

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

KATEDRA ELEKTROMECHANIKY A VÝKONOVÉ ELEKTRONIKY

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Rotační a statické měniče kmitočtu pro indukční ohřevy

Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**

Rozsah pracovní zprávy: **20 - 30 stran**


Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:

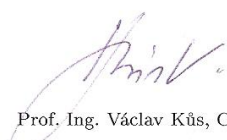
Student si vhodnou literaturu vyhledá v dostupných pramenech podle doporučení vedoucího práce.

Vedoucí bakalářské práce: **Prof. Ing. Jiří Kožený, CSc.**
Katedra elektroenergetiky a ekologie

Datum zadání bakalářské práce: **17. října 2011**
Termín odevzdání bakalářské práce: **3. června 2012**


Doc. Ing. Jiří Hammerbauer, Ph.D.
děkan




Prof. Ing. Václav Kůs, CSc.
vedoucí katedry

V Plzni dne 17. října 2011

Anotace

Předložená práce je zaměřena na indukční ohřev, zejména na rotační a statické měniče kmitočtu, pro indukční zařízení.

Klíčová slova

Indukční ohřev, rotační a statické měniče kmitočtu, tavící kelímková pec

Abstract

Rotary and solid-state frequency converters for induction heating

The present work is focused on induction heating, in particular rotary and static frequency converters for induction devices..

Key words

Induction heating, rotating and static frequency converter, crucible melting furnace

Prohlášení

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

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

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

V Plzni dne 3.6.2012

Oldřich Řezníček

.....

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu bakalářské práce Prof. Ing. Jiřímu Koženému CSc. za cenné odborné rady, připomínky a metodické vedení práce.

Obsah	
OBSAH	7
ÚVOD	8
1 TEORIE INDUKČNÍHO OHŘEVU	11
1.1 ROZDĚLENÍ INDUKČNÍCH ZAŘÍZENÍ.....	11
1.2 VOLBA FREKVENCE	12
2 MOŽNOSTI NAPÁJENÍ INDUKČNÍCH ZAŘÍZENÍ	13
2.1 ZAŘÍZENÍ NA SÍTOVOU FREKVENCI	13
2.2 STŘEDOFREKVENČNÍ ZDROJE.....	13
2.2.1 Rotační měniče.....	13
2.2.2 Tyristorové měniče.....	13
2.2.3 Tranzistorové měniče kmítočtu	13
2.3 VYSOKOFREKVENČNÍ MĚNIČE	14
2.3.1 Elektronkový měnič.....	14
2.3.2 Tranzistorový měnič.....	14
3 PRINCIPY MĚNIČŮ KMITOČTU	15
3.1 KOMPENZACE A SYMETRIZACE	15
3.1.1 Kompenzace	15
3.1.2 Symetrizace	16
3.2 ZAŘÍZENÍ NA SÍTOVOU FREKVENCI	17
3.2.1 Přímé připojení.....	17
3.2.2 Trojnásobí frekvence.....	18
3.3 STŘEDOFREKVENČNÍ ZAŘÍZENÍ.....	19
3.3.1 Rotační měniče.....	19
3.3.2 Tyristorový měnič.....	20
3.3.3 Tranzistorový středofrekvenční měnič	21
3.4 VYSOKOFREKVENČNÍ MĚNIČE	21
3.4.1 Elektronkový měnič.....	21
3.4.2 Tranzistorový vysokofrekvenční měnič	22
4 POUŽITÍ PRO TAVÍCÍ KELÍMKOVOU PEC	23
4.1 INDUKČNÍ TAVÍCÍ KELÍMKOVÁ PEC S NEVODIVÝM KELÍMKEM	23
4.1.1 Víření taveniny.....	24
4.2 INDUKČNÍ TAVÍCÍ KELÍMKOVÁ PEC S VODIVÝM KELÍMKEM	25
4.3 DOBA TAVBY A VÝROBNOST PECE	25
ZÁVĚR	27
POUŽITÁ LITERATURA	28

Úvod

Předložená práce je zaměřena na měniče kmitočtu pro indukční ohřevy.

Tato práce je rozdělena na čtyři části. V první části je stručně popsána teorie indukčního ohřevu. Ve druhé se zabývám možnostmi napájení indukčních zařízení. Následující část obsahuje principy rotačních a statických měničů kmitočtu. A nakonec jsem se zaměřil na použití těchto měničů pro indukční kelímkovou pec a jejich výhody a nevýhody.

Seznam symbolů

Symbol:	Jednotky:	Název:
a	[m]	Hloubka vniku
i	[kWh/t]	Energie potřebná na roztavení 1t vsázky
τ	[h]	Doba tavby
Q	[t]	Hmotnost vsázky
P	[kW]	Instalovaný výkon měniče
k	[-]	Koeficient využití měniče
E	[V/m]	Intenzita elektrického pole
H	[A/m]	Intenzita magnetického pole
J	[A/m ²]	Proudová hustota
f	[Hz]	Frekvence
L_1	[H]	Výsledná indukčnost indukčního zařízení
R_1	[Ω]	Výsledný odpor indukčního zařízení
C	[F]	Kapacita kompenzačního kondenzátoru
μ	[H/m]	Permeabilita
γ	[S]	Konduktivita
ω	[rad/s]	Úhlová rychlost
ρ	[kg/m ³]	Hustota

