



RAZVOJ VNVF TRANSFORMATORA SNAGE 60kVA ZA NAPAJANJE ELEKTRO FILTARSKIH POSTROJENJA U TERMOBLOKOVIMA EPS-a

Slobodan Vukosavić*, Željko Despotović**, Obrad Đorđević*

*Elektrotehnički fakultet, Beograd, Srbija

**Institut "Mihajlo Pupin", Beograd, Srbija

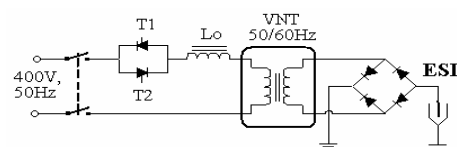
Sadržaj: *Visokofrekventno napajanje elektrostatičkih filtara omogućuje značajne uštede u površini elektroda, količini ugrađenog čelika, električnoj energiji i efikasnije izdvajanje čestica dima i pepela. Jedna od ključnih komponenti visokofrekventnog (VF) energetskog pretvarača je energetski transformator podizač napona. Njegova realizacija zahteva rešavanje čitavog niza stručnih i tehničkih problema, za koje u naučnoj i stručnoj javnosti još uvek nema primerenog rešenja. U radu transformatora pri VF primenama postoje problemi degradacije dielektrika usled dielektroforeze, prisutne usled velike brzine promene električnog polja. Pored ovoga, projektovanje feritnog jezgra za transformator velike snage je skopčano sa problemima usled prisustva pozitivnog temperaturnog koeficijenta gubitaka snage u jezgru. U radu su prikazani rezultati projekta visokonaponskog visokofrekventnog (VNVF) transformatora sa opisom rešenja najznačajnijih problema. Na kraju će biti prezentirani eksperimentalni rezultati dobijeni testiranjem u laboratorijskim uslovima..*

Ključne reči: *Elektrostatički izdvajač, VNVF transformator, energetski pretvarač, IGBT, visokofrekventno napajanje, prazan hod, kratak spoj.*

1. UVOD

Pretvaranje naizmeničnog mrežnog napona u visoke jednosmerne napone, velike snage (>40kW) je ključna oblast tehnologije koja se zahteva u mnogim industrijskim procesima. Jedna od konkretnih primena je u postrojenjima elektrostatičkih izdvajača (ESI), koji se koriste za kontrolu emisije čestica na blokovima termoelektrana. Standardno, visoki jednosmerni naponi (50-100kV) se ostvaruju jednofaznim AC regulatorom (Sl.1). Regulator kontroliše napajanje ESI posredstvom visokonaponskog transformatora (VNT). Diodni ispravljački most je primenjen na sekundaru VNT i njime se proizvodi visoki jednosmerni napon. Talasnost toga napona je relativno velika i zavisi od kapacitivnosti

samog izdvajača. Kontrola snage i napona se postiže promenom ugla paljenja posredstvom antiparalelne veze tiristora [1-4].



Sl.1. Jednofazni tiristorski regulator napajanja ESI

U proteklim godinama je ostvaren relativno mali napredak ove topologije. Tu se prvenstveno misli na nemogućnost njene primene za rad na visokim učestanostima i pri značajnim snagama. Tako je konvencionalni dizajn VNT za 50Hz/60Hz postao manje atraktivno rešenje. Pomenuta topologija veoma robusna i jednostavna, ali ima nekoliko značajnih mana: mali kvalitet ulazne struje, nizak faktor snage, spori odziv, nisku efikasnost izvora napajanja, značajne dimenzije, težinu a stoga i veliku cenu. U novije vreme se intenzivno radi na primeni prekidačkih izvora napajanja prilagođenih za aplikacije u ESI postrojenjima. Novi prekidački izvori bazirani na IGBT-ima obezbeđuju dramatično različite performanse i fizičke karakteristike od konvencionalnih tiristorskih izvora napajanja ESI [5].

