebovanou energii, protože rozvodné podniky udělují pokuty velkoodběratelům za odběr výkonu se špatným

účinníkem. Činným výkonem. Je-li $\cos \varphi = 0,5$, jsou ztráty způsobené jalovým výkonem třikrát větší a při $\cos \varphi = 0,3$ dokonce desetkrát vyšší, než ztráty způsobené činným výkonem.

5.1.3 Návrh kompenzace

V praxi se před návrhem kompenzace měří parametry sítě v místě plánovaného kompenzačního rozvaděče. Tím se zaručí kvalitní návrh kompenzace daného odběru.

Správně navrhnuté kompenzační zařízení umožňuje uživateli odebírat výkon s účinníkem kolem 0,95. Tím je zaručeno, že ztráty výkonu a úbytky napětí na vedení budou nízké.

Indukční pece, zejména napájené vysokofrekvenčními zdroji, mají velmi špatný účinník. Kompenzace u takovýchto zařízení se musí přesně navrhnout, aby se efektivněji využívalo zdrojů a elektrických vedení k přenosu činného výkonu. Daří – li se účinník udržovat v požadovaných mezích, lze od rozvodného závodu dostat výhodnější sazbu za spotřebu elektrické energie.

Paralelní kompenzace

Základní parametry pro určení paralelní kompenzace podle [2]: jsou definovány:

Jalový výkon odebíraný před kompenzací lze vyjádřit vztahem

$$Q = \sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \sin \varphi, \quad (3)$$

kde φ je fázový úhel I je proud. Po připojení kompenzační baterie se změní fázový úhel i proud na hodnoty φ_k a I_k , přičemž činná složka proudu bude stále stejná. Činnou složku proudu lze vyjádřit rovnicí [2]:

$$I_{\xi} = I \cdot \cos \varphi = I_k \cdot \cos \varphi_k. \quad (4)$$

Z rovnice (4) se dá vyjádřit proud I_k a z něj následně napsat rovnici pro velikost jalového výkonu

$$I_k = I \cdot \frac{\cos \varphi}{\cos \varphi_k}, \quad (5)$$

$$Q_k = \sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \cos \varphi_k. \quad (6)$$

Celkový jalový výkon dodávající kondenzátorem je určen vztahem

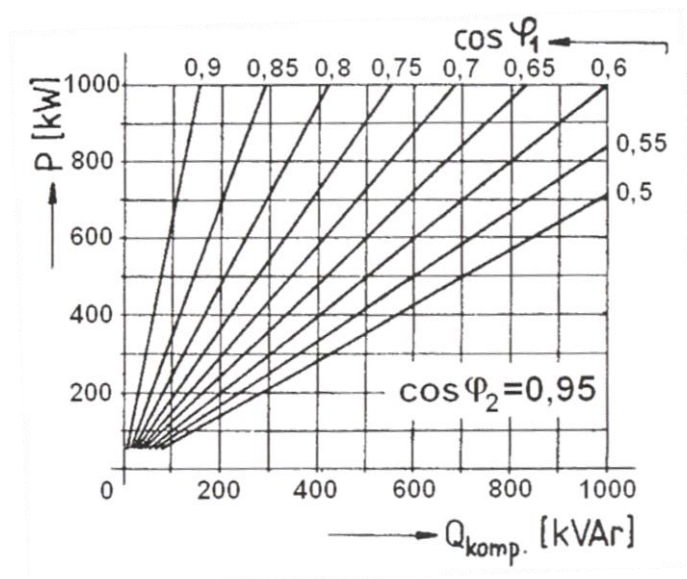
$$Q_c = Q - Q_k = \sqrt{3} \cdot U \cdot (I \cdot \sin \varphi - I_k \cdot \sin \varphi_k). \quad (7)$$

Konečná kapacita kondenzátoru lze tedy spočítat z rovnic

$$Q_c = U \cdot I_c = U \cdot \frac{U}{X_c} = U^2 \cdot \frac{1}{\frac{1}{\omega \cdot C}} = \omega \cdot C \cdot U^2, \quad (8)$$

$$C = \frac{Q_c}{\omega \cdot U^2}.$$

Z Obr 5.1 [2] lze určit velikost jalového výkonu. Na jeho svislé ose jsou vyneseny jeho činné výkony, na podélné ose jalové výkony a šikmé čáry představují účinník před kompenzací.



Obr 5.1 Diagram účinníku před kompenzací

5.1.4 Způsob kompenzace

V této kapitole jsou uvedeny různé způsoby kompenzace podle umístění a typu kompenzačního zařízení [2].

