

REGULACIJA SINUSNE IZHODNE NAPETOSTI FERORESONANČNEGA TRANSFORMATORJA (I. del)

Rafael Cajhen, Andrej Zupanc, Janko Nastran, Matija Seliger

KLJUČNE BESEDE: ferorezonančni transformatorji, regulacija napetosti, izhodna napetost, sinusna napetost, regulacijska vezja, izračun, električne karakteristike, eksperimentalni rezultati

POVZETEK: V članku je opisana originalna rešitev regulacije sinusne izhodne napetosti ferorezonančnega transformatorja, kar je novost na tem področju.

SINUS OUTPUT VOLTAGE REGULATION OF FERRORESONANT TRANSFORMER (part I)

KEYWORDS: ferroresonant transformers, voltage regulation, output voltage, sinusoidal voltage, control circuits, design, electrical characteristics, experimental results

ABSTRACT: Paper deals with regulation of sinusoidal output voltage of ferroresonant transformer. An original solution is given.

1. UVOD

Klasični ferorezonančni transformator - stabilizator FRT - ima veliko zelo dobrih električnih lastnosti. V prvi vrsti zelo dobro stabilizira izhodno napetost, dobro zmanjšuje električne motnje, ki se pojavljajo v omrežju zaradi preklopnih pojavov in atmosferskih motenj, je robusten in njegovo obratovanje je zelo zanesljivo.

Določene pomankljivosti pa se pokažejo v primeru, ko se zahteva zelo veliko stabilnost izhodne napetosti pri nekoliko večji spremembi frekvence napajalnega izvora (npr. lokalni agregati), večje spremembe vhodne napetosti in pri obremenitvah s kompleksnimi bremenmi. Pri kapacitivni obremenitvi je izhodna napetost večja od nazivne izhodne napetosti in obratno pri induktivni obremenitvi pa je izhodna napetost manjša od nazivne. Tudi faktor moči je zelo dober le pri nazivni vhodni napetosti. Pri večji spremembi vhodne napetosti pa se faktor moči bistveno poslabša, posebno pri relativno majhnih obremenitvah ferorezonančnega transformatorja.

V praksi se je pokazala potreba po ferorezonančnem transformatorju, katerega izhodna napetost bi bila nastavljiva in stabilna ter praktično neodvisna od relativno velike spremembe frekvence napajalnega izvora, relativno velike spremembe vhodne napetosti in sekundarnega bremena. Pri tem pa mora imeti izhodna napetost sinusno obliko z minimalnim nelinearnim popačenjem.

2. PREGLED STANJA V SVETU

Iz razpoložljivega gradiva tujih člankov smo videli, da so se mnogi avtorji ukvarjali z regulacijo izhodne napetosti

ferorezonančnega transformatorja. Pri tem so bile dosežene regulacije izhodne napetosti v relativno širokih mejah, vendar so bila nelinearna popačenja izhodne napetosti tako velika, da so bili ti sistemi uporabni le za usmerniške namene. Pri tem pa so bili doseženi nekateri zelo dobri rezultati glede električnih izkoristkov, faktorja moči itd. Ti sistemi pa niso bili uporabni za napajanje porabnikov, ki zahtevajo sinusno izhodno napetost z minimalnim popačenjem.