Nekoliko je poboljšanja koja se mogu očekivati usvajanjem VF prekidačkog rada [6]:

- preciznija kontrola radnih parametara kao što su izlazna struja i napon ESI, porast napona i zahtevani odziv na promene opterećenja

- VF obezbeđuje značajno smanjenje veličine i težine VNT

- kompaktniji dizajn i minimiziranje cene ugradnje i održavanja

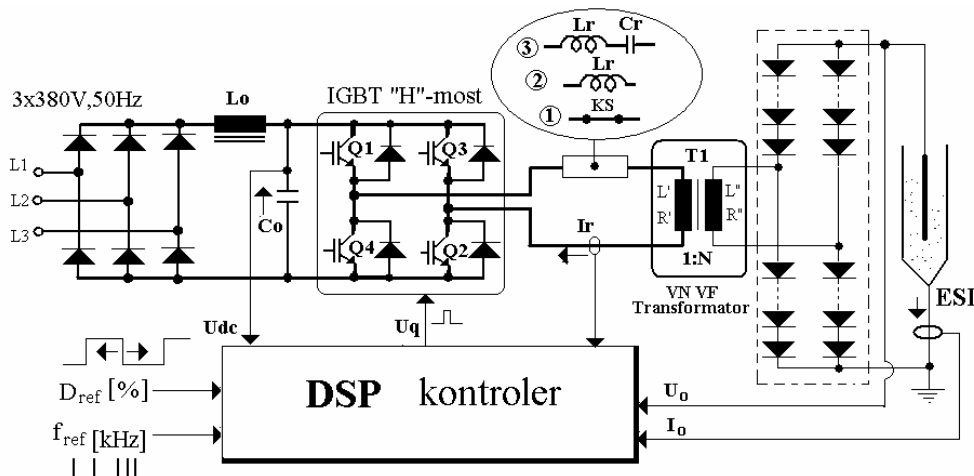
- VF radom se obezbeđuje mnogo veća reaktansa transformatorskog jezgra i shodno tome efikasnost izvora napajanja će biti poboljšana.

- mogućnost modulacije izlaznog napona

U ovim aplikacijama VNT mora biti projektovan tako da se napaja iz jednosmernog naponskog izvora preko

"H-mosta" sa IGBT –ima (Sl.2). Ovim je moguće postići značajnu fleksibilnost koristeći strategiju naponske kontrole tj. kontrolu širine impulsa. Izlaz IGBT pretvarača može biti direktno vezan na primar VNVF transformatora (opcija -1), preko prigušnice L_r (opcija-2) i preko rezonantnog L_r - C_r kola (opcija-3). Rezonantni

pretvarač je jako povoljan sa stanovišta naponskog napreznja transformatora pošto su naponske ivice značajno zaobljene u odnosu na *opcije 1 i 2*. Način rada jednog takvog pretvarača je opisan detaljno u referencama [7], [8].



Sl.2. VF prekidački izvor napajanja za pobudu ESI

2. DIZAJN VNVF TRANSFORMATORA 60kVA

VNT koji se primenjuju u ESI aplikacijama uglavnom imaju veliki prenosni odnos, tipično 600: 1 do 1200: 1. Potrebna je dovoljna debljina izolacije između primarnog i sekundarnog namotaja kako bi se izbegao električni proboj. Stoga, elektromagnetna sprega između primara i sekundara neće biti tako kruta kao u konvencionalnim NN transformatorima[6]. Ovo rezultuje preslikavanjem parazitnih induktivnosti na primarnu stranu što može uticati na propusnost maksimalne snage transformatora. Dakle postoji kompromis između izolacionog rastojanja i rasipne induktivnosti

Takođe veliki broj navojaka koji se zahtevaju za namotaj sekundara prouzrokuju veoma visoku vrednost distribuiranog kapaciteta. Ova vrednost se preslikava na primarnu stranu tako što se množi sa kvadratom prenosnog odnosa transformatora i nije zanemarljiva [9], [10]. Ovaj paraziti kapacitet prouzrokuje nedelotvornu struju kroz sekundarni namotaj što rezultuje značajnom smanjenju efikasnosti transformatora.

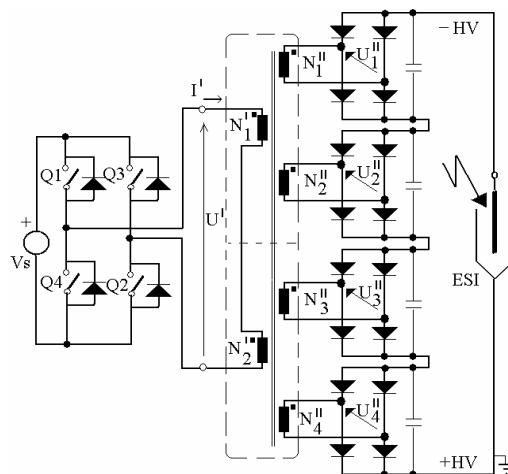
Korona pražnjenja koja su česta pojava u ESI sistemima mogu ozbiljno uticati na rad i životni vek VNT. Bilo kakva oštra izbočenja ili uglovi mogu dovesti do pojačanja nehomogenosti električnog polja i shodno tome dovesti do pojave korone u njihovoj okolini. Korona može dovesti do stvaranja visoko reaktivnih molekula koji mogu dovesti do degradiranja izolacije, električnog proboja i nastajanja nepoželjnog električnog luka.