Podle umístění kompenzačního zařízení

Individuální kompenzace – Využívá se u spotřebičů s induktivním charakterem jalového výkonu. Výhoda této kompenzace je, že je přímo dimenzovaná na výkon spotřebiče, ke kterému je připojena. Obvykle je tvořena kondenzátorem nebo baterií kondenzátorů. Kompenzace bývá přesná, protože spínání a vypínání je spjato s připojováním a odpojováním spotřebiče k síti. Vybíjení je zajištěno přes spotřebič, k němuž je kompenzační baterie připojena, i když už je odpojen od zdroje.

Skupinová kompenzace – skupina spotřebičů umístěných blízko sebe připojených k jednomu rozvaděči se může kompenzovat kompenzační baterií. Velice často se používá v malých provozech. Obvykle se navrhuje na menší kapacitní výkon než u individuální kompenzace, protože se při výpočtu uvažuje soudobost jednotlivých spotřebičů. Ochrana před nebezpečným dotykem se řeší jen v jednom místě. Potřebuje regulaci jalového výkonu, aby nedošlo k překompenzování skupiny.

Centrální kompenzace – využívá se pro rozsáhlé elektrické systémy. Je zde využita kompenzační baterie umístěna v hlavní rozvodně. Potřebuje automatickou regulaci, aby bylo dosaženo potřebného účinníku.

Kombinovaná kompenzace – je zde použita kombinace všech druhů kompenzací.

Kompenzační zařízení

Kompensátory

Dělíme na statické a točivé. Do točivých patří synchronní motory, které nekonají činnou práci. Pro vykompenzování se musí motor přebudit.

V průmyslu se častěji využívají statické kondenzátory. Jejich velkou výhodou je, že nemají točivé součásti, tudíž nepotřebují žádnou mechanickou opravu a složitou obsluhu.

I přes všechny výhody vzniká při zapojování či odpojování kondenzátorů k obvodu přepětí, což někdy může způsobit nemalé problémy. Další nepříjemná vlastnost kondenzátorů je, že při rozpojení z obvodu na nich zůstává nějaký čas náboj. Toto se řeší speciálním zařízením určeným k jejich vybíjení. Nejčastěji se vybíjí přes odporníky nebo transformátory [10].

Hrazené kompenzátory

Bývají tvořeny LC obvodem, jež je sestaven ze sériové kombinace tlumivky a kondenzátorové baterie. Používají se pro kompenzaci nelineárních zátěží nebo tam, kde je riziko vzniku rezonance kapacity s indukčností spotřebiče. Připojení k síti může být provedeno stykačem, či tyristorovými spínači.

Filtračně – kompenzační zařízení

Používá se pro svoji schopnost automaticky regulovat kompenzační výkon a eliminaci výskytu vyšších harmonických složek. Bývá tvořen jasně daným počtem filtračně - kompenzačních stupňů sestavených z LC filtrů, jež jsou paralelně připojeny ke sběrnici. LC filtr je naladěn na určitou frekvenci.

5.1.5 Regulace kompenzační baterie

U skupinové kompenzace je potřeba měnit velikost kondenzátorové baterie podle odebíraného výkonu. Pro kompenzaci účinníku je třeba správně připojit či odpojit odbočky baterie. Tím se mění celková kapacita. Regulaci obstarávají automatická zařízení. Výhodou je rychlejší odezva při změně zatížení a vyloučení možného překompenzování. Jako samočinný regulátor jalového výkonu lze použít typ WOR, jenž pracuje na principu kontaktního wattmetru. Lepším řešením je typ RQ1 nebo RQ5. Je plně elektronický a bezkontaktní. Obsahuje obvody s triaky, jimiž spíná stykače a připojuje tak kompenzační kondenzátory do obvodu. Účinník udržuje od 0,95 do 1 [2].

Kondenzátorová baterie pro středofrekvenční zařízení

Kondenzátorová baterie se většinou skládá z více kondenzátorových jednotek. Každá jednotka bývá umístěna samostatně v plechové nádobě. Pro představu baterie o výkonu 3 600 kVAr se skládá z 20 jednotek. Běžně se používá kondenzátor s vodním chlazením. To umožňuje zmenšení rozměru kondenzátoru. Baterie určena pro dvoutunové tavicí pece o výkonu 10 600 kVAr bývá složena z 56 jednotek. Dají se uspořádat do dvou řad nad sebou. Části baterie bývají spojeny přes spínače, které umožňují připojit potřebné části baterie do oscilačního obvodu.