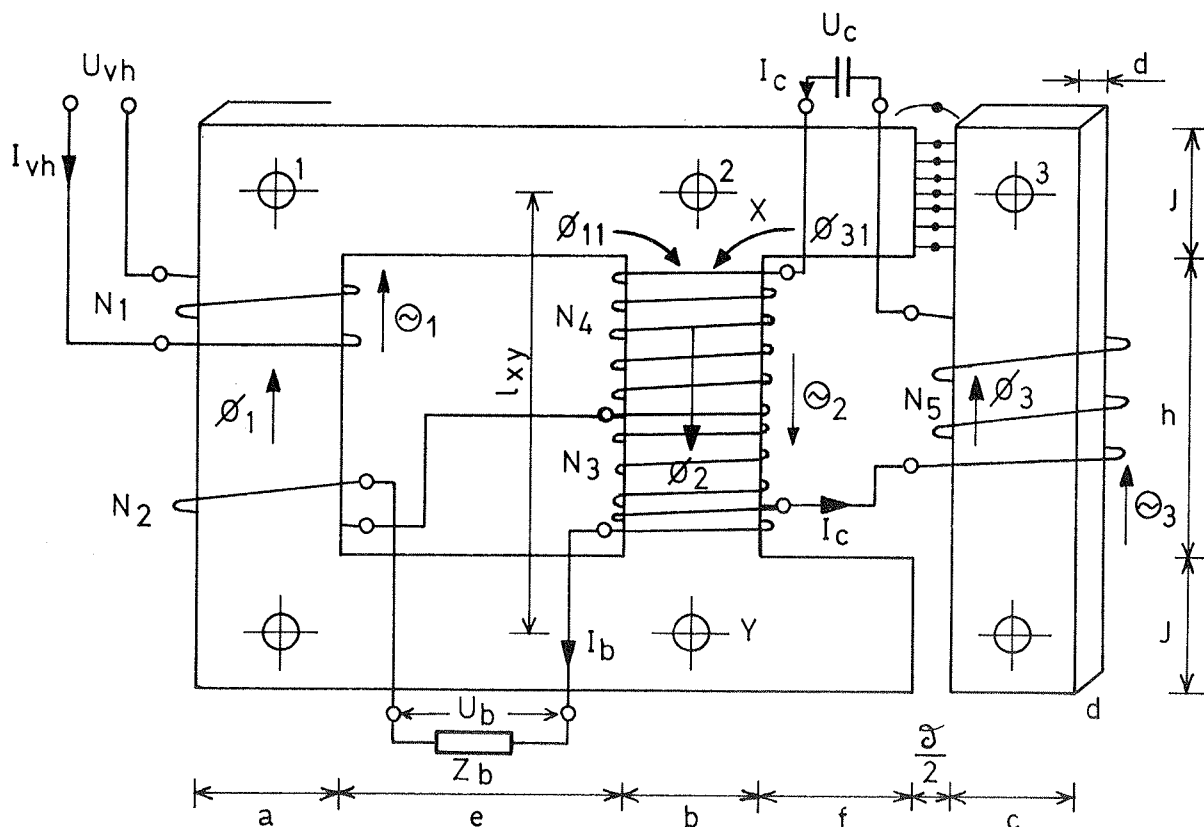
3. KLASIČNI ENOFAZNI FERORESONANČNI TRANSFORMATOR

Osnovnih principov klasičnih ferorezonančnih transformatorjev je veliko. Eden od starejših sistemov je sestavljen iz transformatorja, ki obratuje v nasičenju in ima v seriji z napajalno napetostjo lenarno dušilko s pomožnimi korekcijskimi ovoji.

Paralelno izhodu nasičenega transformatorja sta vgrajena filtra za 3. in 5. harmonsko napetost. Skupna kapacitivnost obeh filterskih kondenzatorjev pa tvori z navitjem nasičenega transformatorja filter za osnovno frekvenco napajalne napetosti.

Nadaljni razvoj ferorezonančnih transformatorjev pa je šel v smeri enotne magnetne izvedbe. Tako je ta sistem izdelan iz tristebernega transformatorja z različnim presekom magnetnih stebrov in pripadajoče zračne reže.

Princip takega sistema vidimo na sliki 1. Na prvem stebri je navito primarno navitje N_1 in korekcijsko navitje



Slika 1: Osnovni princip enofaznega FRT

N_2 . Na srednjem stebru sta naviti sekundarni navitji N_3 in N_4 . Ta steber obratuje v nasičenju. Navitje na tretjem stebru N_5 ima vlogo filterskega navitja. V seriji z navitji N_3 , N_4 in N_5 je priključen kondenzator C , ki tvori z drugim stebrom resonanco za osnovno frekvenco. Prav tako pa učinkuje ta kondenzator kot filter za tretjo harmonsko napetost skupaj z navitjem N_5 .

Sekundarna izhodna napetost U_{izh} se inducira v navitju N_3 . Ta je običajno za cca 10 % večja od nazivne izhodne napetosti, ker je navitje N_3 vezano v seriji s korekcijskim navitjem N_2 , ki je vezano v protifazi.

Osnovni parametri za dimenzioniranje feroresonančnega transformatorja so: vhodna napetost U_{vh} , izhodna napetost U_{izh} , izhodna moč in frekvenca napajalnega izvora. Pri samem dimenzioniranju pa je osnova moč resonančnega kroga. Tako mora biti nazivna moč kondenzatorja, ki je enaka moči resonančnega navitja, približno 2,5 do 4-krat večja od nazivne izhodne moči transformatorja. S tem se doseže dobro stabilizacijo izhodne napetosti in dovolj majhno nelinearno popačenje izhodne napetosti. Ker je moč resonančnega kroga relativno velika bi morala biti kapacitivnost kondenzatorja velika, če naj bi bil ta priključen neposredno na navitje N_4 . Če pa priključimo v serijo z navitjem N_4 še navitje N_3 , se napetost na drugem stebru zelo poveča, s tem pa se hkrati bistveno zmanjša potrebna kapacitiv-