VNT je predviđen za pobudu punotalasnog ispravljača i projektovan je da ima modularni dizajn kako bi se mogao koristiti za različite naponske nivoe- U_{max} . On sadrži dva primarna kabela vezana na red i četiri sekundarna kabela, od kojih svaki ima zasebni diodni ispravljački most kao što je prikazano na Sl.3. Da

bi se osiguralo podjednako deljenje napona iskorišćen je kapacitivni delitelj.

Imajući u vidu ove činjenice VNVF transformator za napajanje ESI je dimenzionisan prema sledećim električnim zahtevima:

Primarni napon: $U = 600V$ (pravougaoni talasni oblik)
 Sekundarni napon : $U' = 4 \times 15kV$
 Prividna snaga : $P = 60kVA$
 Prekidačka učestanost: $f = 10kHz$



Sl.3. VNVF transformator sa četiri sekundarna namotaja za pobudu ESI

Zbog zahteva za visokom učestanošću, odlučeno je da se koristiti kompozicija više feritnih jezgara. Kako bi se prilagodio smeštaj šest kalemova (dva za NN stranu i četiri za VN stranu) korišćeno je jezgro sa pravougaonim poprečnim presekom. Postignuto je dobro uklapanje sekcija. Kako bi se osigurali niski gubici gustina fluksa tj. indukcija je bila ograničena na $B_{max} \leq 300mT$.

Osim čvrste izolacije potrebne za kalemove potrebno je bilo definisati izolacioni medijum u koji se smešta VNT zajedno sa pripadajućim ispravljačem. Jasno je da sekundarni namotaji trebaju biti dovoljno veliki da bi se sprečio preskok sa površine VN namotaja na feritno jezgro transformatora ili pak na primarni namotaj. Pored ovoga predviđena je dovoljna debljina VN da bi se sprečio proboj kroz izolaciju. Probaj se uvek događa kada površina dejstva električnog polja postane veća od bilo čvrstih delova ili enkapsulacije koja ga okružuje. Moguće je napraviti poboljšanja pri nižim vrednostima polja, koja se tiču fizičkih i hemijskih nehomogenosti na površini kao i same geometrije. Iako je podatak za najmanje 1kV/mm relativno pouzdan, njega je teško postići za dobro kontrolisane uslove površine. Po Rowlandu i Nicholisu sigurnosni napon za ovakve aplikacije je 15kV/10mm [11] tj. odnosno ova vrednost napona je potrebna za održavanje suvog probaja ("otporni luk u termoplastičnoj masi."). Radi sigurnosti, usvojena je vrednost za dielektričnu čvrstoću od 5kV/mm.

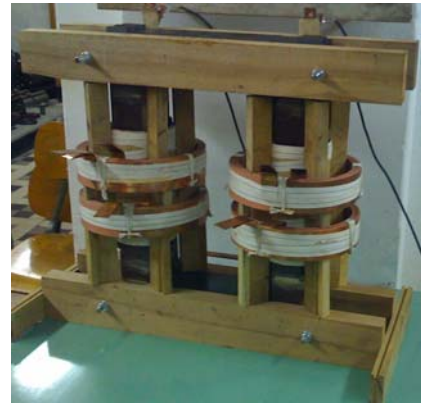
U razmatranje za izolacioni medijum su uzeta u obzir transformatorska ulja. Transformatorska ulja su pored izolacionih svojstava dobar medijum za transport toplote. U uslovima idealne prirodne konvekcije koeficijent prenosa je približno $95W/m^2K$, što je ekvivalentno forsiranom hlađenju sa vazduhom sa brzinom toka približno 25m/s [12]. Za razvoj prototipa ulje izaziva nekoliko različitih problema. Ulje treba ukloniti sa površine svih komponenti. Nečistoće u ulju imaju tendenciju da akumuliraju tačke visoke divergencije polja, tj. na najkritičnije tačke nastaju usled dielektroforeze [13] i to može dovesti do lokalnih probaja u ulju.

