

Dr. MATIJA SELIGER, dipl.ing.
ISKRA-Industrija za avtomatiko
TOZD Razvojni inštitut
LJUBLJANA, Stegne 15 b

TRIFAZNI TRISTEBERNI FERORESONANČNI STABILIZATOR
THREE-PHASE THREE CORE LEGS FERRORESONANT REGULATOR

POVZETEK

Razvit je nov trifazni tristeborni feroresonančni stabilizator z zelo dobrimi električnimi lastnostmi. V bistvu sta to dve vrsti feroresonančnih stabilizatorjev, kjer je eden namenjen za izmenične in drugi za enosmerne porabnike. Trifazni feroresonančni stabilizatorji so posebno primerni za napajanje večjih naprav v telekomunikacijah, računalnikih in podobnih napravah, ki imajo vgrajene zelo občutljive polprevodniške elemente.

ABSTRACT

A new threephase three core legs ferroresonant regulator was developed with very good electrical properties. There are two types of ferroresonant regulators one for AC and other for DC loads. Threephase ferroresonant regulators are specially developed to supply bigger devices in telecommunication, computers etc, with very sensitive semiconductor elements.

1. UVOD

Razvili in izdelali smo več prototipov trifaznih feroresonančnih transformatorjev za moči od 3 do 25 kVA. Najprej je bil izdelan študij na tristebornem sistemu z magnetnimi šenti, nato pa še štiristeborni sistem. Končno smo uspeli osvojiti relativno preprost sistem s tremi feromagnetnimi stebri, s katerimi so bili doseženi zelo dobri rezultati.

Trifazni feroresonančni transformator mora imeti naslednje lastnosti:

1. Bistveno mora zmanjšati nelinearno popačenje omrežnega toka pri nelinearnih bremenih, kot so tiristorski usmerniki in slično.
2. Zmanjšati je potrebno reaktivne moči, posebno pri napravah, ki niso pretirano kompleksne narave.
3. Eliminirati je potrebno prenapetostne konice na bremenu, ki prihajajo iz omrežja, kar je posebno pomembno pri napajanju različnih računalnikov, elektro-nskih telefonskih central in povsod tam, kjer imajo naprave vgrajena zelo občutljiva polprevodniška vezja.
4. Izhodna napetost mora biti sinusna tudi v primeru, ko imamo na vhodu pravokotne napetostne signale, kot je to primer pri statičnih razsmernikih.

2. PRINCIP DELOVANJA

Bistvo delovanja tritebernega trifaznega ferorezonančnega transformatorja z lokalnim magnetnim nasičenjem stebrov je v tem, da imamo na istem stebru primarno in sekundarno navitje, vendar je magnetna gostota različna. To lahko dosežemo na dva načina.

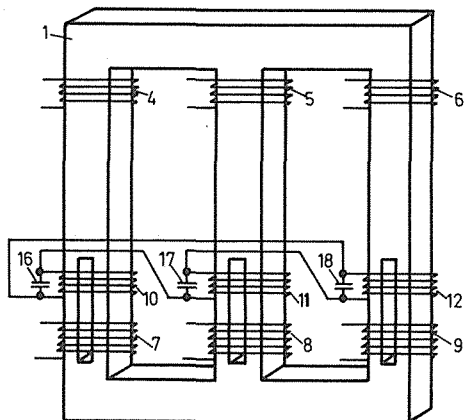
V prvem primeru lahko zmanjšamo efektivni presek magnetnega stebra ali pa uporabimo magnetni material z drugačnimi magnetnimi lastnostmi.

Nasičenje sekundarnega dela ferorezonančnega transformatorja dosežemo s pomočjo kondenzatorjev, ki tvorijo resonanco pri osnovni napajalni frekvenci. To navitje pa istočasno kompenzira višje harmonske signale.

Drugi bistveni del teh ferorezonančnih transformatorjev so kompenzacijska navitja, ki so povezana v trikotu. To dodatno navitje ima še več drugih nalog poleg kompenzacije višje harmonskih tokov. Tako izravnava neenakomerno obremenitev sekundarnih stebrov in tudi posredno vpliva na obliko omrežnih tokov in nekoliko zmanjšuje vhodno reaktivno moč.

