

Sistem za napajanje potrošača male snage prikupljanjem energije iz spoljašnjeg magnetskog polja

Luka Kostić

*Katedra za energetske pretvarače i pogone
Elektrotehnički fakultet, Univerzitet u Beogradu
Beograd, Srbija
luka@etf.bg.ac.rs, 0009-0002-3808-0723*

Milovan Majstorović

*Katedra za energetske pretvarače i pogone
Elektrotehnički fakultet, Univerzitet u Beogradu
Beograd, Srbija
majstorovic@etf.bg.ac.rs, 0000-0002-0548-5399*

Bogdan Brković

*Katedra za energetske pretvarače i pogone
Elektrotehnički fakultet, Univerzitet u Beogradu
Beograd, Srbija
brkovic@etf.bg.ac.rs, 0000-0001-6827-4989*

Mladen Terzić

*Katedra za energetske pretvarače i pogone
Elektrotehnički fakultet, Univerzitet u Beogradu
Beograd, Srbija
terzic@etf.bg.ac.rs, 0000-0001-7222-6816*

Abstract—U je radu opisan uređaj koji omogućava autonomni rad malih potrošača prikupljanjem energije iz spoljašnjeg magnetskog polja, prevashodno sa idejom prikupljanja rasutog fluksa energetskih transformatora. Ovakvi uređaji korisni su u situacijama gde, osim rasutog magnetskog polja, ne postoji drugi izvor energije iz koga bi se mogli napajati senzori male snage u transformatorskim stanicama. Ovakvi uređaji trebalo bi da budu izvedeni kao slobodnostojeći, jednostavni za rukovanje i robusni prilikom postavljanja, kako bi funkcionisali u različitim okolnostima. Predstavljen je proces idejnog dizajna ovakvog uređaja pomoću proračuna baziranih na metodi konačnih elemenata sa posebnim osvrtnom na jednostavnost i nisku cenu izrade. Na osnovu dizajna testiranog kroz simulacije, formiran je prototip uređaja koji je potom testiran u laboratorijskim uslovima. Za referentnu merenu vrednost magnetske indukcije, ostvarena je zadovoljavajuća vrednost izlazne snage. Utvrđeno je da bi se primenom ovako projektovanog sistema moglo omogućiti napajanje jednog ili više senzora.

Ključne reči—energetski transformator, senzor, autonomni rad, rasuti fluks, prikupljanje energije

I. UVOD

Transformatori su među najznačajnijim komponentama svakog elektroenergetskog sistema. Kvar ili ispad transformatora može dovesti do delimičnog ili potpunog prekida snabdevanja električnom energijom pojedinih delova sistema, što kao posledicu često ima druge velike i neplanirane troškove. S druge strane, oštećenja na transformatorima čine ih privremeno ili trajno neupotrebljivim, što je veoma nepoželjan scenario, jer je njihova popravka i zamena gotovo uvek dugotrajan i skup proces. Imajući ovo u vidu, jasno je da je potrebno obezbediti zaštitu transformatora praćenjem pogonskih i ambijentalnih parametara koji mogu ukazati na opasnost od havarije, kako bi se preventivnim reagovanjem mogle sprečiti ozbiljnije posledice. Praćenje veličina od značaja u većini slučajeva je moguće realizovati

u realnom vremenu, pomoću relativno jednostavnih i jeftinih uređaja. Većina takvih uređaja ima baterijsko napajanje, što je pogodno sa aspekta ugradnje, ali i nepovoljno sa aspekta dugotrajne eksploatacije, s obzirom na potrebu za punjenjem ili zamenom baterija. Proces zamene baterija u mnogim slučajevima zahteva demontažu senzora, što iziskuje angažovanje stručnog osoblja i eventualno isključenje transformatora sa mreže. U slučaju da se koriste senzori sa punjivim baterijama, javlja se problem obezbeđivanja napajanja odgovarajućeg naponskog nivoa. Potencijalno rešenje u ovakvim slučajevima je angažovanje drugih dostupnih izvora energije, kao što su energija vetra ili sunca, mehaničke vibracije kućišta transformatora, elektromagnetsko polje u okolini transformatora itd. Najzastupljenija rešenja oslanjaju se na energiju sunca, s obzirom na relativno jednostavnu i povoljnu ugradnju fotonaponskih ćelija na površini uređaja. Međutim, za transformatorske stanice koje se nalaze u zatvorenom prostoru ili pod zemljom, korišćenje energije sunca nije raspoloživa opcija. U tim slučajevima bi se mogli primeniti kolektori mehaničkih vibracija, ali ovakvo rešenje može biti problematično na dužem vremenskom intervalu zbog zamora materijala. U ovom radu, fokus istraživanja je na ideji prikupljanja energije iz magnetskog polja koje postoji u okolini provodnih izolatora transformatora tokom njihovog normalnog rada.