Pored ovoga tokom projekta je izvršena i detaljna elektrostatička analiza. U cilju sprečavanja divergencije električnog polja, postavljeni su na krajevima namotaja specijalni prstenovi. Na ovaj način je maksimalno polje na unutrašnjoj strani prstena ograničeno na 5kV/mm.

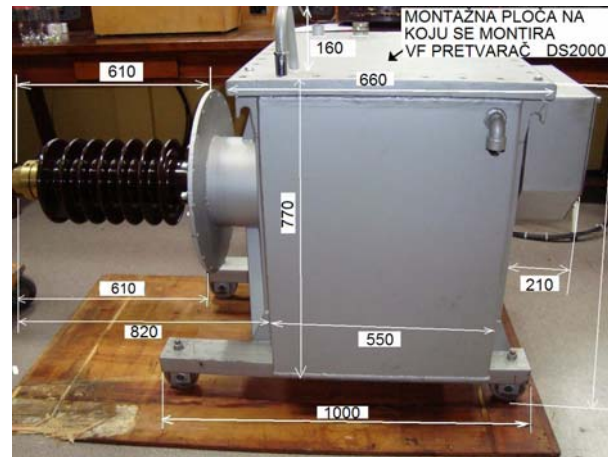
3. TESTIRANJE VNVF TRANSFORMATORA

Projektovani transformator je sastavni deo VNVF napajanja ESI postrojenja na TE "Morava" čija je blok šema data na Sl.2. Transformator je testiran u ogledima praznog hoda i kratkog spoja na Elektrotehničkom fakultetu u Beogradu u Laboratoriji za mikroprocesorsko upravljanje energetskim pretvaračima i pogonima.

Na Sl.4 je dat izgled kompozicije transformatorskog feritnog jezgra i namotaja (VN strane i NN strane) razvijenog VNVF transformatora. Transformatorsko jezgro je fiksirano sa drvenim jarmom. Obezbeđeno je potrebno sigurnosno rastojanje između primara i sekundara. Izgled i dimenzije transformatorskog suda u kojem su smešteni VNVF transformator i VN ispravljač su prikazani na Sl.5. Transformatorski sud je ispunjen izolacionim uljem NYNAS 3000. U prostor dimenzija 550mm x 770mm x 420mm je smešten VNVF transformator prividne snage 60kVA zajedno sa VN ispravljačem.



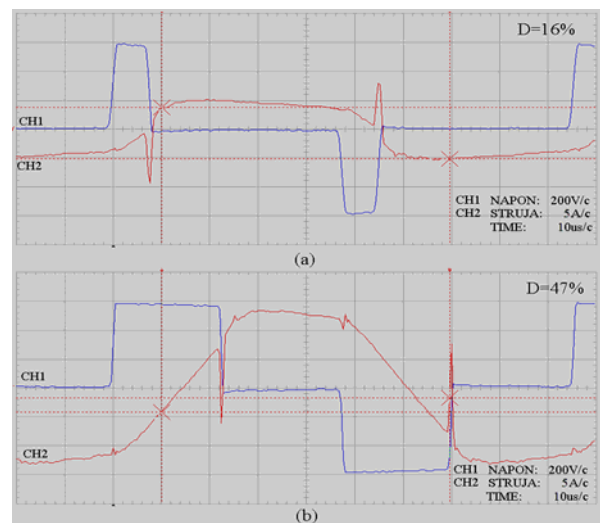
Sl.4. Izgled VNVF transformatora 60kVA pre stavljanja u izolacioni medijum od ulja



Sl.5. Izgled i dimenzije suda ispunjenog transformatorskim uljem u kojem su smešteni razvijeni VNVF transformator i VN ispravljač; prividna snaga uređaja $S=60kVA$; date dimenzije su u milimetrima

3.1. Ogled praznog hoda

Ogled praznog hoda je ostvaren pri različitim vrednostima širine naponskih impulsa na redno vezanim primarnim (NN) namotajima. Sva četiri sekundarna namotaja su bila otvorena.