5.2 Symetrizační zapojení pro indukční pece

Vlivem nesymetrické zátěže tečou v jednotlivých fázích různé velké proudy. To má za následek napěťovou nesymetrii, která značně ovlivňuje kvalitu elektrické energie.

Při symetrizaci je důležité, aby se dodržoval správný sled fází vzhledem k symetrizačním výkonům. Při opačném sledu fází symetrizace nenastane, naopak ještě více nesymetrie stoupne.

Pro přesnou symetrii by při změně zátěže bylo nutno doladovat symetrizační prvky. To se ovšem v praxi moc neprovádí. Spíše se symetrizace nastaví na pevnou hodnotu pro určitou zátěž. Menší kolísání nesymetrické zátěže tolik nevadí.

5.2.1 Nesymetrické zatížení sítě

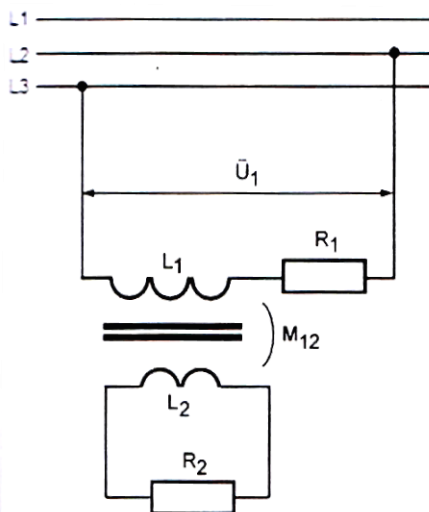
Je – li symetricky zatížena trojfázová síť, potom platí, že napětí mají stejně velkou amplitudu a jejich fáze jsou vůči sobě pootočený o 120° . Naruší – li se jeden z těchto parametrů, potom se hovoří o nesymetrickém zatížení sítě. Hlavními představiteli nesymetrické zátěže jsou hutní podniky.

5.2.2 Připojení indukčních pecí k elektrické síti

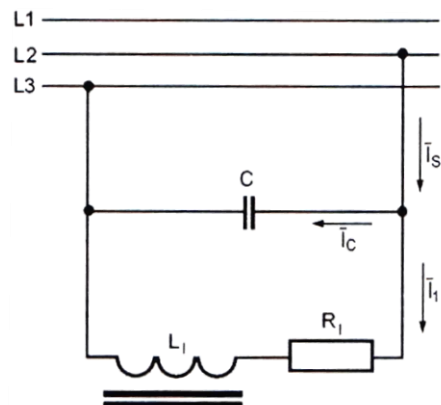
Indukční pece představují pro elektrickou síť jednofázovou zátěž. Kanálkové pece, které se stavějí přímo na síťovou frekvenci, potřebují k provozu symetrizační zařízení. Podle počtu kanálků dělíme pece na jednofázové, dvojfázové a trojfázové. Každý kanálek se připojuje na jednu fázi.

PECE JEDNOFÁZOVÉ

Pece s jedním kanálkem připojujeme na fázové nebo sdružené napětí. Zdánlivé příkony těchto zařízení mohou dosahovat až 150 kVA. Pecí v hutích bývá více, proto vhodným připojením k síti můžeme dosáhnout symetrické zatížení sítě. Schematicky lze jednofázovou pec popsat na Obr. 5.2 [2], kde je L_1 indukčnost cívky, R_1 odpor cívky, L_2 indukčnost vsázky, R_2 odpor vsázky a M_{12} je vzájemná indukčnost.



Obr. 5.2 Připojení jednofázové pece k síti



Obr. 5.3 Kompenzace jalového výkonu

Na Obr. 5.3 [2] je zobrazena kompenzace jalového výkonu. Převedením hodnot vsázky na cívku dostaneme parametry L_I je výsledná indukčnost cívky, R_I je výsledný odpor a C je připojená kapacita pro kompenzaci účinníku.