Iako je prikupljanje energije elektromagnetskog polja u okolini transformatora relativno nov koncept, u literaturi se može naći nekoliko različitih pristupa u pogledu projektovanja i pozicioniranja uređaja za prikupljanje energije u odnosu na izvor polja. Gotovo sva postojeća rešenja bazirana su na konceptu feritnog jezgra koje kanališe linije spoljašnjeg polja kroz namotaj na čijim krajevima se indukuje napon. Prikupljači energije koji se postavljaju direktno na

visokonaponske provodnike nisu prikladno rešenje za masovnu upotrebu jer zahtevaju specijalno obučeno osoblje koje bi ih postavljalo i održavalo, potencijalno mogu oštetiti deo opreme na koji se postavljaju i njihova instalacija zahteva isključenje napajanja električnom energijom. Prikupljači energije koji se postavljaju dalje od strujnih provodnika izloženi su slabijem magnetskom polju, usled čega je i njihova maksimalna snaga manja, ali su mnogo fleksibilniji u pogledu rukovanja i procesa instalacije. Roscoe i Judd su u [1] koristili feritni štap kao jezgro namotaja čime su uspeali da potrošaču dostave snagu od $300\ \mu\text{W}$ u polju indukcije $18\ \mu\text{T}_{\text{rms}}$. Međutim, mana ovako formiranog prikupljača je velika disproporcionalnost dužine i debljine jezgra, što uređaj čini sklonim oštećenjima. Proporcije feritnog jezgra predstavlja bitan aspekt u pogledu funkcionalnosti uređaja za prikupljanje energije. Pored pomenutog feritnog štapa, u literaturi su korišćeni i složeniji oblici feritnog jezgra. Grupa autora je u [2] predložila tzv. "leptir-mašna" (*bow-tie*) oblik feritnog jezgra. Ovaj dizajn je veoma efikasan u pogledu gustine isporučene snage, s obzirom na veliku vrednost indukcije u jezgru uz smanjenje demagnetisućeg polja. S druge strane, ovako kompleksan oblik feritnog jezgra je jako komplikovan i skup za izradu. Ista grupa autora je u daljem radu [3] predstavila spiralno jezgro koje je dodatno poboljšalo sve nabrojane kvalitete "leptir-mašna" jezgra, ali po cenu daljeg usložnjavanja oblika jezgra, što ga čini dodatno komplikovanim za proizvodnju. Primena jezgra u obliku velikog latiničnog slova I predložena je u [4], [5], dok je u [6] korišćeno jezgro u obliku velikog latiničnog slova H. Ovakva jezgra su mnogo jednostavnija sa stanovišta izrade u odnosu na "leptir-mašna" varijantu, jer su formirana pomoću postojećih feritnih jezgara koja se masovno proizvode. U svim navedenim slučajevima su u pitanju jezgra suštinski istog oblika, ali različitih proporcija. Snaga koju isporučuje uređaj opisan u [4] iznosi $4.6\ \text{mW}$ u polju indukcije $6.5\ \mu\text{T}_{\text{rms}}$. Izlazna snaga uređaja predstavljenog u [5] iznosi $40.5\ \text{mW}$, pri čemu je izvor polja provodnik struje od $200\ \text{A}$ na udaljenosti od $0.25\ \text{m}$ od prikupljača energije, što rezultuje indukcijom od približno $160\ \mu\text{T}$ na mestu gde je uređaj postavljen. Snaga isporučena kod prikupljača testiranog u [6] iznosi $13.25\ \text{mW}$ (gustina izlazne snage od $4.182\ \text{mW}/\text{cm}^3$), pri čemu vrednost struje provodne šine na kojoj je uređaj montiran iznosi $100\ \text{A}$, uz napomenu da autori nisu naveli udaljenost uređaja od šine ili vrednost magnetske indukcije na mestu gde je uređaj postavljen. Usled nedovoljne snage koja se isporučuje potrošaču ili zbog specifičnosti uslova pri kojima obezbeđuju napajanje potrošača, navedena rešenja nisu pogodna za široku primenu u napajanju različitih tipova senzora.