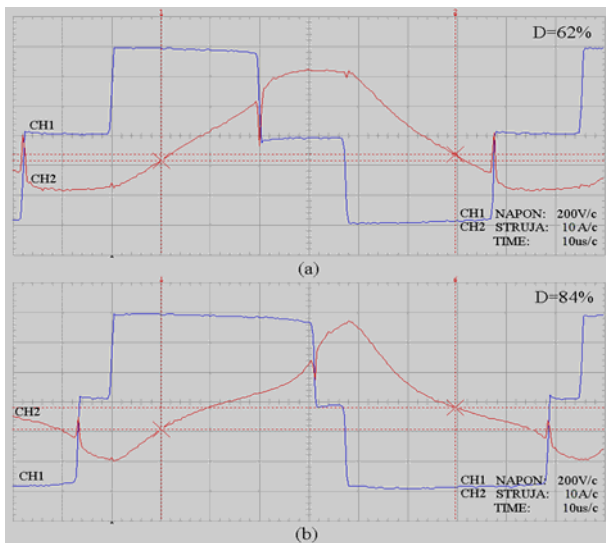
Sl.6. Ogled praznog hoda pri pobudnoj učestanosti 10kHz,

(a) $D=16\%$, (b) $D=47\%$

Podešavanje radne učestanosti pretvarača i širine naponskih impulsa je ostvareno preko referentnih ulaza DSP kontrolera, kao što prikazuje Sl.2; zadavanje širine naponskih impulsa preko ulaza D_{ref} [%], dok je zadavanje učestanosti ostvareno f_{ref} [kHz].

Na Sl.6 su prikazani talasni oblici struje i napona na primaru VNVF transformatora za slučaj praznog hoda, pri učestanosti od 10kHz i za dve različite širine naponskih impulsa: za slučaj na Sl.6(a) *duty-cycle* je iznosio $D=16\%$ dok je za slučaj na Sl.6(b) iznosio $D=47\%$. Na Sl.7 su prikazani isti odzivi za veće vrednosti širine impulsa. Na Sl.7(a) su dati snimci za $D=62\%$ dok su na Sl.7(b) dati snimci za $D=84\%$.

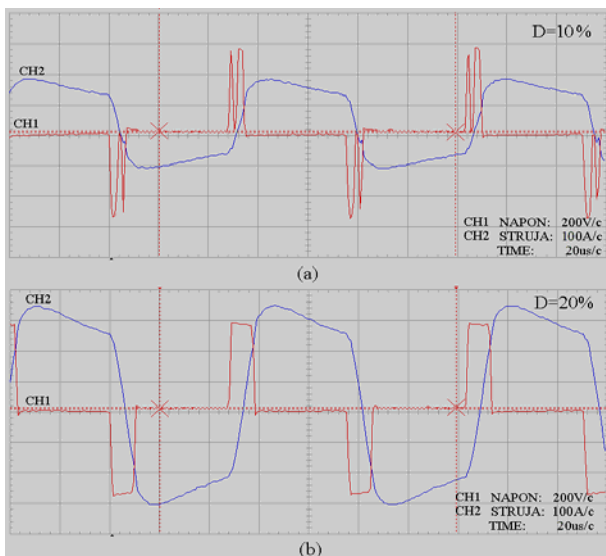
Sa ovih snimaka se jasno vidi da je induktivnost magnećenja VNVF transformatora $L_{\mu}=600\mu H$. Zapaža se pri širini impulsa $D=84\%$, jezgro transformatora blago ulazi u magnetno zasićenje.



Sl.7. Oglad praznog hoda; $f=10\text{kHz}$, (a) $D=62\%$, (b) $D=84\%$

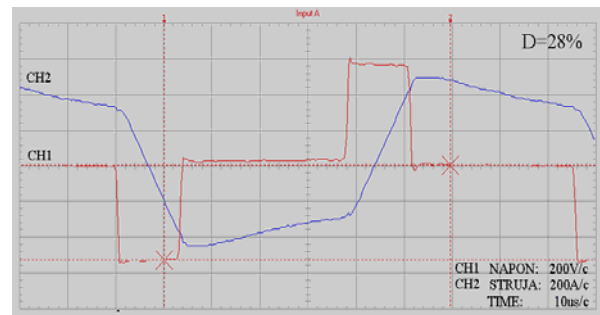
3.2. Oglad kratkog spoja

Oglad kratkog spoja je ostvaren pri različitim vrednostima širine naponskih impulsa na primaru, pri kratko spojenjama sva četiri namotaja sekundara.