Indukční pec připojená na sdružené napětí odebírá kromě činné také jalovou složku výkonu. Se zmenšujícím se účinníkem $\cos \varphi$ roste jalový proud I_j . U tavení odporových slitin je $\cos \varphi = 0,8$, při tavbě hliníku asi 0,3. Pro kompenzaci se připojí paralelně k cívce kondenzátor o vhodné kapacitě C . Podle Obr. 5.3 se mohou napsat rovnice

$$I_S = I_1 + I_C = \frac{U_1}{R_I + j\omega L_I} + j\omega C \cdot U_1,$$

$$I_S = \frac{U_1}{R_I^2 + (j\omega L_I)^2} \cdot [R_I + j(\omega C R_I^2 + \omega C \cdot \omega^2 L_I^2 - \omega L_I)]. \quad (9)$$

Činitel jakosti obvodu je vyjádřen vztahem

$$Q = \frac{\omega \cdot L_I}{R_I}. \quad (10)$$

Celkový proud, který bude poté procházet kompenzační baterií lze popsat rovnicí

$$I_C = \frac{I_p \cdot Q}{\sqrt{1 + Q^2}}. \quad (11)$$

Kapacitu baterie pro kompenzaci jalového výkonu určíme z podmínky, že síťový proud nebude obsahovat jalovou složku. Výpočet kapacity C je vyjádřen vztahem

$$C = \frac{L_I}{R_I^2 + (\omega L_I)^2}. \quad (12)$$

Tyto pece se kompenzují na účinník $\cos \varphi = 0,95$, přestože proud ze sítě by byl větší než při úplné kompenzaci.

Ze vztahu [4]

$$I_S = \frac{U_1}{R_I^2 + (j\omega L_I)^2} \cdot R_I, \quad (13)$$

je patrné, že indukční zařízení odebírá ze sítě pouze činný proud, proto se vyladěný obvod pece chová jako činný zatěžovací odpor, který je vyjádřen vztahem [2]

$$R_Z = \frac{U_1}{I_S} = \frac{R_I^2 + (\omega L_I)^2}{R_I}. \quad (14)$$

Pomocí symetrizačního zařízení můžeme dosáhnout symetrického zatížení trojfázové sítě vyladěnou jednofázovou pecí.

Symetrizace je umělá zátěž složená ze tří větví.

První je R_Z , nahrazuje vyladěnou indukční pec. Ve druhé je indukčnost L a v třetí kapacita C . Tyto větve smí být zapojeny do hvězdy nebo trojúhelníka. Vhodnou velikostí součástí a libovolným zapojením a při správném sledu všech tří fází lze dosáhnout $\cos \varphi = 1,0$.

Indukčnost L a kapacitu C lze spočítat ze vztahu [1]

$$\begin{aligned} L &= \frac{\sqrt{3} \cdot R_Z}{\omega}, \\ C &= \frac{1}{\omega \cdot \sqrt{3} \cdot R_Z}, \\ \omega L &= \frac{1}{\omega C} = \sqrt{3} \cdot R_Z \end{aligned} \quad (15)$$

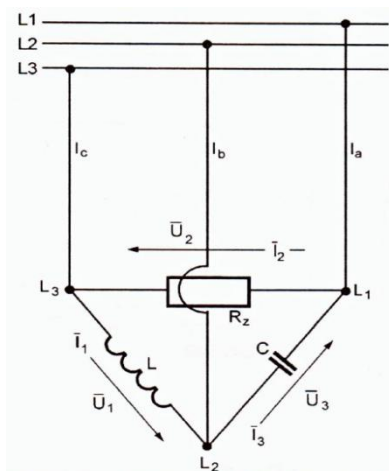
Z Obr. 5.4 [1] je patrné symetrizační zařízení zapojené do trojúhelníka. V diagramu Obr. 5.5 [1] jsou vyznačeny proudy a napětí vyskytující se v symetrizačním zařízení.

Činný výkon P_2 odebírající indukční peci lze vypočítat dle vztahu [1]

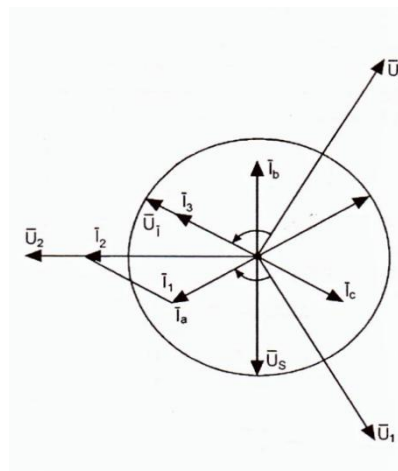
$$P_2 = U_2 \cdot I_2 = \frac{U_2^2}{R_Z} \quad (16)$$

a jalový výkon Q_2 indukčnosti nebo kondenzátoru vypočteme ze vztahu [3]