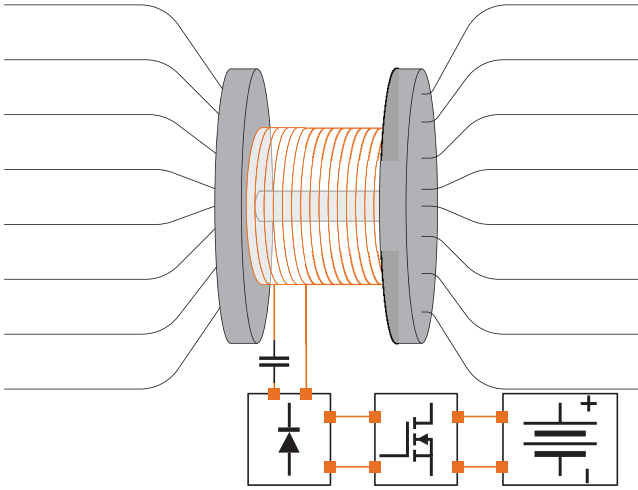
Cilj istraživanja predstavljenog u ovom radu je dizajn i testiranje prikupljača magnetske energije za potrebe napajanja senzora za monitoring i zaštitu transformatora. Izabran je prikupljač energije baziran na magnetskom polju oko uvodnih provodnika transformatora, s obzirom na to da je ovo polje neprestano prisutno u normalnom pogonu. Nakon opisa problema i pregleda postojećih rešenja u uvodnom poglavlju, u drugom poglavlju izložen je koncept sistema prikupljača

energije i osnovne smernice u pogledu dizajna. U okviru trećeg poglavlja predstavljeni su rezultati proračuna pomoću metode konačnih elemenata (*Finite Element Method* – FEM), na osnovu kojih su usvojeni osnovni konstrukcioni parametri projektovanog uređaja. U četvrtom poglavlju prikazan je prototip prikupljača energije, zajedno sa opisom i rezultatima izvršenih laboratorijskih testova. U okviru zaključka sumirani su osnovni rezultati rada i istaknute su potencijalne prednosti ovakvog tipa prikupljača snage u pogledu potencijalnog domena primene.

II. OPIS SISTEMA

Teži se da prikupljač bude slobodnostojeći (*free-standing*) uređaj [1], odnosno da ne zahteva krute veze sa okolnim elementima, da bude jednostavan za rukovanje, kako bi se mogao lako postaviti na odgovarajuće mesto u transformatorskoj stanici, i da bude robustan u pogledu uslova rada. Sa aspekta izrade uređaja, posebno se insistira na jezgru koje bi moglo da se sastavi od lako dostupnih feritnih delova, čime bi se izbegli troškovi namenske proizvodnje feritnih jezgara. Zbog jednostavnosti pri izradi i dostupnosti delova, željeni dizajn sastoji se od centralnog stuba na čijim su krajevima dodate feritne ploče. U zavisnosti od oblika feritnih ploča, dizajn jezgra potpada u kategoriju jezgara oblika slova I [4], [5], ukoliko su ploče izveden kao diskovi ili oblika slova H [6], ukoliko su ploče pravougaonog oblika.