Sl.8. Oglad kratkog spoja; $f=10\text{kHz}$, (a) $D=11\%$, (b) $D=20\%$

Na Sl.8 su prikazani talasni oblici struje i napona na primaru VNVF transformatora pri kratkom spoju, pri učestanosti od 10kHz i za dve različite širine naponskih impulsa: za slučaj na Sl.8(a) *duty-cycle* je iznosio $D=11\%$ dok je za slučaj na Sl.6(b) iznosio $D=20\%$. Na Sl.9 su dati iste veličine pri $D=28\%$.

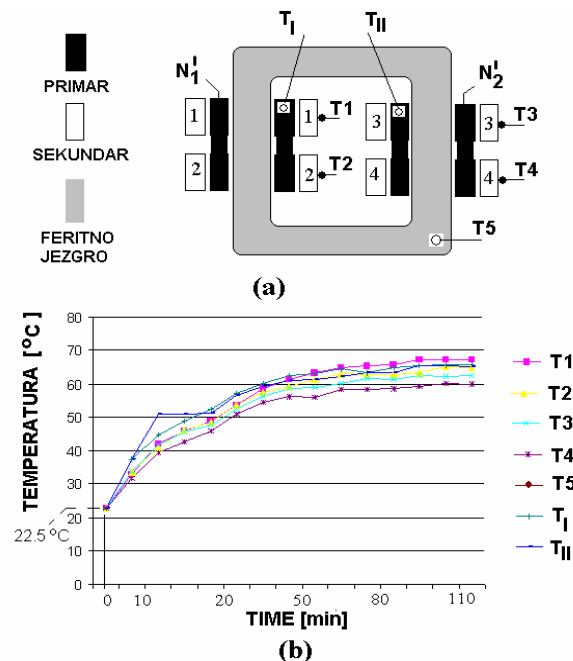


Sl.9. Oglad kratkog spoja; $f=10\text{kHz}$, $D=28\%$

Na osnovu ovih merenja je određena induktivnost kratkog spoja $L_k=18\mu H$. Takođe zapaža se da se za vrednost $D=11\%$ ima kratak spoj pri nominalnoj struji, tako da je napon kratkog spoja $u_k \approx 10\%$.

3.3. Merenje porasta temperature namotaja

U test procedurama praznog hoda i kratkog spoja su obavljena merenja porasta temperature magnetnog jezgra odnosno namotaja primara i sekundara. Raspored mernih tačaka na transformatoru je prikazan na Sl.10(a). Izmerena promena temperature u pojedinim tačkama je data na Sl.10(b).



Sl.10. Merenje porasta temperature karakterističnih tačaka VNVF transformatora; (a)-raspored mernih tačaka, (b)-porast temperature pojedinih tačaka

Merenje je ostvareno pri pobudnoj učestanosti $f=10\text{kHz}$. Početna ambijentalna temperatura je iznosila $T_{amb}=22.5^{\circ}\text{C}$. U praznom hodu je merena temperatura T_5 magnetnog jezgra dok su u kratkom spoju merene temperature na svakom od oba primara T_I , T_{II} , kao i

temperature T1-T4 na sva četiri kratko spojena sekundara kao što prikazuje Sl.10(b). Pored ovih veličina u testu su izmereni gubici praznog hoda $P_{\gamma o}=550W$ kao i gubici kratkog spoja $P_{\gamma k}=1550W$.