Seznam tabulek

Označení:	Název:	Strana:
Tab.1	Hodnoty poměrných veličin E,H,J	12

Seznam obrázků

<u>Označení:</u>	<u>Název:</u>	<u>Strana:</u>
Obr.1	Průběh amplitud H, E, J ve stěně velké tloušťky	12
Obr.2.1	Náhradní schéma indukčního zařízení	15
Obr.2.2	Princip kompenzace	15
Obr.2.3	Odpor vykompenzovaného indukčního zařízení	15
Obr.3	Symetrizace do trojúhelníka	16
Obr.4	Symetrizace do hvězdy	17
Obr.5	Přímé připojení na síť	18
Obr.6	Trojnásobič frekvence	18
Obr.7	Zapojení rotačního měniče	19
Obr.8	Tyristorový měnič	20
Obr.9	Tranzistorový měnič	21
Obr.10	Elektronkový měnič	22
Obr.11	Indukční tavicí pec kelímková	23

Seznam vztahů

<u>Označení:</u>	<u>Název:</u>	<u>Strana:</u>
1	Hloubka vniku naindukovaných proudů	12
2	Kompenzační kapacita	15
3	Vykompenzovaný obvod jako činný odpor	15
4	Parametry symetrizačního zařízení do trojúhelníka	16
5	Parametry symetrizačního zařízení do hvězdy	17
6	Víření taveniny	24
7	Celková doba tavby	25
8	Doba potřebná k roztavení vsázky	25

1 Teorie indukčního ohřevu

Indukční ohřev je velice progresivní princip ohřevu, který dovoluje velmi vysoké měrné příkony do ohřivaného předmětu. Je uskutečnitelný pouze pro elektricky vodivé materiály. Předmět z vodivého materiálu, který dále budeme označovat jako vsázka, je vložen do střídavého magnetického pole, kde se v něm indukují vířivé proudy. Tyto proudy se uzavírají uvnitř vsázky a tím jí zahřívají.

Nejvýznamnější výhodou zmiňovaného způsobu ohřevu je skutečnost, že energie se do vsázky dopraví ve formě střídavého magnetického pole a teplo vzniká přímo ve vsázce. Z čehož plyne, že vsázka je nejteplejším místem celé soustavy.

Elektromagnetické pole je vyvoláno průchodem střídavého proudu induktorem, vhodnou volbou kmitočtu proudu a tvaru induktoru, můžeme velmi výhodně ovlivnit rozložení tepla vyvíjeného ve vsázce.

1.1 Rozdělení indukčních zařízení

Rozdělení podle kmitočtu

- *Síťové 50Hz*
- *Středofrekvenční 0,2kHz – 50kHz*
- *Vysokofrekvenční nad 50 kHz*

1.2 Volba frekvence

Frekvenci volíme podle materiálu vsázky (permeabilita, konduktivita), velikosti vsázky a účelu ohřevu (tavení, tváření, kalení atd.), podle požadovaného rozložení tepla ve vsázce a dalších podmínek konkrétního technologického procesu.

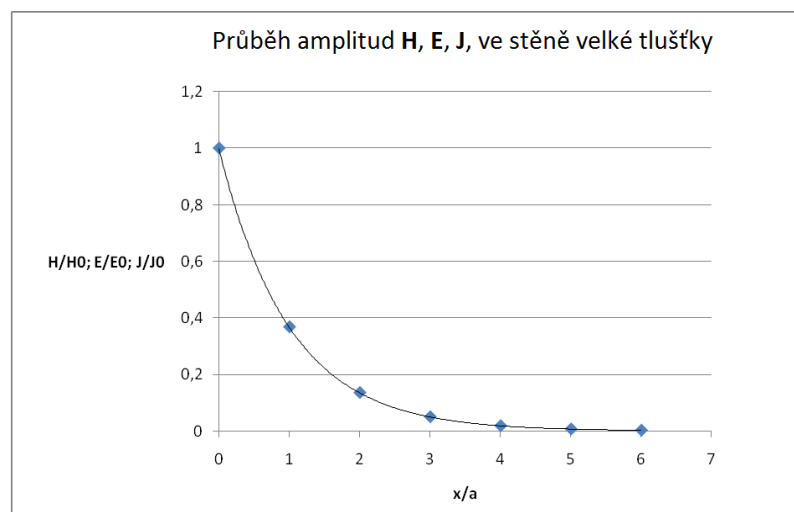
Hloubka vniku je vzdálenost od povrchu vsázky, kde se sníží velikost poměrných veličin \mathbf{E} , \mathbf{H} , \mathbf{J} na velikost e^{-1} . Tedy hloubka, ve které se změní zhruba 63% energie elektromagnetického pole v teplo.

Pro názornost je na Obr.1 vynesena podobnostní diagram k jehož vynesení jsme použili hodnoty z Tab.1, kde x je tloušťka materiálu v kolmém směru na magnetický tok vyvolaný induktorem.

$x=0$	$e^0=1$
$x=1$	$e^{-1}=0,367879$
$x=2$	$e^{-2}=0,135335$
$x=3$	$e^{-3}=0,049787$
$x=4$	$e^{-4}=0,018315$
$x=5$	$e^{-5}=0,006738$
$x=6$	$e^{-6}=0,002478$

Tab.1

$$a = \sqrt{\frac{2}{\omega\gamma\mu}} \quad (1)$$



Obr.1

Z toho vyplývá, že například při ohřevu pro tváření, kdy chceme veškerý objem vsázky ohřát rovnoměrně, můžeme použít nízké frekvence. Naproti tomu, při povrchovém kalení, kdy chceme ohřát jen tenkou vrstvu na povrchu vsázky, je potřeba frekvence velice vysoká.

Z výše uvedeného je patrné, že díky velkému množství technologických procesů je nutné mít měniče s velkým rozsahem frekvencí a také výkonů.