Glavne komponente analiziranog sistema predstavljaju prikupljač energije koji se sastoji iz magnetskog kola i namotaja, u daljem tekstu nazvanog kalem, kondenzator za rednu kompenzaciju, pripadajuće pretvaračko kolo i baterija sa pratećim sistemom za punjenje. Načelna forma ovakvog sistema ilustrovana je na Sl. 1. Pretvaračko kolo uključuju ispravljač na izlazu kalema (diodni ili aktivni) i regulator napona i struje punjenja baterije. Napon i struja na izlazu regulatora treba da budu podešeni tako da odgovaraju karakteristikama baterije, tj. napajanog uređaja. Pri tome treba imati u vidu da u većini slučajeva sam uređaj koji se napaja ima regulator struje punjenja baterije, tako da je u principu dovoljno obezbediti napon koji odgovara zahtevanom opsegu ulaznog napona uređaja. S obzirom na to da ovde akcenat nije na pretvaračkom kolu i baterijskom sistemu, oni su pri svim proračunima i eksperimenatima u ovom radu zamenjeni ekvivalentnim otpornikom kao potrošačem električne energije. Neophodno je naglasiti da se, na red sa namotajem, ispred ispravljača, postavlja kondenzator čiji je adekvatan izbor od izuzetnog značaja za performanse celokupnog sistema. Izbor kondenzatora se vrši na osnovu procenjene ili izmerene induktivnosti kalema i poznavanja frekvencije spoljašnjeg polja, pri čemu se teži da izabrana kapacitivnost, kao redna impedansa, u što većoj meri poništi impedansu induktivnosti kalema. U električnom kolu kalema se ovim postiže redna rezonansa, čime se obezbeđuje prenos maksimalne snage i sprečava demagnetizacija jezgra pri radu sa opterećenjem. Naročito treba voditi računa o maksimalnom naponu na kondenzatoru, čija vrednost može biti značajno veća od vrednosti indukovanе ems namotaja ili od vrednosti



Sl. 1: Koncept napajanja baterije pomoću prikupljača energije

izlaznog napona. Projektovanje pretvarača nije u fokusu ovog rada, tako da će nadalje biti reči samo o projektovanju samog prikupljača energije, tj. magnetskog kola i namotaja, dok će, kada je to potrebno, biti napomenuto u kojoj je meri kompenzovana induktivnost kalema.

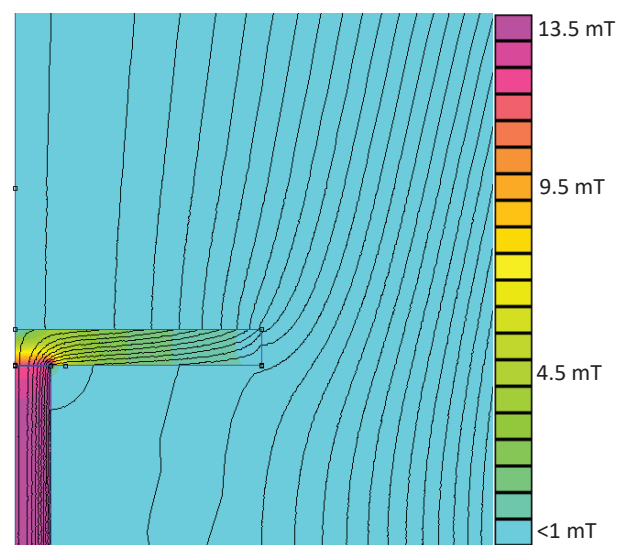
Jezgro prikazanog oblika pruža značajne prednosti pri prikupljanju energije elektromagnetskog polja. Zbog svog oblika, jezgro koncentriše i kanališe magnetsko polje tako da što veći fluks bude obuhvaćen namotajem, čime se značajno povećava vrednost magnetske indukcije, a samim tim i indukovano napon na njegovim krajevima [2], [3], [4], [6], [7]. Feritni materijali koji se koriste za izradu jezgra smanjuju viorne struje u jezgru, dok je efekat histerezisa zanemarljiv na radnim frekvencijama transformatora u elektroenergetskom sistemu koja iznosi 50-60 Hz. Ovakvim izborom materijala se gubici u jezgru umnogome smanjuju i postaju zanemarljivi u odnosu na izlaznu snagu [4], [2], [3], [5]. Takođe, usled relativno malog prečnika dela jezgra oko kog se nalazi namotaj, smanjuje se njegova otpornost, a samim tim i vrednost gubitaka usled provođenja [2].

