

REGULACIJA SINUSNE IZHODNE NAPETOSTI FERORESONANČNEGA TRANSFORMATORJA (II. del)

Andrej Zupanc, Rafael Cajhen, Janko Nastran, Matija Seliger

KLJUČNE BESEDE: feroresonančni transformatorji, regulacija napetosti, izhodna napetost, sinusna napetost, regulacijska vezja, matematični model, eksperimentalni rezultati

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

SINUS OUTPUT VOLTAGE REGULATION OF FERORESONANT TRANSFORMER (part II.)

KEY WORDS: feroresonant transformers, voltage control, output voltage, sinusoidal voltage, control circuits, mathematical model, experimental results

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

8. ZAHTEVA ZA AVTOMATSKO KOMPENZACIJO REAKTIVNE MOČI

V prvem delu članka je bil podan osnovni princip regulacije sinusne izhodne napetosti feroresonančnega transformatorja. Navitje na resonančnem stebru je bilo priključeno v seriji za regulacijsko dušilko neposredno na omrežno napetost. Pri tem sta se pojavili dve pomanjkljivosti. Glavna pomanjkljivost je uporaba dodatne dušilke za kompenzacijo reaktivne moči. Ta dušilka mora biti relativno velika in njena induktivnost se mora stalno prilagajati krmilnim pogojem. Prav tako je izhodna napetost neposredno povezana z omrežno napetostjo.

Zato je bil nadaljni študij namenjen predvsem vprašanju avtomatske kompenzacije reaktivne moči brez dodatne in spremenljive kompenzacije dušilke. Hkrati pa bo morala biti dosežena resonanca feroresonančnega

transformatorja z omrežno frekvenco pri vseh delovnih pogojih.

Raziskano je bilo več teoretičnih možnosti. Izdelan je bil matematični model, ki daje zadovoljivo rešitev. Osnova, da bi dosegli zahtevani pogoj, je bila relativno preprosta. Efektivni tok kondenzatorja I_c v resonančnem krogu mora biti v vseh primerih enak efektivnemu toku regulacijske dušilke I_x in efektivnemu toku skozi resonančno navitje I_2 . Pri tem velja