Princip trifaznega ferorezonančnega transformatorja vidimo na sliki 1. V bistvu je struktura podobna klasičnemu trifaznemu transformatorju, le da sta primarno in sekundarno navitje ločena prostorsko na istem stebru. Pri klasičnih transformatorjih bi tak razpored povzročal zelo veliko stresanje. V našem primeru pa je sklop med primarnimi in sekundarnimi navitji zelo dober, kar dosežemo s sekundarnim resonančnim krogom. Sekundarna napetost je tedaj določena z magnetno gostoto nasičenja B_g in efektivnim presekom sekundarnega dela stebra. Navitja z oznako 4,5,6 so primarna navitja in navitja 6,7,8 pa sekundarna. Navitja 10,11,12 so resonančna navitja, ki imajo paralelno priključene kondenzatorje.

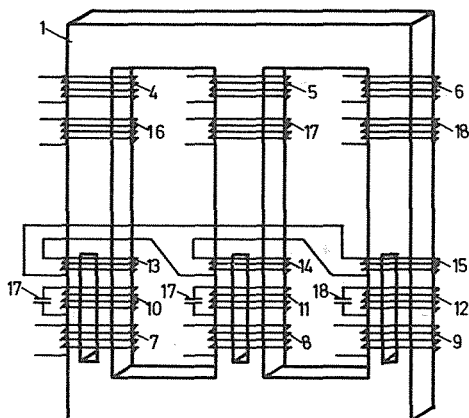
V bistvu lahko naredimo več vrst ferorezonančnih transformatorjev, ki se razlikujejo glede števila sekundarnih navitij in njihove vezave. Na sliki 1 vidimo, da so resonančna navitja 10,11,12 vezana v trikotni vezavi ter tvorijo istočasno tudi kompenzacijsko navitje. Sekundarno navitje 7,8,9 pa lahko vežemo v trikot ali zvezdo.



Slika 1: Princip zgradbe trifaznega tristesbernega ferorezonančnega transformatorja

Na sliki 2 pa vidimo drugi način vezave sekundarnih ovojev. Navitja 13,14,15 so sedaj posebna kompenzacijska navitja, ki so običajno tik ob stebru vezana v trikot. Tak način vezave se običajno uporablja posebno takrat, kadar želimo imeti čim manjše popačenje izhodnega signala in je izhod vezan v zvezdo, da lahko transformator obremenimo tudi fazno. Pri bremenih, ki dopuščajo vezavo izhodnih navitij v trikotu, se sistem lahko bistveno poenostavi, ker odpadejo kompenzacijska navitja in so v tem primeru že resonančna navitja istočasno izhodna navitja. Imamo dve tipični vrsti trifaznega ferorezonančnega transformatorja. Prva vrsta je namenjena za napajanje usmernikov, kjer oblika izhodnega signala ni tako bistvena, v drugem primeru pa dobimo na izhodu sinusno oblikovano izhodno napetost. Seveda lahko obstajajo tudi druge vezave, ki so pogojene z zahtevami porabnika.

Na sliki 2 vidimo princip vezja ferorezonančnega transformatorja z dodanimi korekcijskimi ovoji 16,17,18. Ti ovoji, ki se nahajajo v primarnem delu stebra so vezani v seriji z izhodnimi navitji 7,8,9 vendar z nasprotno fazo. V tem primeru mora biti izhodno navitje dimenzionirano za približno 10 % večjo napetost. Prav tako pa mora biti dimenzionirano tudi korekcijsko navitje.



Slika 2: TSF s korekcijskimi navitji

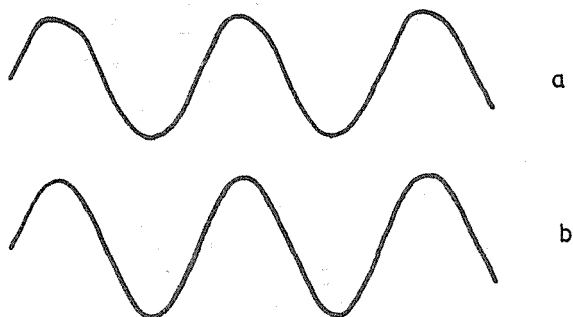
Korekcijski ovoji, odnosno napetost, ima nalogo dodatno korigirati že stabilizirano izhodno napetost zaradi spremembe vhodne napetosti in spremembe bremena. Z večanjem vhodne napetosti se napetost na korekcijskem navitju večja linearno, dočim se sekundarna napetost spreminja le malo. To pa pomeni, da se ti dve spremembi napetosti kompenzirata tako, da dobimo na izhodu praktično konstantno napetost. Podobno velja tudi za spremembo bremena. Dodajanje korekcijskih ovojev je zanimivo predvsem takrat, kadar želimo napajati porabnike, ki zahtevajo zelo stabilno izhodno napetost. Pri feroresonančnih transformatorjih za usmernike nimajo vgrajena korekcijska navitja.