2 Možnosti napájení indukčních zařízení

K napájení můžeme použít síťový kmitočet případně jeho trojnásobek získaný vhodným zapojením transformátoru. Středofrekvenční zařízení jsou napájena měniči kmitočtu rotačními, které jsou postupně vytlačovány polovodičovými řešeními. Vysokofrekvenční zařízení jsou napájena elektronkovými měniči kmitočtu, jež jsou rovněž nahrazovány polovodičovými měniči.

2.1 Zařízení na síťovou frekvenci

Tato zařízení jsou vhodná především pro ohřev vsázky velkých rozměrů. Nebo se jedná o stále používaná starší zařízení.

2.2 Středofrekvenční zdroje

2.2.1 Rotační měniče

Z rotačních měničů se získávají proudy s kmitočtem 500Hz – 10kHz. Rotační měnič je vlastně soustrojí tvořené generátorem a poháněcím motorem, nejčastěji asynchronním připojeným k síti. V dnešní době jsou nahrazovány měniči tyristorovými.

2.2.2 Tyristorové měniče

Tyristorové měniče se používají v rozsahu kmitočtů 0,2 – 10kHz, pro výkony až do tisíců kW. Postupně nahrazují rotační měniče kmitočtu. Jejich typické použití je pro tavicí indukční kelímkové pece a ohřívací zařízení na ohřev přířezů, ústřihů, tyčí, trubek atd.

2.2.3 Tranzistorové měniče kmitočtu

Tranzistorové měniče pracují s vyšší frekvencí asi 1-20kHz což je více než měniče tyristorové. Používají se IGBT tranzistory. Typickou aplikací je pájení natvrdo, ohřev trubek, drátů při galvanizování a pokovování, pro ohřev před lisováním pro popouštění atd.

2.3 Vysokofrekvenční měniče

2.3.1 Elektronkový měnič

V těchto měničích základní funkci zajišťuje elektronka, byly vyráběny typicky pro kmitočty okolo 300kHz. Dnes je nahrazují měniče tranzistorové, jež mají výrazně vyšší účinnost a mohou začít pracovat téměř okamžitě na rozdíl od elektronkových, kde je nutný pomalý náběh (tzv. nažhavení).

2.3.2 Tranzistorový měnič

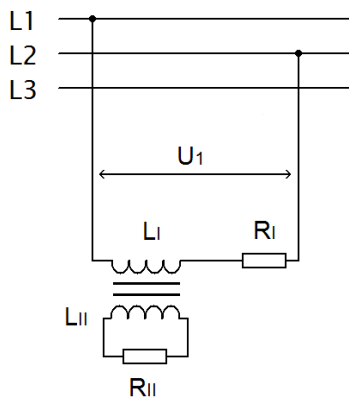
Vyrábějí se pro frekvence až do 800kHz. Ve vysokofrekvenčním tranzistorovém měniči jsou použity převážně tranzistory MOSFET. Tyto tranzistory ovšem nedosahují takových výkonů jako tranzistory IGBT.

3 Principy měničů kmitočtu

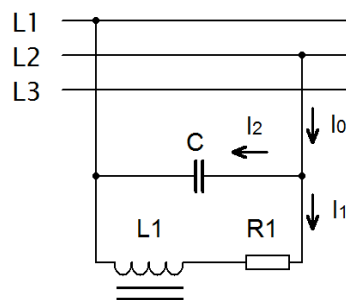
3.1 kompenzace a symetrizace

3.1.1 Kompenzace

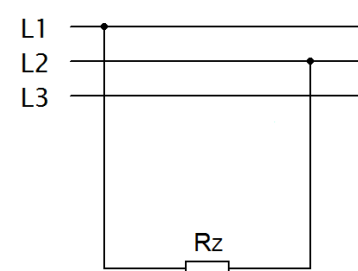
Každé indukční zařízení sestává z cívky, vsázky a střídavého zdroje. Kdyby byl induktor připojen přímo k síti, tak by došlo k odběru především jalového výkonu, což je z hlediska sítě nežádoucí. Proto je nutné použít kompenzační kapacitu (Obr. 2.2).



Obr.2.1 [2]



Obr.2.2 [2]



Obr.2.3 [2]

Na Obr.2.1 je náhradní schéma indukčního zařízení kde L_I představuje indukčnost induktoru, R_I odpor induktoru a vsázka (lze představit jako závit na krátko) má hodnoty L_{II} , R_{II} . Po převedení hodnot vsázky na hodnoty induktoru dostáváme výslednou indukčnost L_I a odpor R_I (Obr.2.2). Z výsledných hodnot L_I, R_I lze vypočítat potřebnou velikost kompenzační kapacity. Kompenzační kapacita musí být proměnná, protože hodnoty L_{II} , R_{II} se v průběhu tavby mění.