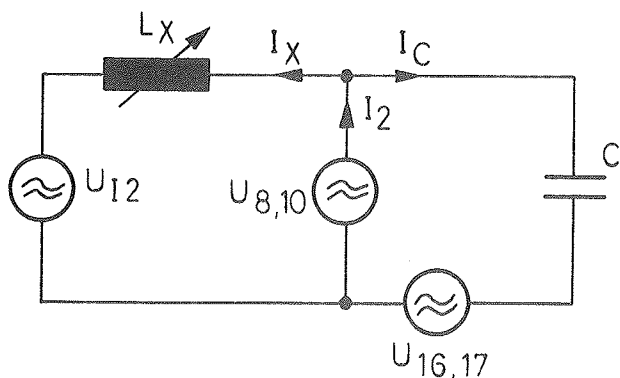
$$I_c = I_x + I_2$$

Na sliki 8 vidimo idejno skico, ki ponazarja postavljene zahteve

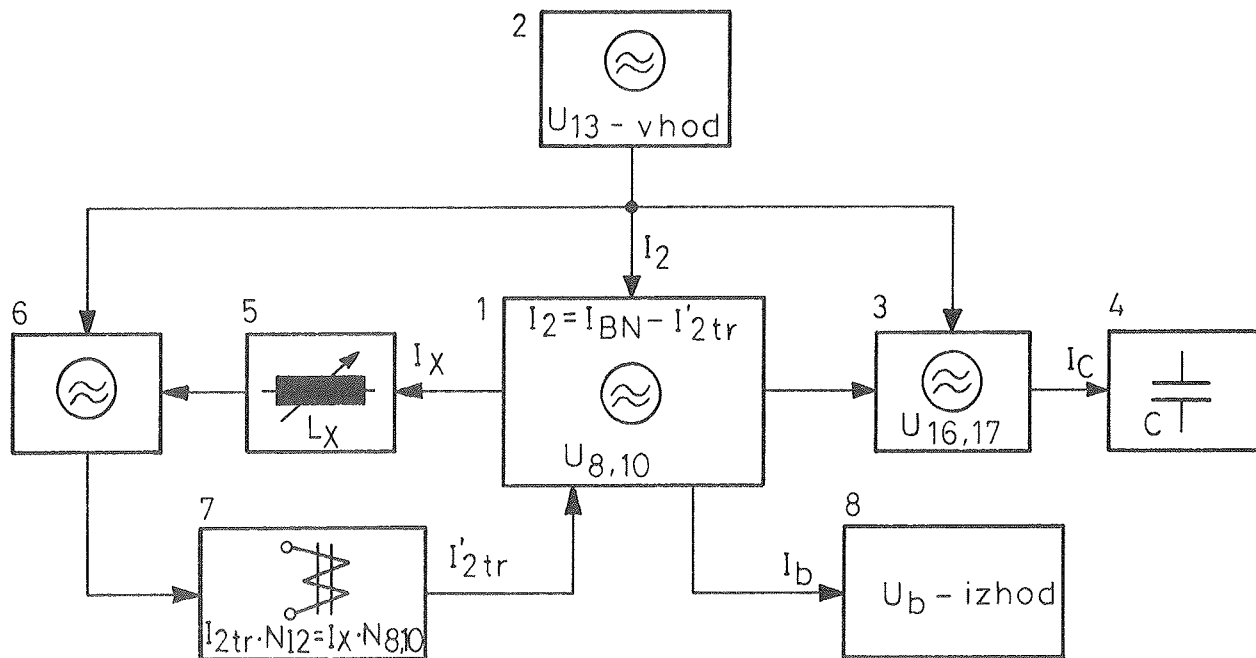
9. PRINCIP DELOVANJA

Na sliki 9 vidimo v nekoliko poenostavljeni obliki potek krmiljenja feroresonančnega transformatorja.

Pri regulaciji izhodne sinusne napetosti ima glavno težo enota 1. To je v bistvu generator resonančne napetosti $U_{8,10}$, katere velikost se spreminja s krmilnimi pogoji. Ta enota se transformatorsko napaja iz vhodne omrežne napetosti U_{13} (enota 2). Ta napetost poganja v resonančnem navitju tok I_{BH} , ki je v skladu z magnetilno BH karakteristiko resonančnega stebra v nasičenju. Generator napetosti $U_{8,10}$ poganja v seriji z generatorjem $U_{16,17}$ (enota 3) kapacitivni tok I_c v enoto 4.



Slika 8. Idejna shema



Slika 9. Blokovna shema krmiljenja FRT

Generator napetosti $U_{8,10}$ poganja hkrati tudi krmilni tok I_x skozi enoto 5 (L_x) v enoto 6. Enota 6 je pomožni generator napetosti U_{12} (pomožno navitje na primarnem stebru). Iz generatorja U_{12} se generira tok prek enote 7 vsiljeni povratni tok I'_{2tr} nazaj v enoto 1. Povratni tok I'_{2tr} ima kapacitivni značaj in vpliva na velikost napetosti $U_{8,10}$ in na tok resonančnega navitja I_2 . S spreminjanjem velikosti napetosti $U_{8,10}$ se neposredno spreminja tudi izhodna napetost U_b . Enota 8 predstavlja krmiljeno sinusno izhodno napetost U_b , ki je določena z velikostjo krmilnega toka I_x odnosno induktivne upornosti L_x .

S tem je dosežen pogoj za krmiljenje ferorezonančnega transformatorja, ki obratuje vedno v resonanci in doseže avtomatsko kompenzacijo reaktivne moči.

10. OSNOVNE ZAKONITOSTI

V članku niso podane podrobne matematične analize, ki so bile potrebne, da dobimo osnovne matematične zakonitosti. Pri točnih izračunih je potrebno upoštevati tudi določene omejitve in realne oblike tokov napetosti ferorezonančnega transformatorja.