3. EKSPERIMENTALNI REZULTATI

Na osnovi reziskav na 3 kVA modelu smo izdelali več prototipov moči od 5 do 25 kVA in to v dveh variantah:

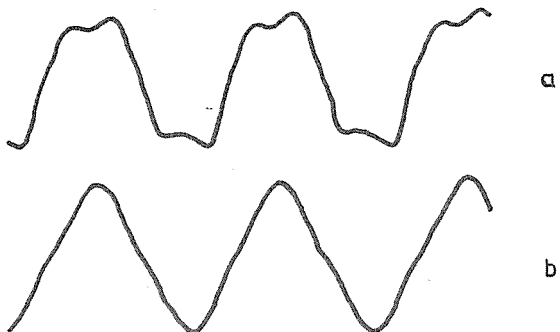
1. Feroresonančni transformatorji, ki so namenjeni za tiristorske usmernike.
2. Feroresonančni transformatorji za porabnike, ki morejo imeti dobro sinusno izhodno napetost. Istočanso so nekateri prirejeni tudi za brezprekinitveno napajanje zahtevnih porabnikov pri izpadu omrežne napetosti.

V prvem primeru so transformatorji nekoliko manjši. Prav tako imajo tudi manjše število sekundarnih navitij. Oblika izhodne napetosti v tem primeru ni zahtevana, prav tako pa je lahko tudi manjša stabilizacija izhodne napetosti. Obliko izhodne napetosti neobremenjenega in obremenjenega transformatorja vidimo na sliki 3.



Slika 3: Oblika izhodne napetosti usmerniškega FT transformatorja
a. prazen tek
b. nazivna obremenitev

Na sliki 4 lahko vidimo obliko omrežnega toka za primer, ko nimamo vključeno kompenzacijo višjiharmonskih signalov in sistem z vključeno kompenzacijo.



Slika 4: Oblika omrežnega toka
a. brez kompenzacije
b. s kompenzacijo

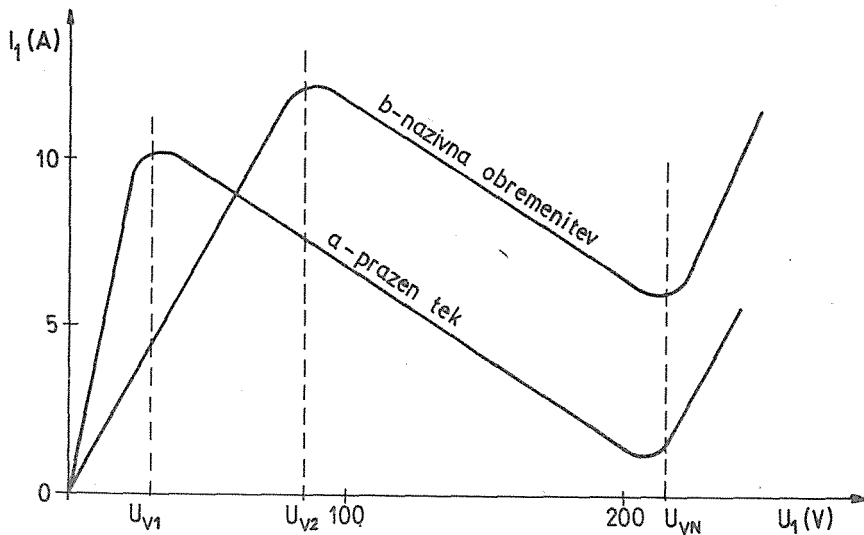
Na sliki vidimo vpliv sekundarnega kompenzacijskega navitja, ki je vezano v trikotni vezavi. To je izredno pomembno takrat, kadar so tiristorski usmerniki priključeni na lokalne generatorje pri izpadu omrežne napetosti. Taka nelinearna bremena povzročajo zelo velika tokovna popačenja, kar povzroča nestabilnost celotnega sistema in je zato potrebno vgraditi močnostne filtre, ki so relativno veliki in tudi ne najbolj učinkoviti.