$$Q_2 = \frac{U_2^2}{\sqrt{3} \cdot R_Z} = \frac{P_2}{\sqrt{3}}. \quad (17)$$



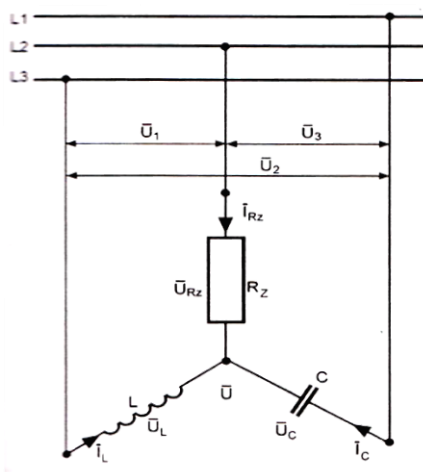
Obr. 5.4 Zapojení do trojúhelníka



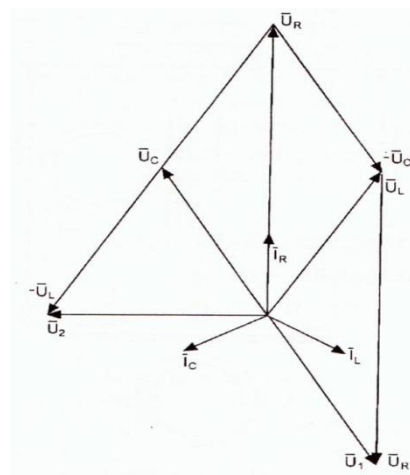
Obr. 5.5 Fázorový diagram při zapojení do trojúhelníka

Zapojení symetrizačního zařízení do hvězdy je na Obr. 5.6 [3]. Proudů a napětí jsou zobrazeny v diagramu na Obr. 5.7 [1]. Připojením symetrizačního zařízení se na peci objeví 3x větší napětí U_R než fázové. Parametry prvků symetrizace dostaneme ze vztahů [1]

$$\begin{aligned} L &= \frac{R_Z}{\sqrt{3} \cdot \omega}, \\ C &= \frac{\sqrt{3}}{\omega \cdot R_Z}, \\ \omega \cdot L &= \frac{1}{\omega \cdot C} = \sqrt{3} \cdot R_Z. \end{aligned} \quad (18)$$



Obr. 5.6 Zapojení do hvězdy



Obr. 5.7 Fázorový diagram při zapojení do hvězdy

PECE DVOUFÁZOVÉ

Dvoufázově se pece zapojují se dvěma, či čtyřmi kanálky. Dva jsou spojeny paralelně a používají společný pecní transformátor. Symetrického zatížení sítě docílíme speciálním symetrizačním zařízením nebo připojením dvoupecních transformátorů k síti pomocí Scottova zapojení podle Obr. 5.8[3]. Mezi první a třetí fází je připojeno primární vinutí hlavního pecního transformátoru, rozdělené na dvě stejné části. Vinutí pomocného transformátoru se připojuje mezi střed hlavního vinutí a druhou fází. Jsou – li kanálky stejné, pak i odběry z jednotlivých fází jsou totožné. Na indukované proudy spočítáme ze vztahů [3]

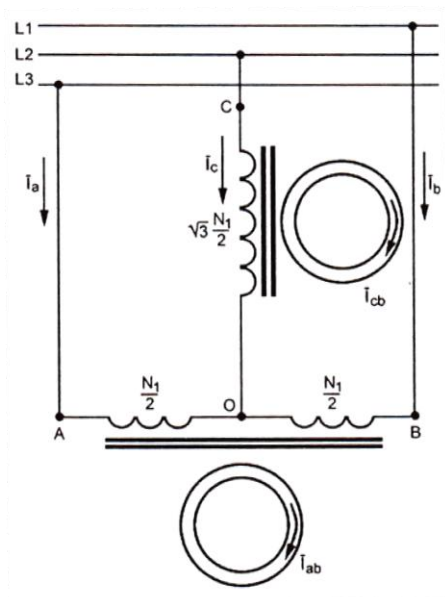
$$|I_a| = |I_b| = |I_c| \quad (19)$$

$$|I_{cb}| = |I_{ab}| = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot N_I \cdot |I_c| \quad (20)$$