Enostavne matematične rešitve modela z naslednjimi enačbami, so podane v tabeli II.

$$I_c = I_x + I_2 = I_x + I_{BH} - I'_{2tr} = I_x + I_{BH} - I_x \cdot \frac{N_{12}}{N_{8,10}}$$

$$I'_{2tr} \cdot N_{8,10} = I_x \cdot N_{12} \text{ iz tega sledi } I'_{2tr} = I_x \cdot \frac{N_{12}}{N_{8,10}}$$

$$I_x = \frac{I_c - I_{BH}}{1 - N_{12}/N_{8,10}}$$

$$\text{tok izrazimo tudi z } I_x = \frac{U_{8,10} - U_{12}}{\omega \cdot L_x}$$

$$\text{Induktivnost } L_x = \frac{U_{8,10} - U_{12}}{\omega \cdot L_x}$$

Tok $I_{BH} = f(U_{8,10})$; kondenzatorski tok $I_c = U_c \cdot \omega \cdot C$

- k napetostni faktor $U_c/U_{8,10}$
- N_{12} pomožno navitje na primarnem stebru I
- $N_{8,10}$ resonančno navitje na stebru II
- I'_{2tr} transformirani tok pomožnega navitja na primarnem stebru I
- I_{BH} tok v resonančnem navitju v skladu z BH karakteristiko
- $U_{8,10}$ napetost resonančnega navitja (steber II)
- U_{12} napetost pomožnega navitja na primarnem stebru I

V tabeli II. so podane izračunane vrednosti različnih tokov in napetosti krmiljenega ferorezonančnega transformatorja moči 3kVA v odvisnosti od velikosti resonančne napetosti $U_{8,10}$. Ta pa je v neposredni zvezi z velikostjo izhodne sinusne napetosti U_b .

Izračunane vrednosti tokov in napetosti v tabeli II se dobro ujemajo z izmerjenimi vrednostmi na modelu 3kVA.

$U_{8,10}$	k	I_{BH}	I_c	I_x	I'_{2r}	I_2	L_x	U_c
V		A	A	A	A	A	mH	V
100	1.02	0	3.20	7.32	4.13	-4.13	-65.2	102.0
120	1.02	0.05	3.84	8.68	4.88	-4.83	-47.6	122.4
140	1.02	0.07	4.48	10.10	5.68	-5.61	-34.7	142.8
160	1.02	0.09	5.12	11.52	6.48	-6.39	-24.8	163.2
180	1.02	0.10	5.76	12.70	7.15	-7.05	-17.5	183.6
200	1.02	0.14	6.40	14.33	8.07	-7.93	-11.1	204.0
300	1.05	0.70	9.89	21.03	11.84	-11.14	9.8	315.0
325	1.05	1.00	10.71	22.23	12.52	-11.52	10.7	341.2
350	1.10	2.00	12.09	23.10	13.00	-11.00	13.8	385.0
375	1.13	4.00	13.30	21.29	11.99	-7.99	18.7	423.7
400	1.15	6.50	14.44	18.18	10.23	-3.73	26.3	460.0
425	1.16	9.50	15.48	13.68	7.70	1.80	40.7	493.0
450	1.22	12.80	17.24	10.16	5.72	7.08	62.7	549.0
480	1.25	18.00	18.84	1.92	1.08	16.92	381.0	600.0