Za porabnike, ki zahtevajo lepo sinusno oblikovano izhodno napetost, ki mora biti tudi dobro stabilizirana, je bil prirejen drugi prototip feroresonančnega transformatorja. Ta transformator je namenjen tudi za brezprekinitveno napajanje porabnikov iz razsmernika. Transformator ima več sekundarnih navitij in dva primarna navitja, ki sta geometrijsko precej oddaljena med seboj. Prvo primarno navitje, ki se nahaja na enem koncu feromagnetnega stebra, je prirejeno za priključek na omrežno napetost. Na drugem koncu stebra je drugo primarno navitje, ki je istočasno izhodni transformator za statični razsmernik. Razsmernik je stalno pripravljen da vskoči v obratovanje takoj, ko bi prišlo do izpada omrežne napetosti. Frekvenca razsmernika je sinhronizirana z omrežno napetostjo. V slučaju izpada omrežne napetosti se aktivira elektronsko stikalo, ki pošilja krmilne impulze na tiristorje ali pa močnostne transistorje.

S primerno geometrijsko razporeditvijo smo dosegli nelinearno popačenje izhodnega signala pod 2 %.

4. POTEK VHODNEGA TOKA

Vhodni tok kot funkcija vhodne napetosti je pri feroresonančnih transformatorjih nekoliko neobičajen. Z večanjem vhodne napetosti tok najprej hitro narašča in doseže nek vrh, nato začne padati in doseže nek minimum pri približno nazivni vhodni napetosti, nato pa se ponovno večja z večanjem vhodne napetosti (slika 4).



Slika 5: Vhodni tok kot funkcija vhodne napetosti

- a. prazen tek
- b. nominalno breme

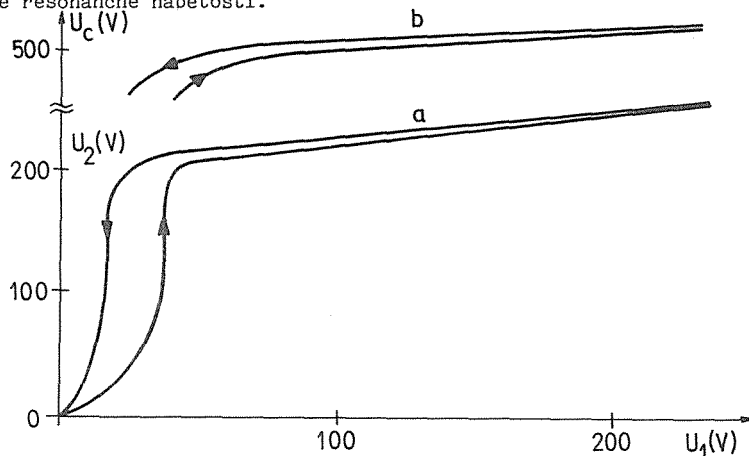
V trenutku ko doseže tok maksimalno vrednost se doseže v sekundarnem krogu resonanco in železno jedro doseže nasičenje magnetne gostote B_s . Od tu naprej je izhodna napetost praktično skoraj konstantna. Vhodna napetost, pri kateri nastopi resonanca, ni konstantna temveč se spreminja z obremenitvijo. Z večanjem bremena se večja tudi vhodna napetost, pri kateri nastopi resonanca. Seveda pa je začetek resonance odvisen tudi od ostalih parametrov, kot je kapacitivnost kondenzatorja, konstrukcijska oblika jedra, itd.

Na sliki 5 tudi vidimo, da en del karakteristike $i-f(u)$ predstavlja negativno upornost. To lastnost pa ne smemo prezreti v primeru, ko ima izvor relativno veliko notranjo impedanco. V takem primeru lahko pride do nihanja sistema. V primeru, da imamo na vhodu razsmernik, ki se napaja iz enosmernega izvora, je mogoče v takem primeru doseči stabilnost z dodatnim LC filtrom v enosmernem napajalnem krogu. Pri izmeničnih generatorjih z veliko notranjo impedanco pa moramo izbrati druge metode. V normalnih pogojih nas tu opisani problemi ne motijo.