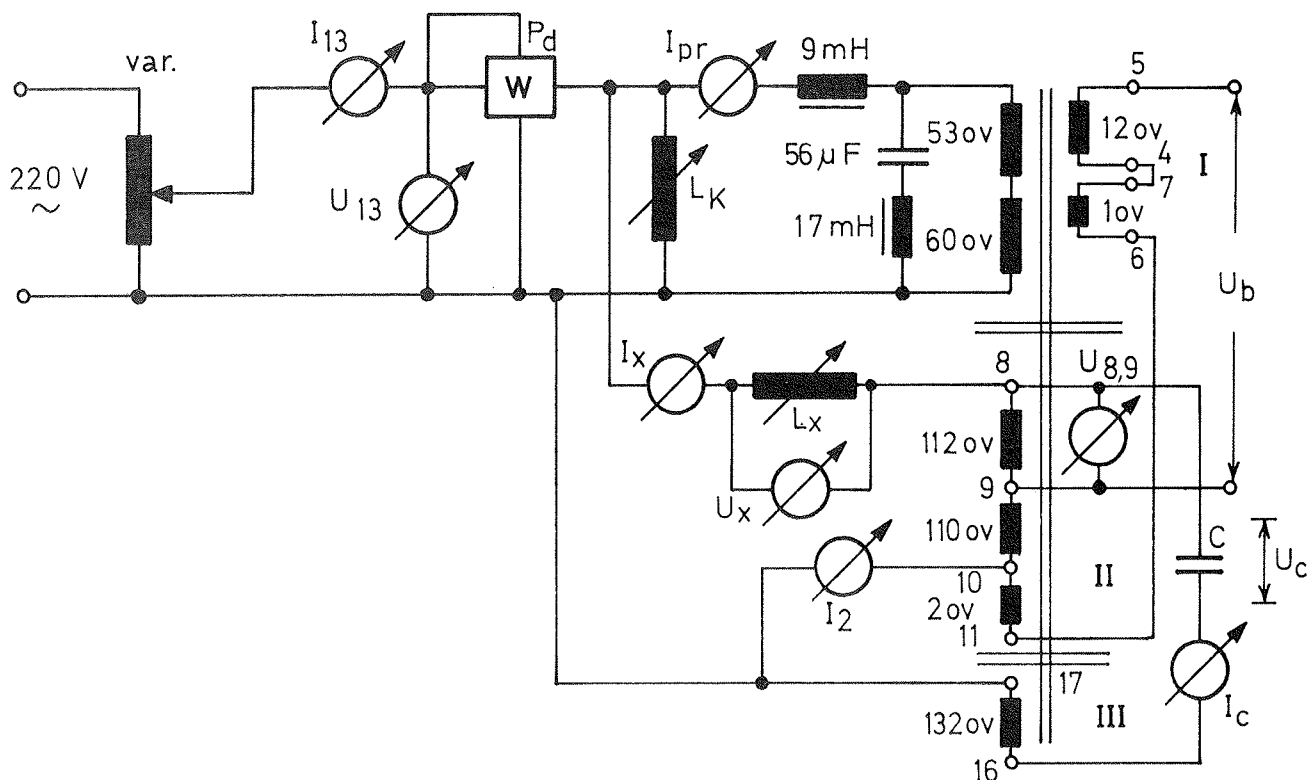
nost kondenzatorja. Ta se manjša s kvadratom porasta sekundarne napetosti.

Navitje N_2 na primarnem stebru služi za popraviljanje izhodne napetosti zaradi spreminjanja vhodne napetosti in bremena, ki bi v obratnem primeru vplivala nekoliko na stabilnost izhodne napetosti.

4. PRINCIP REGULACIJE IZHODNE NAPETOSTI

Na osnovi študija in eksperimentalnih predpoizkusov se je porodila zamisel, da je mogoče spreminjati velikost izhodne napetosti le s spreminjanjem gostote magnetnega polja v resonančnem stebru, ki normalno obratuje v nasičenju. To pa je mogoče doseči s pomočjo pomožne izmenične sinusne napetosti, ki vpliva neposredno na magnetno gostoto resonančnega stebra feroresonančnega transformatorja.

V prvem primeru je bila uporabljena omrežna napetost 220 V. Med navitje resonančnega stebra in omrežno napetostjo je bila priključena dušilka L_x . Velikost dušilke L_x je vplivala na magnetno gostoto resonančnega stebra. Pri tem je iz resonančnega navitja tekel v omrežje kapacitivni tok. Pri relativno majhnih vrednostih induktivnosti dušilke je bil tok skozi dušilko približno enak vsoti toka skozi kondenzator in toka skozi resonančno navitje.



Slika 2: Princip regulacijskega vezja

Pri relativno velikih induktivnostih pa je bil tok kondenzatorja približno enak toku skozi dušilko L_x in toku skozi resonančno navitje N_3 in N_4 . Pri neki določeni induktivnosti dušilke L_x pa je bil tok dušilke približno enak kondenzatorskemu toku. Tok skozi resonančno navitje pa je bil minimalen. Iz tega sledi, da je pri majhnih vrednostih induktivnosti L_x imela glavni vpliv na magnetno gostoto resonančnega kroga pomožna, omrežna napetost. Pri večjih induktivnostih pa je imela bistveni vpliv napetost resonančnega navitja. Izhodna napetost se je v obeh primerih spreminjala v relativno širokih mejah (glej tabelo I). Pri majhnih vrednostih induktivnosti dušilke L_x ni bilo resonančnega efekta, pri večjih vrednostih pa je ostala resonanca ferorezonančnega transformatorja.