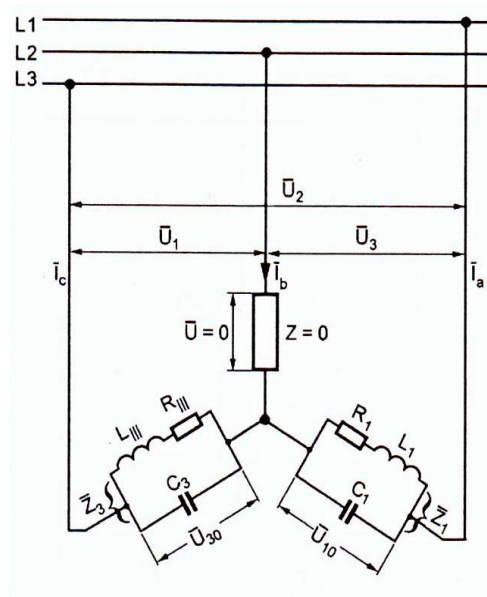
Dvoufázové pece lze připojit i přes symetrizační zapojení dle Obr. 5.9 [1]. Výhoda tohoto připojení je proti Scottovu zapojení v tom, že oba pecní transformátory jsou shodné. Pro vyladění obvodu se připojuje paralelní rezonanční kapacita C_{rez} , kterou lze spočítat z rovnice [2]

$$C_{1rez} = C_{3rez} = \frac{L_1}{R_1^2 + (\omega \cdot L_I)^2} \cdot \quad (21)$$

Pro připojení je třeba dodržet správný sled fází.



Obr. 5.8 Scottovo zapojení



Obr. 5.9 Symetrizační zapojení dvoufázové sítě

PECE TŘÍFÁZOVÉ

Třífázové pece se vyrábějí s třemi nebo šesti kanálky, z nichž každé dva bývají paralelně připojeny na společné jádro. Tyto pece obsahují třífázový pecní transformátor v plášťovém provedení. Každá pecní cívka je nesena jedním ze tří jader, kolem které je umístěn jeden nebo paralelně dva kanálky. Cívky připojujeme na síť v zapojení do trojúhelníka nebo do hvězdy. Jde o symetricky zatíženou síť. Pro zlepšení účinníku $\cos \varphi$ připojujeme paralelně třífázovou kondenzátorovou baterii. Používá se především pro tavbu barevných kovů.

6 PŘÍKLADY ŘEŠENÍ PROBLÉMU

6.1 Výpočet kompenzace

Vypočítejte kapacitu kondenzátorové baterie, jestliže je zadán odpor pece $R_I = 40 \text{ m}\Omega$, indukčnost pecní cívky $L_I = 0,15 \text{ mH}$, frekvence zdroje $f = 750 \text{ Hz}$, napětí zdroje $U_G = 2000 \text{ V}$, proud tekoucí pecí $I_P = 3500 \text{ A}$. Určete proud odebíraný z generátoru, proud kondenzátorovou baterií, činitele jakosti rezonančního obvodu a kapacitu kondenzátorové baterie.

Postup řešení:

- výpočet činitele jakosti rezonančního obvodu
- proud, který teče kondenzátorovou baterií
- výpočet kapacity kondenzátorové baterie
- určení náhradního odporu
- proud tekoucí z generátoru

Řešení:

Všechny potřebné vztahy pro výpočet jsou uvedeny v předchozí kapitole.

Činitel jakosti RLC obvodu

$$Q = \frac{\omega \cdot L_I}{R_I} = \frac{2 \cdot \pi \cdot 750 \text{ Hz} \cdot 0,15 \cdot 10^{-3} \text{ H}}{40 \cdot 10^{-3} \Omega} = \underline{17,671}$$

Proud kondenzátorovou baterií

$$I_C = \frac{I_P \cdot Q}{\sqrt{1 + Q^2}} = \frac{3500 \text{ A} \cdot 17,671}{\sqrt{1 + 17,671^2}} = \underline{3494 \text{ A}}$$

Kapacita kondenzátorové baterie

$$C = \frac{I_C}{U_G \cdot \omega} = \frac{3494 \text{ A}}{2000 \text{ V} \cdot 2 \cdot \pi \cdot 750 \text{ Hz}} = \underline{3,707 \cdot 10^{-4} \text{ F}}$$

Náhradní zatěžovací odpor

$$R_Z = \frac{L_I}{C \cdot R_I} = \frac{0,15 \cdot 10^{-3} \text{ H}}{3,707 \cdot 10^{-4} \text{ F} \cdot 40 \cdot 10^{-3} \Omega} = \underline{10,116 \Omega}$$

Proud odebíraný z generátoru

$$I_G = \frac{U_G}{R_Z} = \frac{2000 \text{ V}}{10,116 \Omega} = \underline{197,707 \text{ A}}$$

6.2 Výpočet symetrizačního zařízení zapojeného do hvězdy

Určete parametry symetrizačního zapojení pro kelímkovou pec s obsahem vsázky 900 kg připojenou k síti 3 x 400/230 V a frekvenci 50 Hz. Příkon napájecího zdroje $P = 180 \text{ kW}$. Určete velikosti prvků symetrizace a napětí a proudy ve všech větvích.