Potřebná kapacita kondenzátoru vyjde z rovnic pro proudy I_0, I_1, I_2 a je vyjádřena vztahem (2).

$$C = \frac{L_I}{R_I^2 + (j\omega L_I)^2} \quad [\text{F}, \text{H}, \Omega] \quad (2) [2]$$

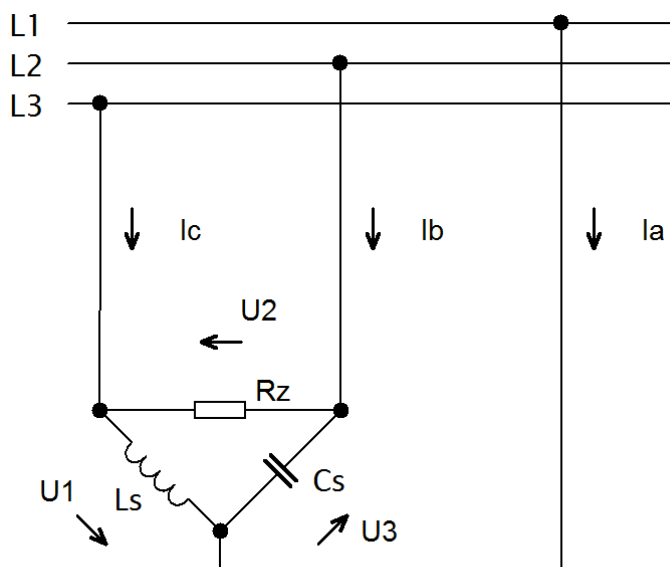
Takto vyladěný obvod (L_I, R_I, C) se z hlediska sítě chová jako činný odpor R_Z (Obr.2.3)

$$R_Z = \frac{U_1}{I_0} = \frac{R_I^2 + (j\omega L_I)^2}{R_I} \quad [\Omega] \quad (3) [2]$$

Tento obvod, je možné využít v závodech, kde je větší množství takovýchto zařízení a je možné je připojit střídavě k různým fázím elektrické sítě. Tam kde využíváme pouze jedno zařízení, nebo se jedná, o zařízení velkého výkonu je vhodné použít symetrizační obvod.[2]

3.1.2 Symetrizace

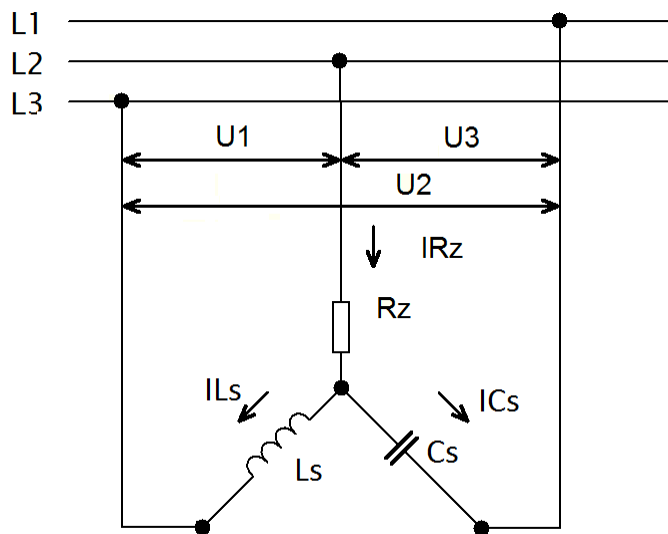
Jedná se o umělou zátěž, jež je složena ze tří větví. V jedné větvi je odpor R_z , který nahrazuje vykompenzované indukční zařízení, v další větvi je vhodně zvolená symetrizační indukčnost L_s a v poslední větvi symetrizační kapacita C_s . Výše zmíněné větve je možné zapojit dvěma způsoby a to do hvězdy, nebo do trojúhelníka.



Obr. 3 [2]

Na obr.3 je symetrizační zařízení v zapojení do trojúhelníka. Velikosti potřebné kapacity a indukčnosti vypočteme ze vztahu (4).

$$L = \frac{\sqrt{3R_z}}{\omega}, C = \frac{1}{\omega\sqrt{3R_z}}, \omega L = \frac{1}{\omega C} = \sqrt{3R_z} \quad [\text{H}, \text{F}, \Omega] \quad (4) [2]$$



Obr.4 [2]

Zapojení do hvězdy se používá pro větší pece jelikož, na induktoru bude třikrát větší napětí, než je napětí fázové.

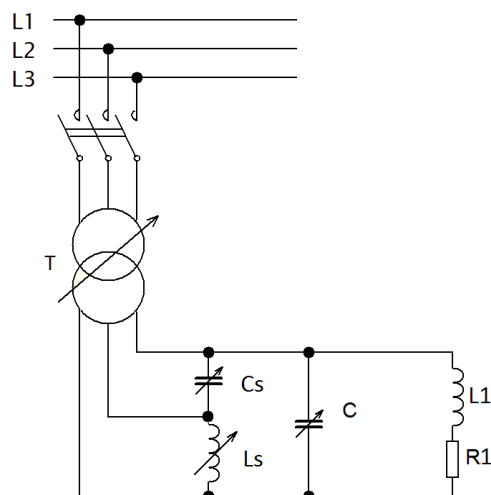
Hodnoty symetrizačního obvodu spočteme podle vztahu (5) [2]

$$L = \frac{R_z}{\sqrt{3}\omega}, C = \frac{\sqrt{3}}{\omega R_z}, \omega L = \frac{1}{\omega C} \quad [\text{H}, \text{F}, \Omega] \quad (5) [2]$$