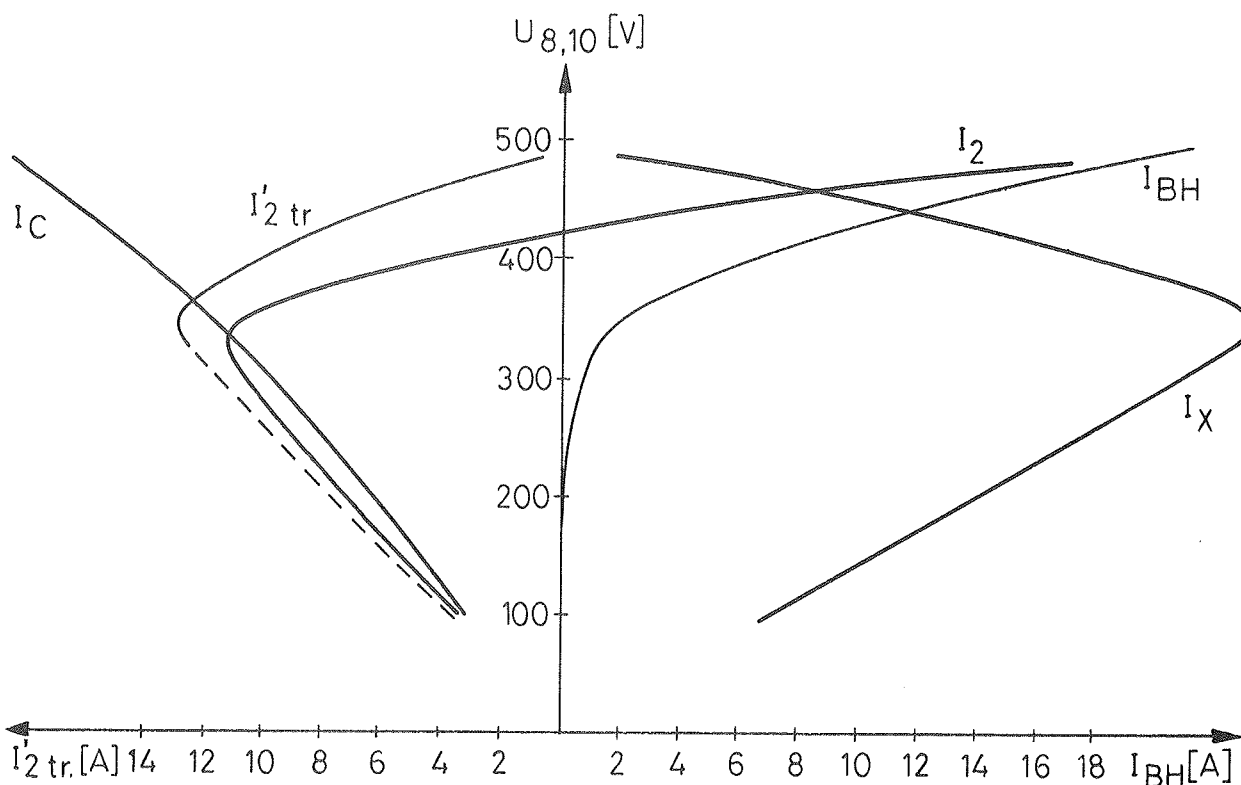
Tabela II

11. GRAFIČNI PRIKAZ TOKOV

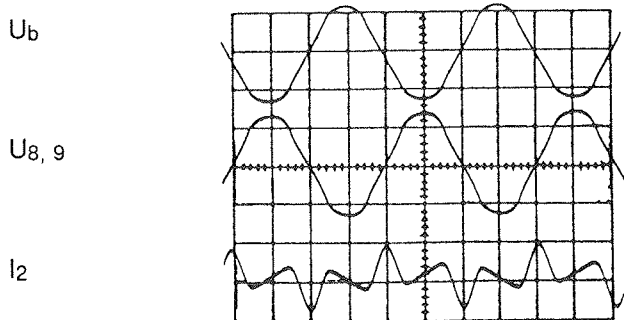
S slike 10 lahko vidimo, da se določeni tokovi nahajajo v prvem kvadrantu (I_x, I_{BH}) in v četrtem kvadrantu (I_c, I'_{2r}).

Tok I_2 pa se nahaja najprej v četrtem in nato v prvem kvadrantu. Pri določeni napetosti resonančnega kroga $U_{8,10}$ pa je tok resonančnega navitja praktično nič.