Postup výpočtu:

- výpočet náhradního zatěžovacího odporu R_Z ,
- výpočet indukčnosti cívky L ,
- výpočet kapacity kondenzátoru C ,
- výpočet jednotlivých proudů v symetrizačním zapojení I_R, I_L, I_C ,
- určení napětí na všech prvcích symetrizace U_R, U_L, U_C .

Řešení: Použité vztahy jsou uvedeny a odvozeny v předchozí kapitole

Jelikož se jedná o symetrizaci zapojené do hvězdy, tak se napájecího napětí dosazuje ve fázových hodnotách.

Náhradní zatěžovací odpor

$$R_Z = \frac{(3 \cdot U_{1f})^2}{P} = \frac{(3 \cdot 230 \text{ V})^2}{180 \cdot 10^3 \text{ W}} = \underline{2,645 \Omega}$$

Výpočet velikosti indukčnosti

$$L = \frac{R_Z}{\sqrt{3} \cdot \omega} = \frac{2,645 \Omega}{\sqrt{3} \cdot 2 \cdot \pi \cdot 50 \text{ Hz}} = \underline{4,861 \cdot 10^{-3} \text{ H}}$$

Výpočet velikosti kapacity

$$C = \frac{\sqrt{3}}{R_Z \cdot \omega} = \frac{\sqrt{3}}{2,645 \Omega \cdot 2 \cdot \pi \cdot 50 \text{ Hz}} = \underline{2,084 \cdot 10^{-3} \text{ F}}$$

V zapojení do hvězdy tečou jednotlivými větvemi stejné proudy, proto lze psát

$$I_R = I_L = I_C = \frac{3 \cdot U_{1f}}{R_Z} = \frac{3 \cdot 230 \text{ V}}{2,645 \Omega} = \underline{260,870 \text{ A}}$$

Napětí v jednotlivých větvích

$$U_R = 3 \cdot U_{1f} = 3 \cdot 230 \text{ V} = \underline{690 \text{ V}}$$

$$U_L = \sqrt{3} \cdot U_{1f} = \sqrt{3} \cdot 230 \text{ V} = \underline{400 \text{ V}}$$

$$U_C = \sqrt{3} \cdot U_{1f} = \sqrt{3} \cdot 230 \text{ V} = \underline{400 \text{ V}}$$

6.3 Výpočet symetrizačního zařízení zapojeného do trojúhelníka

Určete parametry symetrizačního zapojení pro kelímkovou pec s obsahem vsázky 900 kg připojenou k síti 3 x 400 V a frekvenci 50 Hz. Příkon napájecího zdroje $P = 200$ kW. Určete velikosti prvků symetrizace a napětí a proudy ve všech větvích.

Postup výpočtu:

- výpočet náhradního zatěžovacího odporu R_Z ,
- výpočet indukčnosti cívky L ,
- výpočet kapacity kondenzátoru C ,
- výpočet jednotlivých proudů v symetrizačním zapojení I_R , I_L , I_C .

Použité vztahy jsou uvedeny a odvozeny v předchozí kapitole

Řešení:

Náhradní zatěžovací odpor

$$R_Z = \frac{U_1^2}{P} = \frac{(400 \text{ V})^2}{200 \cdot 10^3 \text{ W}} = \underline{0,800 \Omega}$$

Výpočet velikosti indukčnosti

$$L = \frac{\sqrt{3} \cdot R_Z}{\omega} = \frac{\sqrt{3} \cdot 0,800 \Omega}{2 \cdot \pi \cdot 50 \text{ Hz}} = \underline{4,411 \cdot 10^{-3} \text{ H}}$$

Výpočet velikosti kapacity

$$C = \frac{1}{\sqrt{3} \cdot R_Z \cdot \omega} = \frac{1}{\sqrt{3} \cdot 0,8 \Omega \cdot 2 \cdot \pi \cdot 50 \text{ Hz}} = \underline{2,297 \cdot 10^{-3} \text{ F}}$$

Proud procházející pecí

$$I_R = \frac{U_1}{R_Z} = \frac{400 \text{ V}}{0,8 \Omega} = \underline{500 \text{ A}}$$