3.2 Zařízení na síťovou frekvenci

3.2.1 Přímé připojení

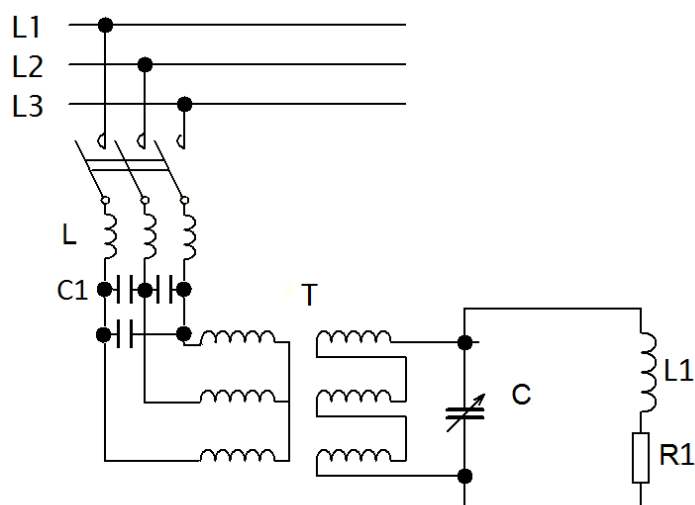
Principiální schéma jednoduchého indukčního zařízení na síťové kmitočty je na Obr.5. Induktor je připojen ke kompenzační baterii \$C\$, která kompenzuje jalový výkon induktoru, ta je připojena k symetrizačnímu obvodu (\$L_s, C_s\$). Tento obvod převádí jednofázovou zátěž na zátěž trojfázovou. Větve symetrizačního obvodu, jsou připojeny k regulačnímu transformátoru \$T\$ a ten je přes výkonový spínač připojen k síti [1].



Obr.5 [1]

3.2.2 Trojnásobič frekvence

Obvod induktoru s kompenzací $L1, R1, C$ je připojen k transformátoru T s přesyceným železným jádrem v zapojení hvězda otevřený trojúhelník, který je připojen přes kondenzátory $C1$ které kompenzují jalovou energii transformátoru, následují tlumivky L které filtrují vyšší harmonické, které by pronikly do sítě a vše je připojeno přes výkonový spínač k síti (obr.6) [1].

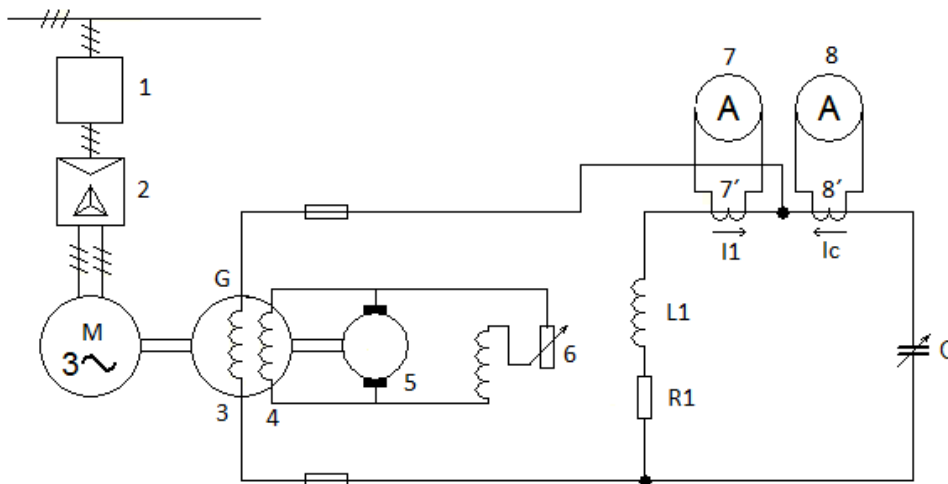


Obr.6 [1]

3.3 Středofrekvenční zařízení

3.3.1 Rotační měniče

Na statoru heteropolárního zubového měniče se nachází budící vinutí napájené stejnosměrným proudem, nad nímž v drážkách směrem k rotoru stroje se nachází pracovní vinutí, v němž vzniká středofrekvenční proud. Rotor má pouze zuby, kterých je polovina oproti drážkám statoru. Nemá žádné vinutí. Rotor i stator je složen z tenkých dynamových plechů. Rotor je poháněn asynchronním motorem, ve chvíli kdy je zub statoru proti zubu rotoru tak vzroste magnetický tok, který následně prudce klesne při pootočení zubu rotoru proti drážce statoru. Opakováním tohoto děje vzniká středofrekvenční proud. Je-li na rotoru X zubů tak $f = Xn/60$, kde n jsou otáčky (min^{-1}). Jako poháněcí stroj se u menších měničů používal asynchronní motor s kotvou nakrátko. U větších zařízení stroj s vinutou kotvou pro jeho možnost řízení otáček a momentu [1].



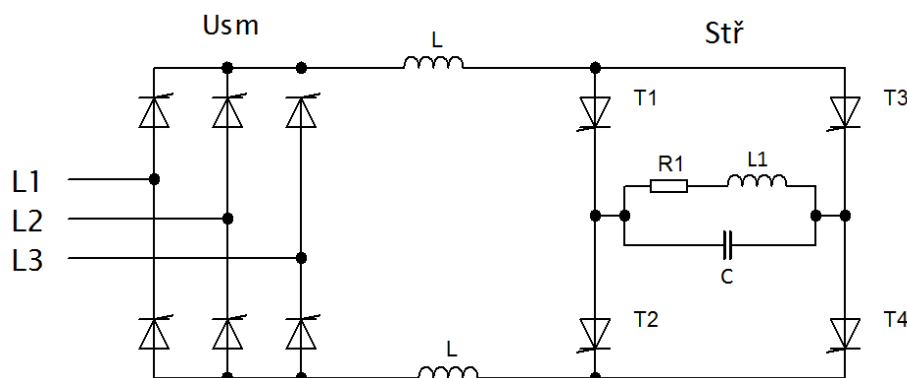
Obr. 7 [2]

Princip zapojení středofrekvenčního rotačního generátoru je na Obr.7. Proud odebíraný ze sítě teče přes výkonový spínač 1 a přepínač hvězda 2 – trojúhelník do asynchronního motoru M . Motor je spojen s rotačním heteropolárním generátorem G . Generátor má budící vinutí 4 a pracovní vinutí 3. Proud pro buzení dodává rotační budič 5 s derivačním regulátorem 6. Pomocí tohoto regulátoru se mění podle potřeby budící proud a tím i napětí naindukované do pracovního vinutí 3. Při tom dochází i ke změně výkonu, který je dodáván do vyladěného obvodu indukčního zařízení $L1$, $R1$, C . Ampérmetry 7 a 8 měří přes měřící

transformátory proudu $7'$ a $8'$ proudy I_I v cívce a I_c v kompenzační kondenzátorové baterii. Při vyladění jsou tyto proudy prakticky stejné [2].