III. DIMENZIONISANJE I FEM SIMULACIJA

Izbor feritnih delova za formiranje jezgra i broja navojaka koje namotaj treba da sadrži poračunati su iterativno u sprezi rezultata dobijenih numeričkim proračunom metodom konačnih elemenata i dimenzija kataloški dostupnih feritnih delova. Simulacije primenom metode konačnih elemenata sprovedene su u softverskom alatu FEMM 4.2. Ovaj softver omogućava da se efikasno i sa velikom preciznošću utvrde karakteristike i ispita funkcionalnost kalema. S obzirom na to da se simulacije modela u ovom programu definišu kao aksisimetrične, prilikom proračuna je neophodno izvršiti transformacije pojedinih dimenzija. Štapno jezgro i bočne ploče feritnog jezgra, koje su u stvarnosti pravougaonog oblika, u programu su modelovane kao cilindri iste visine i površine poprečnog preseka kao realne ploče. Materijal korišćen za potrebe simulacija spada u grupu mekih ferita, relativne magnetske permeabilnosti $\mu_r = 1400$, dok je

električna provodnost zanemarena jer nije od preteranog značaja pri ovakvoj analizi. Prilikom modelovanja feritnog jezgra uvaženo je postojanje vazdušnog zazoru pretpostavljene debljine 0.25 mm između feritnih delova. Slobodan prostor za smeštaj namotaja pretpostavljen je tako da navojci ne izlaze iz gabarita feritnih delova, uz pretpostavljeni faktor ispune od 0.5. Usvojen je poprečni presek provodnika veći nego što je potrebno za predviđenu vrednost struje, sa ciljem da se smanji otpornost, a time i gubici usled provođenja. Na osnovu nekoliko iteracija proračuna, usvojene su dimenzije feritnih ploča 150 mm × 100 mm × 10 mm dok je cilindrični feritni štap u sredini namotaja visine 100 mm i prečnika 20 mm. S obzirom da je izrada prototipa bila planirana od početka, jedan od glavnih kriterijuma za odabir komponenata bila je njihova dostupnost na tržištu, robusnost uređaja i jednostavnost instalacije. Smanjenje debljine bočnih ploča ne utiče u većoj meri na funkcionalnost uređaja, ali može ugroziti mehanicki integritet. Potrebna širina i visina ploče u velikoj meri zavise od raspodele magnetskog polja na planiranom mestu postavljanja uređaja, sto uglavnom nije poznata informacija. Kako bi funkcionalnost uređaja što manje zavisila od načina postavke i raspodele polja na mestu postavke, izabrane su komercijalno dostupne ploče koje su u izvesnoj meri predimenzionisane. Za ovako izabrane dimenzija jezgra proračunati broj navojaka iznosi 5400 sa provodnikom poprečnog preseka od 0.2825 mm².

Model kalema testiran je u relativno homogenom polju, čija vrednost magnetske indukcije iznosi oko 150 μT na poziciji gde je uređaj postavljen. Izlazni prozor softverskog paketa FEMM 4.2 sa raspodelom magnetske indukcije kada je kalem u praznom hodu prikazan je na Sl. 2. Rad kalema je simuliran u praznom hodu i sa različitim vrednostima rezistivnog opterećenja, pri čemu je njegova induktivnost kompenzovana rednim kondenzatorom tako da se postigne maksimalna vrednost izlazne snage. Utvrđeno je da parametri



Sl. 2: Raspodela polja u okolini i unutar kalema u praznom hodu dobijena primenom softverskog paketa FEMM 4.2

simuliranog kalema iznose $R_{DC} = 64.6 \Omega$ i $L = 8.923 \text{ H}$, dok napon praznog hoda iznosi $U_{PH} = 8.25 \text{ V}$. Kako je cilj isporučiti najveću moguću snagu potrošaču, induktivnost kalema je u potpunosti kompenzovana pomoću rednog kondenzatora kapacitivnosti $1.135 \mu\text{F}$. Rezultati simulacija za različite vrednosti otpornosti potrošača prikazani su u tabeli I, pri čemu je sa R označena otpornost potrošača, dok U_R , I_R i P_R označavaju redom amplitude napona i struje i aktivnu snagu potrošača. Maksimalna vrednost izlazne snage od 93.1 mW ostvaruje se kada je vrednost otpornosti opterećenja jednaka otpornosti namotaja. Rezultati dobijeni primenom FEM simulacije pokazuju da je ovakvim uređajem moguće isporučiti više od 90 mW snage, što je dovoljno za napajanje baterijskih sistema iz kojih bi se dalje mogli napajati senzori za monitoring transformatora. Snaga većine senzora u proseku iznosi nekoliko desetina milivata. Na osnovu zadovoljavajućih rezultata dizajna dobijenih u FEMM 4.2 napravljen je prototip kalema radi sprovođenja laboratorijskih testiranja.