Proud procházející kapacitou

$$I_C = \frac{I_R}{\sqrt{3}} = \frac{500 \text{ A}}{\sqrt{3}} = \underline{288,675 \text{ A}}$$

Proud procházející indukčností

$$I_L = \frac{I_R}{\sqrt{3}} = \frac{500 \text{ A}}{\sqrt{3}} = \underline{288,675 \text{ A}}$$

7 ZÁVĚR

Indukční ohřevy využívají principu elektromagnetické indukce ve vodivých materiálech, v nichž vznikají vířivé proudy a ohřívají je. Indukční zařízení jsou konstruovány k tavení, svařování, pájení, prohřevu a konečné úpravě materiálů. V současnosti indukční ohřevy jsou aplikovány v oblasti gastronomie ve formě indukčních vařičů. Zde se těší velké oblibě pro svoji rychlost, účinnost a bezpečnost při vaření.

Důležitým parametrem, který se sleduje u indukčního ohřevu, je hloubka vniku elektromagnetické energie, jež závisí na permeabilitě a vodivosti materiálu a na frekvenci napájecího proudu. Vhodnou změnou frekvence lze docílit takové hloubky vniku, aby se prohříval jen povrch dané vsázky.

Indukční zařízení bývají konstruovány v širokém rozsahu frekvencí. Typickým zástupcem pracující na síťové frekvenci je kanálková pec a na vysoké frekvence v řádech 100 kHz se staví kalící zařízení. Napájení zajišťují různé typy měničů. Nejdříve se používaly rotační generátory, poté nastoupily elektronkové měniče a nyní se používají tyristorové nebo tranzistorové měniče.

Druhá část práce je věnována dvěma energetickým problémům, které se vyskytují u indukčních zařízení. Jsou to kompenzace jalového výkonu a symetrizace zátěže v trojfázové síti.

Kompenzace jalové energie je potřebná ke snížení odebíraného zdánlivého výkonu z elektrické sítě. Nejčastěji se řeší jako paralelní kompenzace, tj. k induktoru je paralelně připojena kondenzátorová baterie. Neprovede-li se správně, dochází k odebírání jalové energie z rozvodné soustavy, a tím k růstu ztrát na vedení.

Indukční zařízení představují pro třífázovou elektrickou síť nesymetrickou zátěž. Většinou se musí připojovat přes symetrizační obvody. Pro dvoufázovou zátěž se nejčastěji používá Scottovo zapojení a pro jednofázové symetrizační obvody zapojené do trojúhelníka nebo hvězdy.

Bakalářská práce byla zaměřena na porozumění dané problematiky, proto uvedené výpočty jsou jen ukázkové a neřeší konkrétní zařízení.

POUŽITÁ LITERATURA

- [1] Hradílek, Z., Buchta, Z., Rusek, S., Gavlas, J. Elektrotepelná zařízení. IN-El, Praha 1997, 174 stran, ISBN 80-902333-2-5.
- [2] Hradílek, Z. Elektroenergetika distribučních a průmyslových zařízení. Montainex a.s., OSTRAVA 2008, 364 stran, ISBN 987-80-7225-291-6.
- [3] Novak, P., Kolesár J. Elektrotepelná technika. ALFA, Bratislava 1990, 216 stran, ISBN 80-05-00426-5.
- [4] Zukal, F., a kol. Zařízení a provoz sléváren. SNTL, Praha 1979,
- [5] Hradílek, Z. Elektrické teplo. VŠB, Ostrava 1989, I.vydání, 197 stran, ISBN 80-7078-006-1
- [6] Hradílek, Z. Elektrotepelná technika. VSB, Ostrava 1996, 237 stran, ISBN 80-7078-323-0.
- [7] Hradílek, Z., Gavlas, J., Král, V., Sajdak, C., Kurek, A., Przylucki, R., Chrapoński, J. Elektrotepelná technika-Simulace-počítačové programy. VŠB, Ostrava 2001, 1 vydání, 196 stran, ISBN 80-7078-874-7.
- [8] Baxant, P., Drápela, J., Lázničková, I. Elektrotepelná technika. VUT Brno, elektronická skripta.
- [9] Langer, E., Kožený, J. Elektrotepelná zařízení indukční. VŠSE, Plzeň 1982, 185 stran.
- [10] Korenc, V., Holoubek, J. Kompenzace jalového výkonu v praxi. IN-EL, Praha 1999, ISBN 80-86230-07-4.
- [11] Jiříčka, Z. Indukční ohřev v kovárnách. SNTL, Praha 1966, I. vydání, 117 stran.