3.3.2 Tyristorový měnič

Tyristorový měnič sestává ze třech základních částí a to z usměrňovače U_{sm} , tlumivek L a střídače $Stř$. Po připojení k síti střídavý proud usměrníme trojfázovým plně řízeným můstkem, který umožňuje invertorový chod. Stejnoseměrný proud je vyhlazen pomocí tlumivek, které navíc slouží k zachycení napěťových rozdílů mezi střídačem a usměrňovačem, a v případě poruchy střídače k omezení zkratového proudu do doby zapůsobení nadproudových ochran.

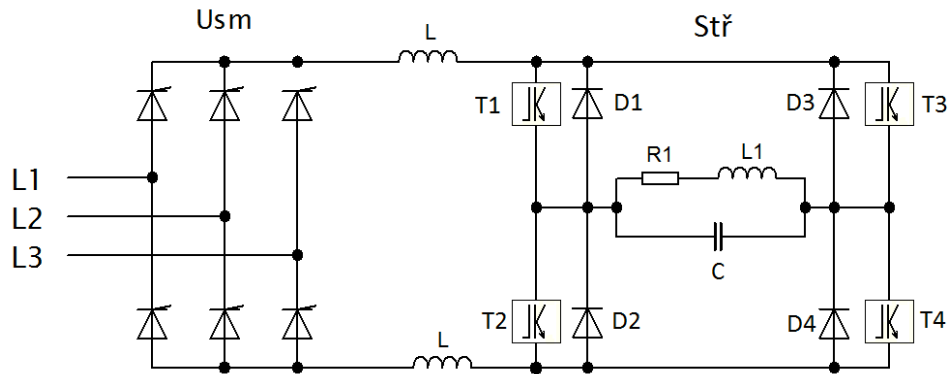


Obr. 8 [1]

Střídavě vedou tyristory $T1$ a $T4$ nebo tyristory $T2, T3$. Při sepnutí první dvojice tyristorů teče proud obdélníkového průběhu cívkou induktoru jedním směrem a při sepnutí druhé dvojice tyristorů teče proud směrem opačným. Spínání je odvozeno z oscilačního obvodu induktoru ($R1, L1, C$) [1].

3.3.3 Tranzistorový středofrekvenční měnič

Síťové napětí se nejprve usměrní v usměrňovači U_{sm} . Následuje vyhlazení proudu indukčností L . Střídavě vedou tranzistory $T1, T4$ nebo $T3, T4$. Při sepnutí první dvojice tranzistorů teče proud jedním směrem a při sepnutí druhé dvojice proud teče směrem opačným. Nulové diody $D1-D4$ slouží k ochraně tranzistorů před zničením.



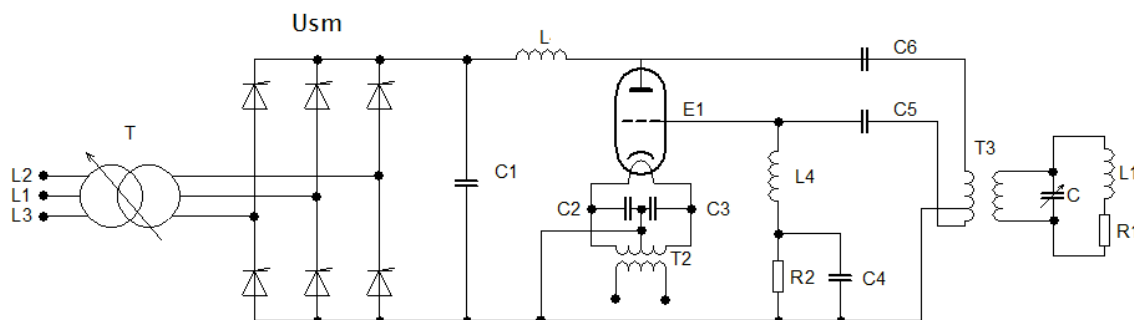
Obr. 9

U moderních tranzistorových měničů je možné plynule měnit frekvenci i napětí což je velice vhodné během tavby a také je možno měnit indukčnosti podle aktuální potřeby technologického procesu [3],[4],[9].

3.4 Vysokofrekvenční měniče

3.4.1 Elektronkový měnič

Na obr.10 je schéma elektronkového vysokofrekvenčního měniče. Kde T představuje regulační transformátor pro usměrňovač, U_{sm} usměrňovací můstek, $C1$ vyhlazovací kondenzátor, L oddělovací tlumivka, $E1$ výkonová trioda, $C2, C3$ kondenzátory sloužící ke zkratování vf složky proudu katody, $T2$ žhavicí transformátor triody, $C6$ oddělovací kondenzátor jenž propouští pouze střídavé vf složky, $C5$ oddělovací kondenzátor pro stejnosměrné mřížkové předpětí triody, jež zároveň umožňuje průtok střídavých vf proudů zpětné vazby na mřížku z vf transformátoru $T3$, $L4$ tlumivka jež zabraňuje zkratování vf mřížkového zpětnovazebního napětí kondenzátorem $C4$, $R2$ rezistor na němž vzniká záporné předpětí mřížky triody, $C4$ filtrační kondenzátor mřížkového předpětí, C kompenzační kondenzátor pro indukční zařízení $L1, R1$. $L1$ indukčnost indukčního zařízení, $R1$ odpor indukčního zařízení. [1].