5. DIMENZIONIRANJE ELEMENTOV PRI KRMILJENJU IZHODNE NAPETOSTI U_b

Osnova za izračun krmilnih pogojev je magnetilna B , H karakteristika klasičnega ferorezonančnega transformatorja in to karakteristika II. stebra z resonančnim navitjem.

Pri tem nastane vprašanje, kako je mogoče že vnaprej določiti velikost krmilnega toka I_x , oz. velikost krmilne dušilke L_x . V idealiziranih pogojih veljajo naslednje zakonitosti. Pri dimenzioniranju izhajamo iz kondenzatorske napetosti U_c . Želena napetost na resonančnem

navitju U_{cx} je enaka napajalni napetosti na krmilni dušilki L_x , ki ga povzroča krmilni tok I_x

$$U_{cx} = U_{13} + U_x = U_{13} + I_x \cdot \omega \cdot L_x$$

Napetost U_{cx} je enaka omrežni napetosti U_{13} takrat, kadar je induktivnost krmilne dušilke enaka nič ($L_x = 0$.)

Ko izberemo želeno napetost na resonančnem krogu U_{cx} (ta je v našem primeru $U_{cx} \approx 2 \cdot U_{8,9}$, oz. približno dvakrat večja od izhodne napetosti $2 \cdot (U_b + 20 \text{ V})$), izračunamo iz osnovne enačbe ustrezno gostoto B .

$$B = \frac{U_{cx} \cdot \sqrt{2}}{A_{II} \cdot N_c \cdot \omega} \quad (T) \quad (9)$$

Iz magnetilne B, H karakteristike odčitamo za izračunano magnetno gostoto B pripadajočo magnetno poljsko jakost H . S tem pa lahko določimo odgovarjajočo krmilno poljsko jakost H_x . Ta je podana z razliko med maksimalno poljsko jakostjo H_{sat} (pri $B = 2,15 \text{ T}$) in odčitano poljsko jakostjo H_0 .

$$H_x = H_{sat} - H_0 \quad (A/m) \quad (10)$$

To je tista vrednost magnetne poljske jakosti, ki jo mora ustvariti tok I_x pomožnega navitja v resonančnem stebru.

Magnetna poljska jakost H_{sat} je določena z nasičenjem magnetne gostote B . Iz poljske jakosti H_x in dolžine

magnetne poti I_{Fe} ter število ovojjev resonančnega navitja N_0 izračunamo krmilni tok I_x .

$$I_x = \frac{H_x \cdot I_{Fe}}{N_c} \quad (A)$$

(maksimalni tok I_x sledi iz $H_x = 5000 \text{ A/m}$, $I_{sat} \approx 19 \text{ A}$).

Iz napetosti U_{cx} lahko izračunamo velikost kapacitivnega toka.

$$I_c = U_{cx} \cdot \omega \cdot C$$

Prav tako lahko izračunamo tudi razliko med kapacitivnim in krmilnim tokom I_x .

$$dI = I_x - I_c$$

Iz razlike tokov dI lahko sedaj izračunamo navidezno impedanco, kot bi jo imel v tem primeru navidezni odvisno kapacitivni tok. Navidezni kapacitivni tok predstavlja pravzaprav razliko med dejanskim tokom in merjenim tokom. To pot je potrebno izbrati zato, ker imamo v seriji z napajalno omrežno napetostjo induktivnost, ki pa delno kompenzira navidezni kapacitivni tok. Kapacitivnost tega navideznega kondenzatorja določi navidezno kapacitivno impedenco Z_c .

$$Z_c = \frac{U_{cx}}{dI}$$

Prav tako lahko izračunamo impedenco krmilne dušilke Z_L .

$$Z_L = \omega \cdot L_x$$

Tako je skupna impedanca:

$$Z = Z_c - Z_L$$

Padec napetosti na krmilni dušilki L_x je določen iz razlike med želeno resonančno napetostjo U_{cx} in napajalno napetostjo iz omrežja U_{13} .

$$U_x = U_{cx} - U_{13}$$

Tabela I.