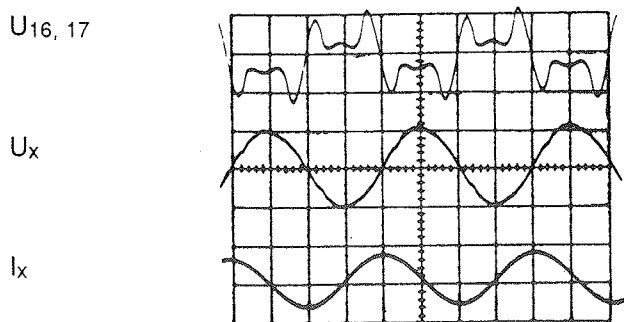
Tok I_{BH} je magnetilni tok resonančnega stebra, ki bi tekkel v primeru nekrmljenega feroresonančnega transformatorja. V kvadrantu IV. vidimo potek kondenzatorskega toka I_c kot funkcijo generatorjev napetosti $U_{8,10}$ in $U_{16,17}$. Potek krmilnega toka I_x kot funkcije generatorske napetosti $U_{8,10}$, oz. velikosti krmilne induktivnosti L_x pa vidimo v kvadrantu I. Potek toka I_x je pogojen tudi z izbrano pomožno generatorsko napetostjo U_{12} na primarnem



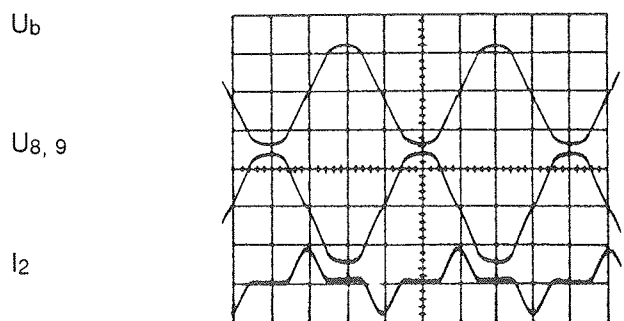
Slika 10. Potek tokov v odvisnosti od napetosti $U_{8,10}$



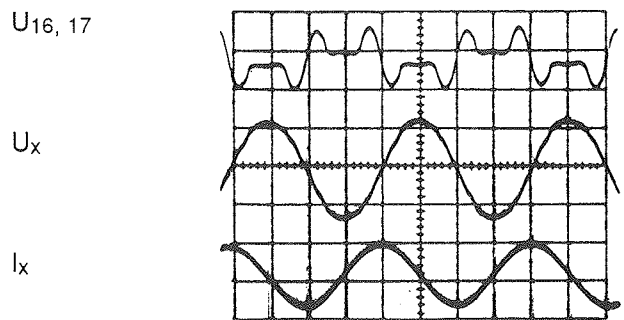
sl. 11a Merilo:
 $L_x = 45\text{mH}$
 $U_b = 200\text{V/d}$
 $U_{8,9} = 200\text{V/d}$
 $I_2 = 10\text{A/d}$
 $t = 5\text{ms/d}$



sl. 11b Merilo:
 $L_x = 45\text{mH}$
 $U_{16,17} = 100\text{V/d}$
 $U_x = 200\text{V/d}$
 $I_x = 20\text{A/d}$
 $t = 5\text{ms/d}$



sl. 11c Merilo:
 $L_x = 84,5\text{mH}$
 $U_b = 200\text{V/d}$
 $U_{8,9} = 200\text{V/d}$
 $I_2 = 20\text{A/d}$
 $t = 5\text{ms/d}$



sl. 11d Merilo:
 $L_x = 84,5\text{mH}$
 $U_{16,17} = 200\text{V/d}$
 $U_x = 200\text{V/d}$
 $I_x = 10\text{A/d}$
 $t = 5\text{ms/d}$

Slika 11. Osciloskopski posnetki tokov in napetosti FRT (sliki a in b za $L_x = 45\text{mH}$, sliki c in d za $L_x = 84,5\text{mH}$)

stebru ferorezonančnega transformatorja. Napetosti $U_{8,10}$ in U_{12} sta fazno premaknjeni za 180° . Ta induktivni tok I_x vsiljuje v pomožni generator U_{12} tok, ki pa je zanj kapacitivnega značaja. Magnetna napetost, ki je podana z produktom $I_x \cdot N_{12}$ (N_{12} je število pomožnih ovojev na primernem stebru), transformira na resonančni steber magnetno napetost, ki je podana s tokom I'_{2tr} in število ovojev $N_{8,10}$.

$$I_x \cdot N_{12} = I'_{2tr} \cdot N_{8,10}$$

Tok I'_{2tr} ima kapacitivni značaj, zato se nahaja v IV. kvadrantu. Tok resonančnega navitja I_2 pa je določen z razliko tokov

$$I_2 = I_{BH} - I'_{2tr}$$

Kot vidimo iz diagrama ima tok I_2 pri majhni induktivnosti krmilne dušilke L_x kapacitivni značaj (negativno vrednost nasproti magnetilnemu toku I_{BH}), pri večjih vrednostih L_x pa ima induktivni.