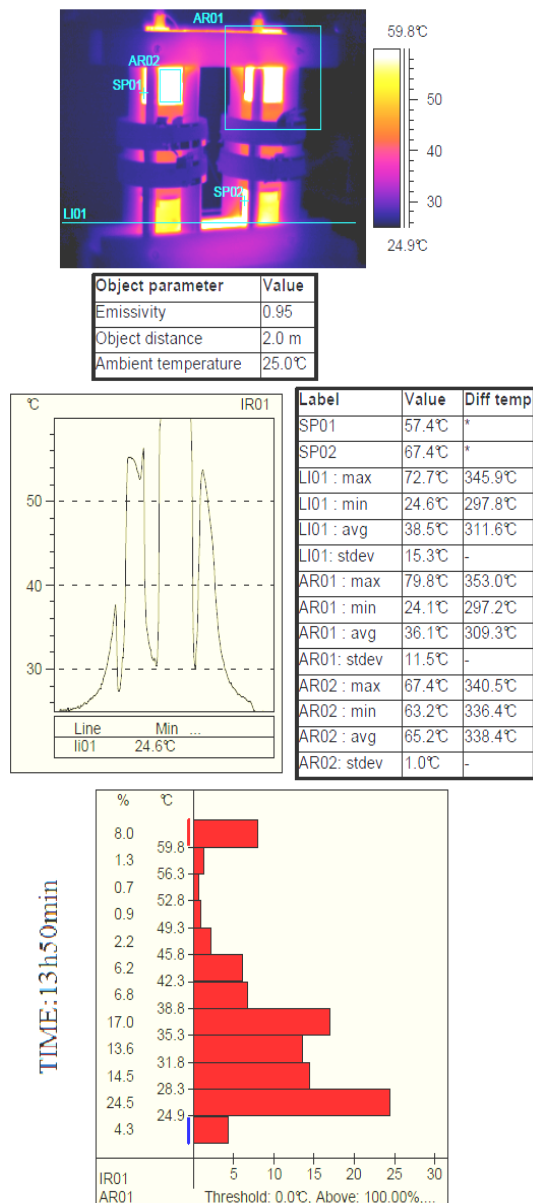


Sl.11. Termovizijsko snimanje VNVF transformatora nakon 15min od uspostavljanja oglea praznog hoda ; TIME:02.05.2009-10h50min

Projektovanje feritnog jezgra za transformator velike snage, kao što je ovde slučaj je skopčano sa problemima usled prisustva pozitivnog temperaturnog koeficijenta gubitaka snage u jezgru, što stvara mogućnost lokalnog pregrevanja, koje u trajnom radu može dovesti do pucanja jezgra i narušavanje strukture magnetnog kola.

Stoga je u okviru ovih eksperimentalnih ispitivanja i testiranja pored termičkih proračuna i ispitivanja na NN i VN namotajima, posebna pažnja posvećena termovizijskom snimanju magnetnog feritnog jezgra. Stoga će u nastavku biti dati neki rezultati dobijeni u ogledu praznog hoda (termovizijska merenja magnetnog jezgra).

Na Sl.11 je data kompletna termovizijska slika VNVF transformatora u praznom hodu u četiri karakteristične tačke (SP01, SP02, SP03, SP04) i u presecima AR01 i LI01 nakon 15min od uspostavljanja režima praznog hoda (vreme: 02.05.2009 god.-10h50min).



Sl.12. Termovizijsko snimanje VNVF transformatora nakon 3h rada u praznom hodu; TIME:02.05.2009-13h50min

Na Sl.12 je data kompletna termovizijska slika VNVF transformatora za karakteristične tačke (SP01, SP02) i u presecima AR01, AR02 i LI01 nakon 3h: (vreme:02.05.2009 god.-10h50min).

Na osnovu ovih snimanja je utvrđeno da termovizijska slika odgovara rezultatima dobijenim snimanjem temperature promene (Sl.10) . Konstatovano je da je srednja temperatura magnetnog kola sačinjenog od feritnog materijala N27 (proizvodnje Siemens) nakon puna 3h rada u praznom hodu pri efektivnoj vrednosti struje praznog hoda $I_{no}=20A$, iznosila oko 60°C. Takođe je utvrđeno da je temperaturna raspodela u samom jezgru ravnomerna i da nema vrućih tačaka što je veoma bitno

sa stanovišta njegovog lokalnog pregrevanja i narušavanja njegove strukture.

4. ZAKLJUČAK

U radu je predstavljen razvoj VNVF transformatora koji se koristi u sistemu VF napajanja na elektrofiltarskim postrojenjima koja se koriste na termo blokovima u EPS-u. Ovaj transformator je projektovan, napravljen i testiran u laboratorijskim uslovima. U radu su naznačeni problemi u radu pri povišenim učestanostima (10kHz) i pri značajnoj snazi (do 60kVA). Dizajn koji je još u fazi prototipa je pokazao da je predložena konfiguracija mnogo efikasnija od VN transformatora koji se koriste u konvencionalnim setovima 50/60 Hz transformator-ispravljač. Projektovani transformator (2kom.) će u narednom periodu biti ugrađen na elektrofiltarskom postrojenju na TE "Morava" gde će biti podvrgnut ispitivajama u realnom okruženju: napojna mreža 3x380V, 50Hz, VF IGBT pretvarač, ESI-60kV/1A i dimni gas sa veoma visokom koncentracijom pepela i prašine ($\geq 600\text{mg/m}^3$).