5. IZHODNA NAPETOST

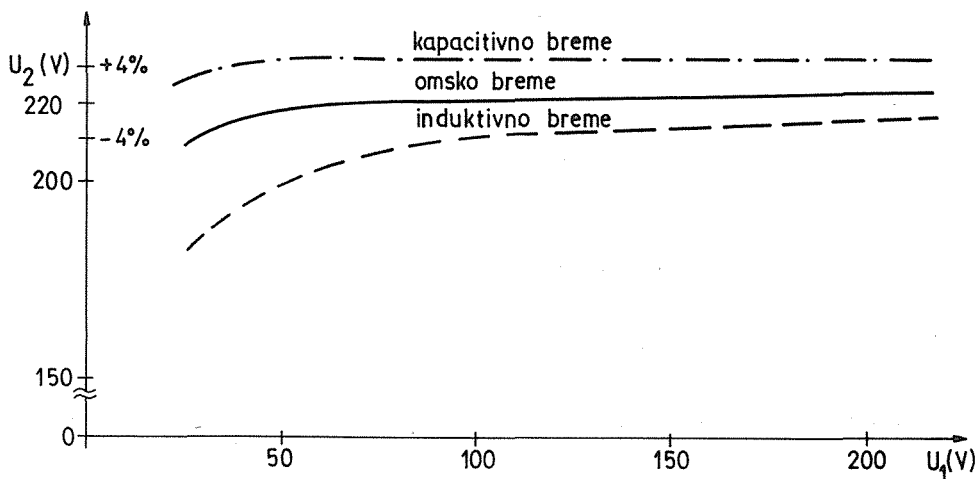
Prek izhodne napetosti in napetosti na resonančnem krogu v odvisnosti od vhodne napetosti vidimo na sliki 6. Obe napetosti sta približno konstantni že od relativno nizke vhodne napetosti. Obe krivulji sta podani za prezen tek.

Napetost resonančnega kroga izberemo običajno okoli 500 V. To je nek kompromis glede obratovalnih pogojev izmeničnih kondenzatorjev. Z višanjem resonančne napetosti se kapacitivnost kondenzatorjev manjša s kvadratom razmerja napetosti. Tako bi imeli pri izhodni napetosti 220 V približno 6-krat večjo kapacitivnost kot pri 500 V. Dimenzije kondenzatorjev za približno enako kapacitivnost se pa z napetostjo bistveno ne povečuje, za zelo velike moči bi bilo smiselno izbrati še znatno večje resonančne napetosti.



Slika 6: Izhodne napetosti in kondenzatorska napetost v odvisnosti od vhodne napetosti

Na sliki 7 vidimo potek izhodne napetosti obremenjenega transformatorja. Pri kapacitivnem bremenu izhodna napetost nekoliko naraste in pri induktivnem nekoliko pade glede na potek napetosti pri ohmskem bremenu.



Slika 7: Izhodna napetost kot funkcija različnih bremen

6. ZAKLJUČEK

Razvili smo različne vrste prototipov trifaznih tristébernih ferorezonančnih transformatorjev - stabilizatorjev, ki imajo zelo dobre električne lastnosti.

Doseženo je bilo zelo dobro dušenje prenapetosti, ki se pojavljajo na omrežni strani transformatorja.

Nelinearno popačenje vhodnega toka je bilo relativno majhno tudi pri nelinearnih sekundarnih bremenih.

Teža in velikost transformatorjev sta bistveno manjši kot enaki klasični enofazni ferorezonančni transformatorji. Faktor zmanjšanja teže je skoraj 2,5-krat.

Trifazni tristéberni ferorezonančni transformator je tudi prijavljen na patentnem uradu, ker takih transformatorjev ni bilo mogoče zaslediti v tujih patentih.

Montaža trifaznih ferorezonančnih transformatorjev je relativno preprosta in je podobna montaži klasičnih trifaznih transformatorjev.

S posebno preureditvijo smo dosegli sistem za brezprekinitveno napajanje, pri čemer se ena primerna stran napaja iz omrežja in druga po potrebi iz statičnega razsmernika. Trifazni ferorezonančni transformatorji so zaenkrat predvsem namenjeni za napajanje elektronskih telefonskih central.