12. OSCILOSKOPSKI POSNETKI

Opisani potek tokov in napetosti potrjujejo tudi naslednji osciloskopski posnetki.

Na sliki 11 je podano le nekaj značilnih osciloskopskih posnetkov različnih tokov in napetosti na ferorezonančnem transformatorju. Tu vidimo časovni potek tokov resonančnega navitja I_2 v primerjavi s krmilnim tokom I_x za krmilni induktivnosti $L_x = 45 \text{ mH}$ in 84.5 mH .

Tokova I_2 sta v obeh primerih popačena, vendar premaknjena med seboj za približno 180° el. To pomeni, da ima tok I_2 v prvem primeru kapacitivni in v drugem induktivni značaj. Velikosti tokov so v obeh primerih različne, kot se to ujema z izračunanimi vrednostmi.

Na slikah tudi vidimo obliko izhodne napetosti U_b , resonančne napetosti $U_{8,9}$ napetosti na filterskem navitju $U_{16,17}$ in napetost na krmilni dušilki U_x .

13. REALNI MODEL

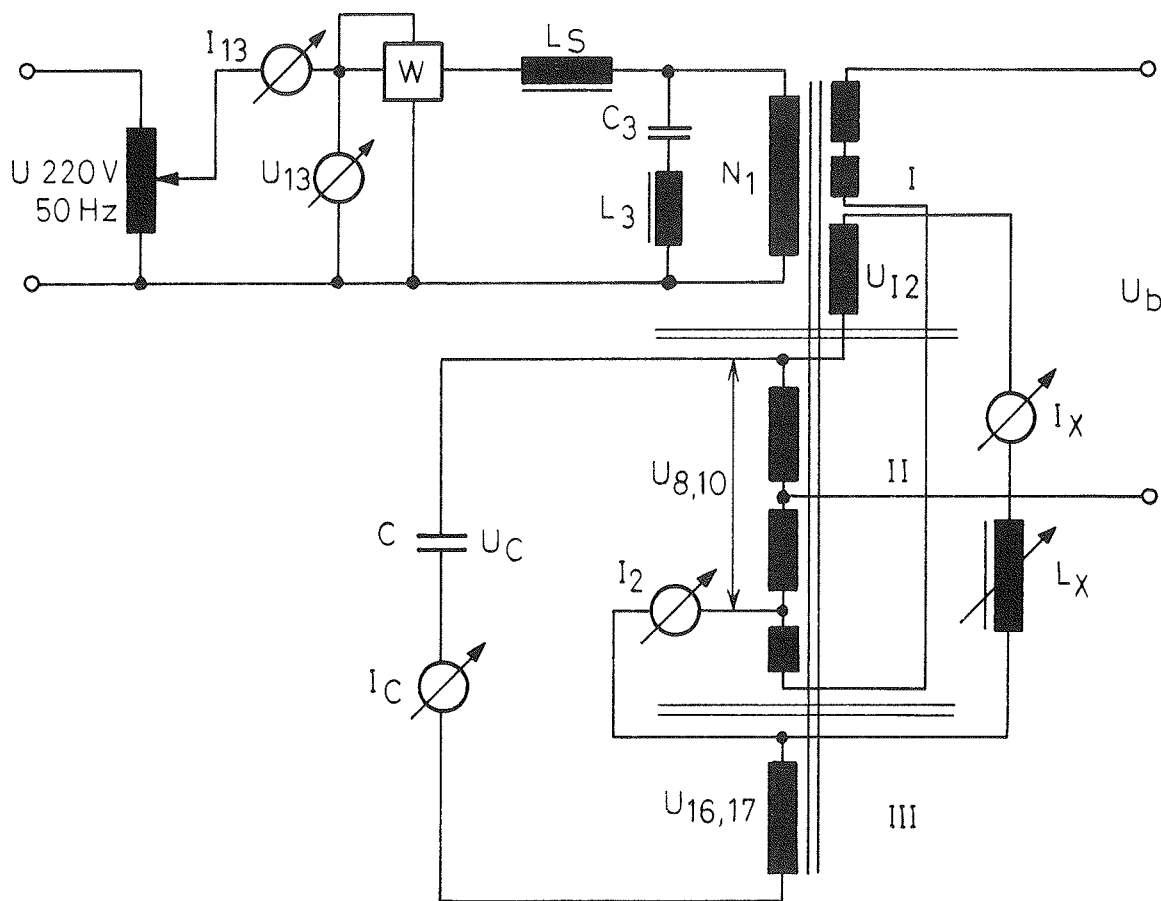
Na sliki 12 vidimo principialno shemo realnega modela krmiljenega ferorezonančnega transformatorja. V bistvu se to vezje razlikuje od vezja podanega na sliki 2 v tem, da ima primarni steber dodano pomožno navitje z nape-