Obr. 10 [1]

Variants zapojení s elektronkami existuje mnoho, podle nejrůznějších technických a ekonomických hledisek. Zde je uveden pouze základní princip, jelikož elektronkové měniče jsou postupně vytlačovány měniči tranzistorovými.

3.4.2 Tranzistorový vysokofrekvenční měnič

Schéma a princip stejný jako u středofrekvenčního měniče (obr.9), pouze tranzistory IGBT jsou nahrazeny u vysokofrekvenčního měniče tranzistory MOSFET a vlastní provedení střídače je přizpůsobeno vysokým frekvencím se kterými měnič pracuje [7].

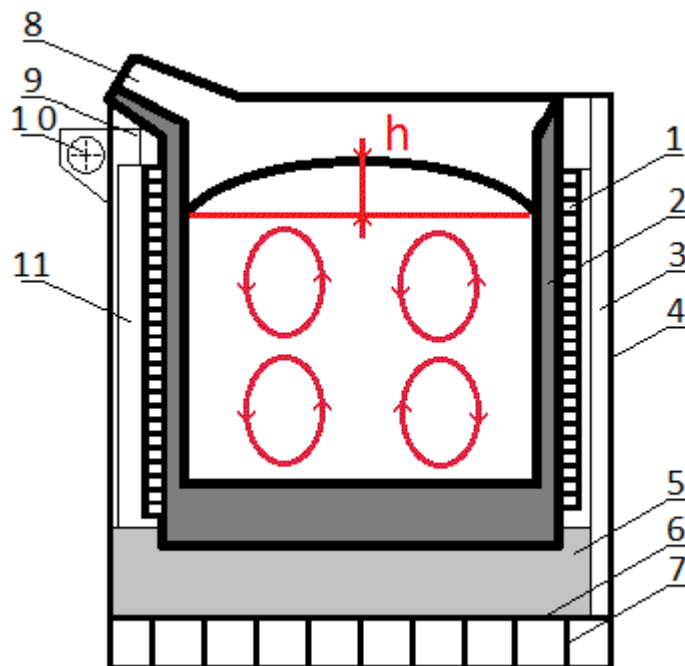
4 Použití pro tavicí kelímkovou pec

4.1 Indukční tavicí kelímková pec s nevodivým kelímkem

Kelímkové pece jsou jednou z nejčastějších aplikací indukčního ohřevu. Konstruují se pro obsah od jednotek kg do stovek tun oceli. V této peci je vsázka umístěna v kelímku, jenž je vytvořen zhotněním a natavením sypkého žárupevného materiálu tzv. výdusky. Materiál pro výdusku se volí různý s ohledem na teploty, případně na specifické vlastnosti vsázky. Následuje tepelná izolace mezi výduskou a induktorem. Induktor ohřívá pouze vsázku, protože kelímkem a tepelná izolace jsou pro elektromagnetické vlnění naprosto průzařné. Při tavbě dochází k víření taveniny vlivem elektrodynamických sil, což je metalurgicky velice vítané, pro homogenizaci vsázky teplotní i materiálovou.

V případě použití měniče se obvykle volí dvě až tři pece pro jeden měnič. Kdy jedna pec udržuje vsázku na požadované teplotě a v druhé peci se spotřebovává většina příkonu měniče k tavbě. V případě použití tří pecí je třetí pec rezervní a obvykle u ní probíhá oprava výdusky která má životnost přibližně 20 až 30 taveb.

Tavbu železné vsázky lze rozdělit na tři části podle toho, v jakém stavu se nachází vsázka. A to na 1) magnetickou kusou, 2) nemagnetickou kusou, 3) nemagnetickou tekutou. U neželezných kovů odpadá bod jedna. Z čehož je patrné že, v průběhu tavby je vhodné měnit kmitočet.



Obr.11 [1]

Na obr.11| je indukční kelímková pec, kde 1 je válcový ohřívací induktor, navinutý jako jednovrstvý obvykle dutým měděným vodičem čtverhranného průřezu, přes který protéká chladící voda, 2 kelímek zadusaný z křemičitého písku, 3 a 9 svazky transformátorových plechů které jsou svisle uspořádány po celém vnitřním obvodu pláště pece, 4 ocelový plášť pece, 5 vyzdívka na dně pece z keramických cihel, 6 stínící měděný plech, který brání vstupu magnetického toku do dna pece, 7 mřížové dno pece, 8 hubice pece pro odlévání, 10 osa, kolem které se otáčí pec při odlévání, 11 středící trámce pro cívku.