	U_{13}	I_{13}	P_d	U_b	U_c	I_c	U_x	I_x	I_{pr}	I_z	$U_{8,9}$
	V	A	W	V	V	A	V	A	A	V	V
a	215	4	160	92	230	6,5	0	12,5	8	6,0	107
b	215	9	180	136	350	10	93	14	5,5	3,4	155
c	215	10,7	200	170	440	12,8	160	13,5	3,3	1,5	190
d	215	7,5	240	204	540	16	220	8,5	1,5	7	223
e	215	4,5	300	92	230	6,5		13			107

U_{13} vhodna napetost
 I_{13} vhodni tok
 P_d vatne izgube praznega teka
 U_b izhodna napetost
 U_c kondenzatorska napetost
 I_c tok kondenzatorja

Iz napetosti U_x in impedanca "Z" lahko izračunamo razliko navideznega toka I_a .

$$I_a = \frac{U_x}{Z}$$

Če sedaj odštejemo od krmilnega toka I_x (to je tok, ki je bil določen iz magnetilne karakteristike) izračunani "kompenzirani" navidezni tok I_a , dobimo realno vrednost krmilnega toka I_x' , ki ga resnično izmerimo in je manjši od izračunanega krmilnega toka I_x iz B,H karakteristike.

$$I_x' = I_x - I_a$$

Pri tem ima lahko impedanca "Z" tudi negativno vrednost, to je v primeru, ko je impedanca Z_L večja od Z_c . To pa se realno dogaja takrat, kadar se velikost dušilke zelo poveča, oz. takrat, ko se želena napetost U_{cx} zelo približuje maksimalni vrednosti.

V primeru da je $L_x = 0$ pa je realni krmilni tok enak razliki med maksimalnim krmilnim tokom in kapacitivnim tokom.

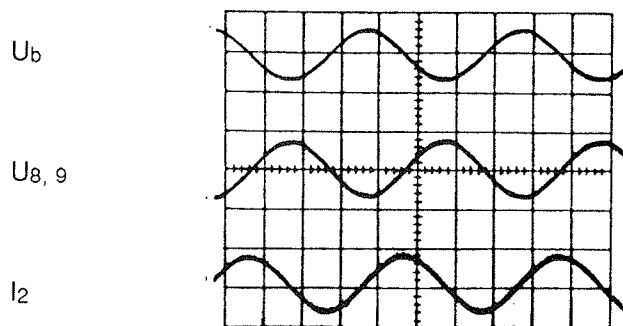
$$I_{sat} - I_c = I_x'$$

V tabeli I so podane izmerjene vrednosti tokov in napetosti na eksperimentalnem feroresonančnem transformatorju moči 3 kVA. Podane vrednosti so izmerjene za različne vrednosti induktivnosti linearnih dušilk L_x . Pri a) je induktivnost $L_x = 0$, pri b) je $L_x = 23 \text{ mH}$, pri c) je $L_x = 45 \text{ mH}$, pri d) je $L_x = 84,5 \text{ mH}$ ter pri e) je $L_x = 0$ in breme pri toku $I_b = 2 \text{ A}$.

Iz tabele lahko vidimo, da se z velikostjo induktivnosti od 0 do 84,5 mH spreminja izhodna napetost od 92 do 240V. Ohmske izgube transformatorja v praznem teku so relativno majhne, saj znašajo od cca 5 do 8 % pri nazivni moči transformatorja 3 kVA.

Obliko tokov in napetosti pa lahko vidimo na osciloskopskih slikah za obremenjeni in neobremenjeni feroresonančni transformator. Iz diagramov se lepo vidi, da ima izhodna napetost U_b lepo sinusno obliko ne glede ali je

U_x padec napetosti na dušilki L_x
 I_x tok dušilke L_x
 I_{pr} primarni tok transformatorja
 I_z tok resonančnega navitja
 $U_{8,9}$ delna napetost resonančnega navitja



sl. 3a

$L_x = 0$

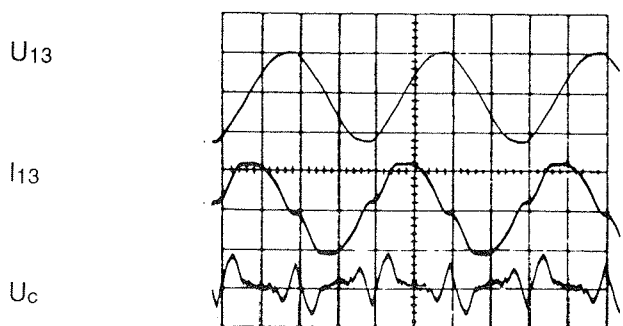
Merilo:

$U_b = 200V/d$

$U_{8,9} = 200V/d$

$I_2 = 10A/d$

$t = 5ms/d$



sl. 3b

$L_x = 0$

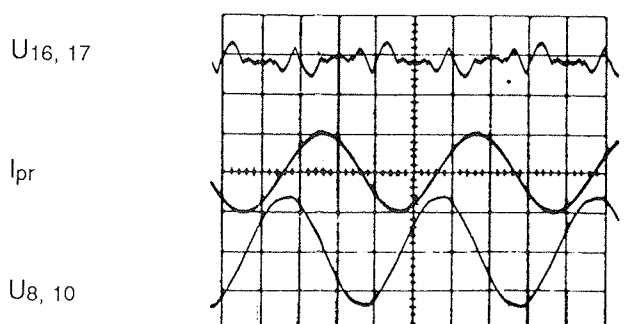
Merilo:

$U_{13} = 200V/d$

$I_{13} = 4A/d$

$U_c = 200V/d$

$t = 5ms/d$



sl. 3c

$L_x = 0$

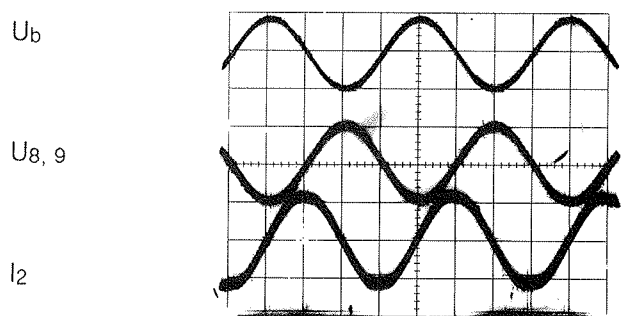
Merilo:

$U_{16,17} = 20V/d$

$I_{pr} = 10A/d$

$U_{8,10} = 200V/d$

$t = 5ms/d$



sl. 4a

$L_x = 23mH$

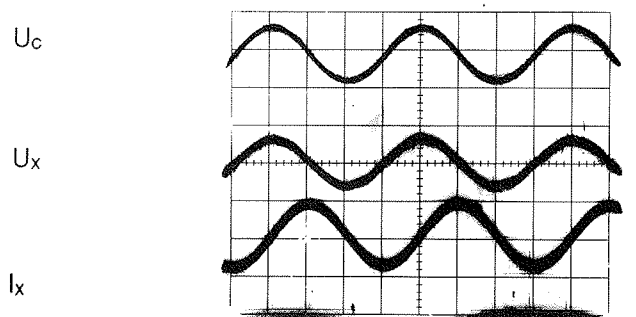
Merilo:

$U_b = 200V/d$

$U_{8,9} = 200V/d$

$I_2 = 4A/d$

$t = 5ms/d$



sl. 4b

$L_x = 23mH$

Merilo:

$U_c = 500V/d$

$U_x = 200V/d$

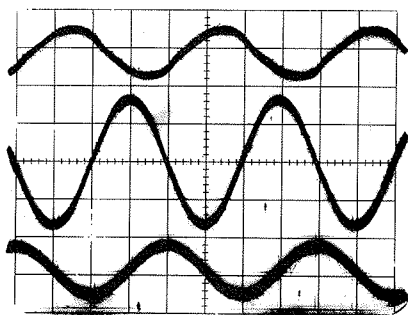
$I_x = 20A/d$

$t = 5ms/d$

$U_{16, 17}$

$U_{8, 10}$

I_{pr}



sl. 4c

$L_x = 23\text{mH}$

Merilo:

$U_{16, 17} = 200\text{V/d}$

$U_{8, 10} = 200\text{V/d}$

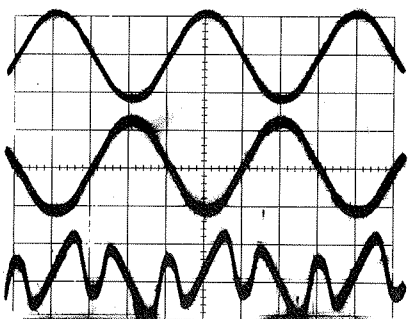
$I_{pr} = 10\text{A/d}$

$t = 5\text{ms/d}$

U_b

$U_{8, 9}$

I_2



sl. 5a

$L_x = 45\text{mH}$

Merilo:

$U_b = 200\text{V/d}$

$U_{8, 9} = 200\text{V/d}$

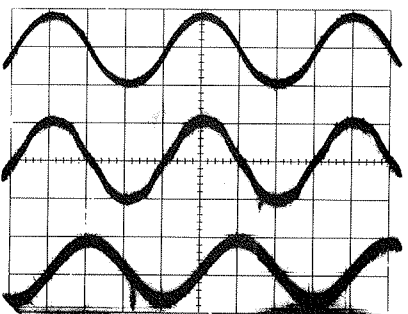
$I_2 = 2\text{A/d}$

$t = 5\text{ms/d}$

U_c

U_x

I_x



sl. 5b

$L_x = 45\text{mH}$

Merilo:

$U_c = 500\text{V/d}$

$U_x = 200\text{V/d}$

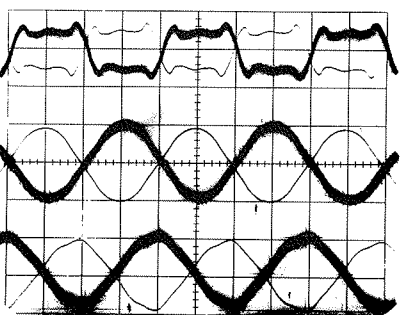
$I_x = 20\text{A/d}$

$t = 5\text{ms/d}$

$U_{16, 17}$

$U_{8, 10}$

I_{pr}



sl. 5c

$L_x = 45\text{mH}$

Merilo:

$U_{16, 17} = 100\text{V/d}$

$U_{8, 10} = 500\text{V/d}$

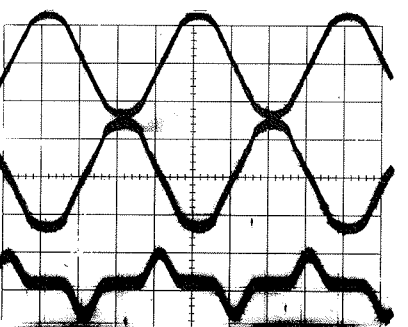
$I_{pr} = 4\text{A/d}$

$t = 5\text{ms/d}$

U_b

$U_{8, 9}$

I_2



sl. 6a

$L_x = 84,5\text{mH}$

Merilo:

$U_b = 200\text{V/d}$

$U_{8, 9} = 200\text{V/d}$

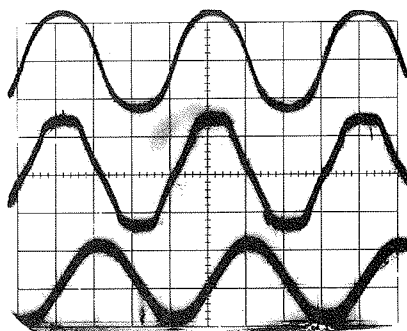
$I_2 = 20\text{A/d}$

$t = 5\text{ms/d}$

U_c

U_x

I_x



sl. 6b

$L_x = 84,5\text{mH}$

Merilo:

$U_c = 500\text{V/d}$

$U_x = 200\text{V/d}$

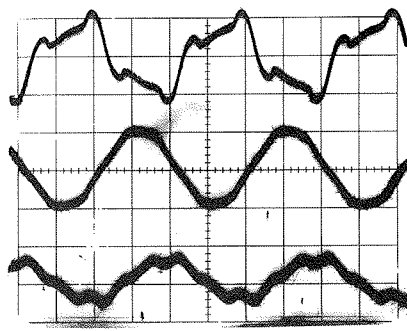
$I_x = 10\text{A/d}$

$t = 5\text{ms/d}$

$U_{16, 17}$

$U_{8, 10}$

I_{pr}



sl. 6c

$L_x = 84,5\text{mH}$

Merilo:

$U_{16, 17} = 200\text{V/d}$

$U_{8, 10} = 500\text{V/d}$

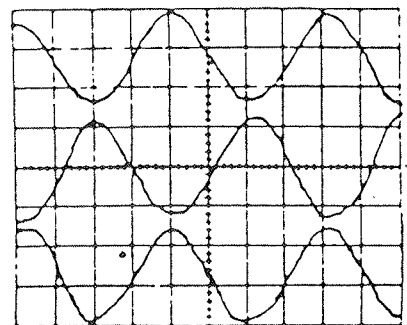
$I_{pr} = 4\text{A/d}$

$t = 5\text{ms/d}$

U_b

$U_{8, 9}$

I_b



sl. 7a

$L_x = 0$

breme

Merilo:

$U_b = 100\text{V/d}$

$U_{8, 9} = 100\text{V/d}$

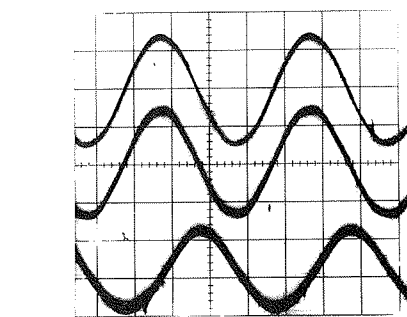
$I_b = 2\text{A/d}$

$t = 5\text{ms/d}$

U_c

U_{13}

I_2



sl. 7b

$L_x = 0$

breme

Merilo:

$U_c = 200\text{V/d}$

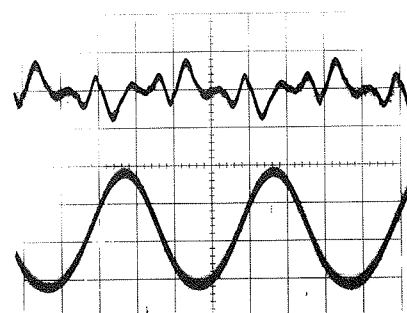
$U_{13} = 200\text{V/d}$

$I_2 = 4\text{A/d}$

$t = 5\text{ms/d}$

$U_{16, 17}$

I_{pr}



sl. 7c

$L_x = 0$

breme

Merilo:

$U_{16, 17} = 20\text{V/d}$

$I_{pr} = 4\text{A/d}$

$t = 5\text{ms/d}$

sistem v resonanci ali pa ne in to pri vseh vrednostih induktivnosti L_x .