Ceo ovaj projekat je finansijski podržan delom od Ministarstva za nauku Republike Srbije kroz Projekat tehnološkog razvoja TR-21007-"Razvoj i primena visokonaponske visokofrekventne opreme za otklanjanje aerzagadenja u industriji i elektroprivredi", a delom od strane P.D TE "Nikola Tesla"- Obrenovac.

5. REFERENCE

- [1] N.V.P.R Durga Prasad, T.Lakshminaray, J.R.K Narasimham, T.M.Verman and C.S.R Kirshnam Raju, "Automatic Control and Management of Electrostatic Precipitator", *IEEE Trans. on Industry Applications*, Vol.35, No.3, May/June 1999, pp.561-567.
- [2] Z.Stojiljković, Ž.Despotović, "Regulisani ispravljač za napajanje elektrostatičkih filtara", XII simpozijum Energetska elektronika – Ee'03, N.Sad, 5-7 Nov. 2003, Vol. T1-2.1, pp.1-5.
- [3] K. Parker, "Electrical operation of electrostatic precipitators", The Institution of Electrical Engineers, London, 2003.
- [4] Z.Despotovic, I.Cvetkovic, S.Vukosavic, "New Technology for Electrostatic Precipitator Control" PROCEEDINGS of the XIV International Symposium of the Power Electronics, N.Sad 7.XI-9.XI.2007, Vol.T4-3.5, pp. 1-6.
- [5] S.Vukosavic, I.Cvetkovic, I.Stevanovic, D.Arnautovic, "High Frequency Power Supply For Electrostatic Precipitators", XIV International Symposium on Power Electronics – Ee'07, N.Sad, 7-9 November, 2007, Vol. IP1-1, pp.1-10.
- [6] John.C. Fothergill, Philip W.Devine and Paul W. Lefley "A Novel Prototype Design for a Transformer for High Voltage, High Frequency, High Power Use", *IEEE Trans. on Power Delivery*, Vol.16, No.1, January 2001, pp.89-98.
- [7] Ž. Despotović, S.Vukosavić, D.Arnautović, I. Stevanović, "Visokofrekventno napajanje i njegov

uticaj na kvalitet rada elektrostatičkih izdavača", *Elektroprivreda*, Vol.4, pp.132-143, Decembar 2008.

- [8] Z.Despotovic, S.Vukosavic, "High Frequency Control of Electrostatic Precipitator" PROCEEDINGS of the XIV International Symposium of the Power Electronics, N.Sad 7.XI-9.XI.2007, Vol.T4-3.6, pp.1-6.
- [9] M A. Perez, "A new topology for high voltage, high frequency transformers," *IEEE*, 0-7803-2482-X/95, 1995.
- [10] H. Takano, "Feasible characteristic evaluations of resonant inverter linked DC-DC power converter using high voltage transformer parasitic components," in *Power Electronics and Variable Speed Drives: IEE*, Sept. 23–25, 1996, pp. 525–533.
- [11] S. M. Rowland and I. V. Nichols, "Effects of dry-band arc current on ageing of self-supporting dielectric cables in high fields," *IEE Proc., Science, Measurement and Technology*, vol. 143, no. 1, pp. 10–14, Jan.1996.
- [12] *Conti-Elektro-Berichte*, July/Sept. 1966, p. 189.
- [13] H. A. Pohl, *Dielectrophoresis*. Cambridge: Cambridge University Press, 1978.

THE DEVELOPMENT OF HIGH VOLTAGE HIGH FREQUENCY 60kVA POWER TRANSFORMER FOR SUPPLYING OF ELECTROSTATIC PRECIPITATOR STATIONS ON THERMAL POWER PLANTS

Abstract: The high frequency supply of electrostatic filter allows significant savings in the surface of the electrodes, the amount of embedded steel, electricity and more efficient separation of particles of smoke and ash. One of the key components of high frequency (HF) power converter is a power step-up voltage transformer. Its implementation requires solving a whole range of engineering and technical problems, for which the scientific and professional public still has no adequate solution. The work of the HF transformer applications, there are problems of degradation due dielectrophoresis, due to the presence of high speed changes of the electric field. Besides this, the design ferrite core transformer for high power is related to problems caused by the presence of a positive temperature coefficient of power losses in the core. The paper presents the results of the project high voltage high frequency (HVHF) transformers with a description of solutions of major problems. At the end will be presented experimental results obtained by testing in laboratory conditions.

Key words: Electrostatic precipitator, HVHF transformer, power converter, IGBT, high frequency supply, open-circuit test, short-circuit test.