4.1.1 Víření taveniny

Síla vyvolaná magnetickým polem vyvolává u stěny kelímku podtlak a ve svislé ose taveniny přetlak. Tavenina se pohybuje ke stěně kelímku vlivem hydrostatických sil a díky síle vyvolané induktorem je tlačena zpět směrem do osy kelímku. Tím dochází k silnému víření taveniny. Vzduť v ose kelímku lze vyjádřit ze vztahu (6).

$$h = K \frac{P_1}{\rho} \sqrt{\frac{\mu_r \gamma}{f}} \quad (6) [1]$$

Kde :	P_1	příkon na jednotku plochy
	K	konstanta
	ρ	hustota vsázky
	μ_r	relativní permeabilita vsázky (u taveniny obvykle $\mu_r = 1$)
	γ	konduktivita vsázky
	f	frekvence proudu v induktoru

Ze vztahu (6) je patrné, že vzduť a tím i intenzita víření roste s příkonem P_1 a s konduktivitou γ a klesá se vzrůstající frekvencí f . Což je limitující zejména pro výkony pecí na síťovou frekvenci.

4.2 Indukční tavící kelímková pec s vodivým kelímkem

V případě tavy dobře elektricky vodivých materiálů je účinnost indukční tavící pece s nevodivým kelímkem poměrně malá, což plyne z toho, že vsázka je ohřívána jouleovým teplem, které je přímo úměrné odporu a druhé mocnině efektivní hodnoty naindukovaných proudů

Pro ohřev těchto materiálů se převážně volí pec s vodivým kelímkem, kde se teplo vytváří v kelímku a z něj se předává vsázce. Jako materiál na kelímky se většinou volí grafit, nebo směs grafitu se šamotem. Tloušťka stěny kelímku závisí na hloubce vniku, optimální je 3a. Z čehož je patrné že pro malé pece je potřebná vysoká frekvence. Na což se jako napájecí zdroje výborně hodí tranzistorové měniče kmitočtu.

4.3 Doba tavy a výrobnost pece

Dobu tavy lze obecně rozdělit na dobu tavení a na dobu dohotovení.

$$\tau = \tau_1 + \tau_2$$

$$\tau_1 - \text{doba tavení} \quad (7)$$

$$\tau_2 - \text{doba dohotovení}$$

Dobu tavení získáme ze vztahu (8).

$$\tau = \frac{iQ}{kP} \quad (8) [8]$$

τ doba tavení [h]

i energi potřebná k roztavení 1t vsázky (500-550kwh/t)

Q hmotnost vázky [t]

P instalovaný výkon měniče [kW]

K koeficient využití měniče

U starších měničů byl koeficient využití měniče k na počátku tavy 0,7 – 0,8 a se stoupající hladinou roztaveného kovu rostl až téměř k 1, u moderních měničů se koeficient k rovná téměř jedné po celou dobu tavení [8].

Pro dosazení do předchozích dvou vztahů vyjde doba tavby přibližně:

Pro 50Hz : doba tavby 120minut

Pro 1000Hz: doba tavby 25 mint

Pro 10kHz: doba tavby 8 minut

Z čehož je patrné, že pec s vyšší frekvencí může mít větší instalovaný výkon a tudíž při stejné výrobnosti může být výrazně menších rozměrů.

Závěr

Čím vyšší frekvence a výkon měniče, tím je vyšší i jeho cena, proto se pro indukční kelímkové pece s nevodivým kelímkem a s obsahem vsázky nad 1t používají převážně měniče kmitočtu s frekvencí v jednotkách kHz. Obvykle se jedná o měnič tyristorový.

U pecí s vodivým kelímkem je frekvence odvozena od tloušťky stěny kelímku a nemůže být příliš zvyšována protože by muselo dojít ke snížení tloušťky kelímku což je možné pouze do té míry, pokud budou zachovány požadované mechanické vlastnosti kelímku. Avšak je možné vyrábět tyto pece velice malé (1 kilogram vsázky), což dříve nebylo možné.

V případě zmíněných malých pecí je nutné využít frekvence takové, aby tloušťka stěny u pecí s vodivým kelímkem, nebo velikost vsázky u pecí s nevodivým kelímkem, odpovídala trojnásobku hloubky vniku. U pecí s obsahem vsázky v jednotkách kilogramů může dosahovat až stovky kHz. Pro tyto účely se hodí vysokofrekvenční tranzistorové měniče.

V dnešní době je stále používáno velké množství vysokofrekvenčních elektronkových měničů, předpokládám že budou postupně nahrazovány měniči tranzistorovými.

Dále předpokládám že nebudou běžně stavěna nová zařízení na síťovou, případně nízkou frekvenci, jelikož tato zařízení potřebují regulační transformátor a velkou kondenzátorovou baterii. Tyto komponenty mohou být nákladnější než pořízení středofrekvenčního měniče. Dále při použití moderních měničů dojde k úspoře nákladů za elektrickou energii, jelikož čím je ohřev rychlejší tím se snižují tepelné ztráty do okolního prostoru pece. Další výhodou rychlejšího ohřevu je, že na roztavení stejného množství vsázky je potřeba mnohem menší pece, což vede k úsporám za stavbu a provoz velké haly a dalšího vybavení slévárny.

Použitá literatura

- [1] Rada, J a kol, Elektrotepelná technika, Praha 1985
- [2] Hradílek, Z a kol, Elektrotepelná zařízení, Praha 1997
- [3] http://www.roboterm.cz/ohrivace_i/menice/tmk_nad100.htm
- [4] <http://www.rajmont.cz/produkty-indukcni-ohrev/>
- [5] <http://www.aceso.cz/banyard/stredofrekvencni-menice>
- [6] Bartoš, V, Elektrické stroje II. Skripta VŠSE Plzeň, 1986
- [7] http://www.robotherm.cz/ohrivace_i/menice/trmk_do250kW.htm
- [8] Fremunt, P. Šimon , J, Tavení oceli v elektrických pecích, Praha 1984
- [9] Vondrášek, F, Výkonová elektronika III, ZČU Plzeň 1998