6. PRAKTIČNI REZULTATI NA EKSPERIMENTALNEM MODELU

Na eksperimentalnem modelu FRT 3 kVA, $U_{vh} = 220$ V, 50 Hz, so bili primerjani rezultati izračunanih in merjenih vrednosti. Dobljeni rezultati potrjujejo pravilnost postavljenih teoretičnih predpostavk. Minimalna odstopanja izmerjenih in izračunanih vrednosti pripisujemo napakam merilnih postopkov zaradi nelinearnih veličin.

7. OSCILOSKOPSKI POSNETKI TOKOV IN NAPETOSTI

V nadaljnjem so podane osciloskopske slike za različne vrednosti krmilnih dušilk L_x . Na slikah 3a, 3b in 3c so podani diagrami za krmilno induktivnost $L_x = 0$. Na slikah 4a, 4b in 4c so diagrami za $L_x = 23$ mH. Na slikah 5a, 5b in 5c so diagrami za $L_x = 45$ mH. Na slikah 6a, 6b in 6c so diagrami za $L_x = 84,5$ mH. Na slikah 7a, 7b in 7c so diagrami za vrednosti $L_x = 0$ pri obremenjenem feroresonančnem transformatorju.

Iz diagramov se lepo vidi, da je izhodna napetost U_b lepe sinusne oblike (ne glede ali smo v resonanci ali ne) pri vseh vrednostih L_x (prazni tek ali obremenitev). Tok I_{13} prehiteva pri vseh vrednostih L_x napetost U_{13} .

Fazni premik, ki nastopi med I_c in I_{pr} narašča z večanjem krmilne induktivnosti L_x . Tok I_x je v nasprotni fazi z I_{pr} in je to najbolj izrazito, ko je L_x enak nič. Z večanjem krmilne induktivnosti L_x se ta efekt manjša, ker se spreminja faza primarja I_{pr} .

V prvem primeru ima I_{pr} induktivni karakter, ki se pa z večanjem L_x manjša. Iz tega sledi, da sta I_{13} in I_{pr} premaknjena (I_{13} prehiteva tok I_{pr}), kar velja za $L_x = 0$. Ko L_x narašča se kot manjša in sta v ekstremu v fazi.

Za tabelo I velja za vse primere, da tok I_x teče v nihajni krog in je kapacitivnega karakterja, prehiteva vhodno napetost U_{13} . Skupni tok I_{13} je v vseh teh primerih tudi kapacitivnega karakterja, I_{pr} pa induktivnega karakterja.

Naredili smo preizkus, da smo izklopili primarno navitje in serijski filter za tretjo harmonsko komponento (tok I_x

je bil kapacitiven, če je bil priključen resonančni kondenzator). Pri izključitvi tega kondenzatorja pa je tekel relativno majhen tok, ampak induktivnega karakterija (tok je tekel v navitje sekundarja -II. steber). Iz tega sledi, da pri normalnem delovanju inducira primarna napetost dodaten (navidezni) tok I_a , ki pa je znatno večji od prej določenega I_2 (tok navitja II. stebra).

Primer meritve, kjer je $L_x = 84,5$ mH, je I_x še vedno relativno velik (8,5 A), medtem ko je vpliv I_{pr} relativno majhen (1,5 A). V tem primeru je tok I_{pr} za pokrivanje ohmskih izgub FRT.

Opisani sistem v bistvu zadošča osnovnim zahtevam glede možne regulacije izhodne sinusne napetosti z minimalnim nelinearnim popačenjem. Kljub temu pa ima ta sistem dve pomanjkljivosti. Izhodna napetost je v tem primeru potencialno povezana z vhodno omrežno napetostjo. Druga pomanjkljivost pa je ta, da je potrebno jalovo moč kompenzirati na primarni strani feroresonančnega transformatorja z ustrezno dušilko. Induktivnost (kompenzirana) za vse primere ni konstantna, temveč bi jo bilo potrebno prilagajati različnim delovnim pogojem.

Zaradi teh pomankljivosti je bil nadaljni študij usmerjen v njihovo odpravljanje. Težišče dela je bilo med drugim predvsem na možni avtomatski kompenzaciji reaktivnih moči v samem transformatorju. Opis te rešitve, ki podaja zelo dobre rezultate bo podan v naslednjem članku.

prof. dr. Rafael Cajhen, dipl. ing.
Fakulteta za elektrotehniko in računalništvo,
Tržaška 25, Ljubljana

dr. Andrej Zupanc, dipl. ing.
IMP
Titova 37, Ljubljana

doc. dr. Janko Nastran, dipl. ing.,
Fakulteta za elektrotehniko in računalništvo,
Tržaška 25, Ljubljana

prof. dr. Matija Seliger, dipl. ing.
Fakulteta za elektrotehniko in računalništvo,
Tržaška 25, Ljubljana

Prispelo: 21.02.91 Sprejeto: 28.03.91