tostjo U_{12} , ki je priključeno prek krmilne dušilke L_x neposredno na resonančno navitje z napetostjo $U_{8,10}$. Napetosti U_{12} in $U_{8,10}$ sta vezani v protifazi. Induktivni krmilni tok I_x je za pomožno napetost U_{12} kapacitivnega, značaja, ki se transformatorsko prenaša nazaj na resonančno navitje. V odvisnosti od velikosti toka I_x se spreminja izhodna sinusna napetost U_b , ki je priključena neposredno na resonančno navitje.

Ker ima enofazni ferorezonančni transformator relativno veliko nelinearno popačenje vhodnega omrežnega toka, je predviden tudi sesalni filter na primarni strani transformatorja.

14. ZAKLJUČEK

Kot je iz članka razvidno je bila dosežena regulacija izhodne sinusne napetosti v širokih mejah, pri čemer je bila dosežena avtomatska kompenzacija reaktivne moči brez dodatne dušilke. Prav tako je bila dosežena resonanca ferorezonančnega transformatorja z omrežno frekvenco pri vseh delovnih pogojih. Ta dognanja je mogoče uporabiti skoraj pri vseh obstoječih ferorezonančnih transformatorjih z dodatnim pomožnim navitjem na primarnem stebru transformatorja. Pri novo konstruiranih ferorezonančnih transformatorjih pa so mogoče še druge ustrezne rešitve za grobo in fino regulacijo



Slika 12. Vezalna shema krmiljenja izhodne napetosti

izhodne sinusne napetosti z minimalnim nelinearnim popačenjem.

Regulacija izgodne napetosti se lahko doseže s spreminjanjem induktivnosti krmilne dušilke L_x ali pa s kombinacijo dušilke in polprevodniških elementov.

Te sisteme lahko uporabimo, kjer se zahteva široka regulacija izhodne sinusne napetosti ali pa se zahteva zelo veliko stabilnost izhodne napetosti pri reaktivnih obremenitvah. To velja tudi v primeru ko je feroresonančni transformator priključen na generatorje, ki obratujejo z relativno veliko spremembo frekvence in napetosti. Prav tako je mogoče te sisteme prilagoditi tudi v primeru, kjer se zahteva bistveno zmanjšanje stresanja magnetnega polja.

Opisane sisteme enofaznih feroresonančnih transformatorjev je priporočljivo graditi do moči 10 kVA. Za velike moči je opisani princip regulacije uporaben tudi za trifazne feroresonančne transformatorje. Prav tako imajo trifazni sistemi nekatere prednosti pred enofazni-

mi, ker imajo bistveno manjše nelinearno popačenje omrežnih tokov in tudi njihova velikost in masa se bistveno ne razlikujeta od klasičnih energetskih trifaznih transformatorjev za enako moč.

*dr. Andrej Zupanc, dipl.ing.
IMP*

Titova 37, Ljubljana

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

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

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

Prispelo: 04. 06. 91 Sprejeto: 25. 06. 91