IV. IZRADA PROTOTIPA I LABORATORIJSKI TESTOVI

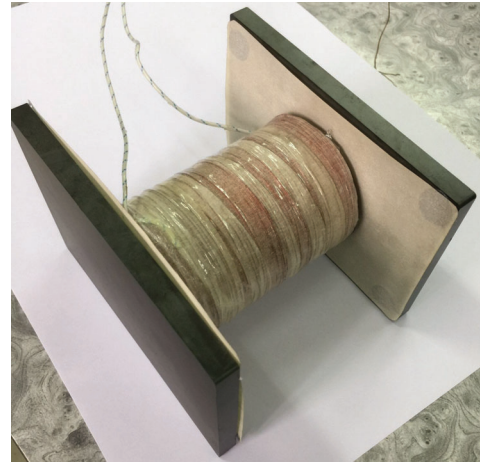
Prototip izrađen u skladu sa konstrukcionim parametrima datim u prethodnom poglavlju prikazan je na Sl. 3. Dimenzije i broj navojaka odgovaraju proračunatim vrednostima, sa tim da se feromagnetski materijal razlikuje od onog korišćenog u simulacijama. Materijali od kojih je napravljen prototip takodje spadaju u meke ferite pri čemu relativne magnetske permeabilnosti ploča i stuba redom iznose 3000 i 2300 , dok vrednosti specifičnih gubitaka iznose 330 kW/m^3 za ploče i oko 450 kW/m^3 za centralni stub, pri čemu su obe vrednosti dobijene na frekvenciji od 100 kHz , temperaturi od 100°C i magnetskoj indukciji amplitude 200 mT . Parametri kalema izmereni su pomoću RLC-metra velike preciznosti na frekvenciji od 100 Hz za dve različite vrednosti napona pobudnog signala. Za vrednost pobudnog signala od 0.5 V izmerena je otpornost 60Ω i 13.75 H , dok je za vrednost signala od 1 V izmereno 55Ω i 13.9 H .

Kalem je testiran u polju solenoida čije su dimenzije nekoliko puta veće od samog uređaja, zbog čega se može smatrati da je polje na mestu gde se postavlja uređaj približno homogeno. Laboratorijska postavka na kojoj je kalem ispitivan prikazana je na Sl. 4. Prvobitno je testirana zavisnost magnetske indukcije u centru solenoida - B_{rms} od struje kojom je solenoid napajan - $I_{s,rms}$. Za iste vrednosti pobudne struje solenoida, izmerena je i vrednost napona praznog hoda kalema - $U_{ph,rms}$. Dobijeni rezultati su objedinjeni i prikazani u tabeli II.

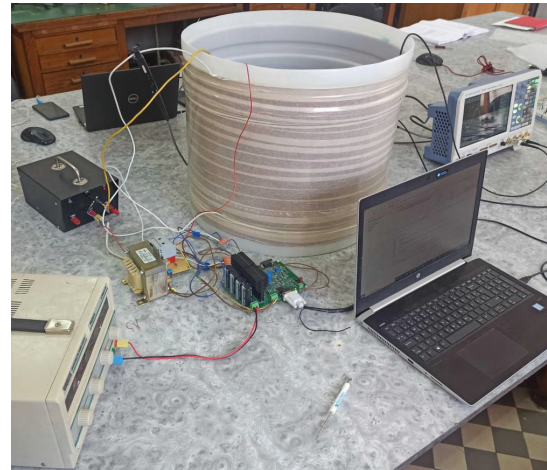
Tabela I: Rezultati simulacija za različita opterećenja dobijeni primenom FEM softvera

R. br	Električne veličine			
	$R [\Omega]$	$U_R [\text{V}]$	$I_R [\text{mA}]$	$P_R [\text{mW}]$
1	64.6	3.47	53.7	93.1
2	250	6.6	26.4	87.1
3	500	7.33	14.7	53.8
4	750	7.57	10.1	38.6
5	1000	7.8	7.8	30.1

Test sa opterećenjem izveden je sa otpornikom od 1000Ω i redno vezanim kondenzatorom od $0.673 \mu\text{F}$ i dobijeni rezultati



Sl. 3: Kalem koji se sastoji od feritnog jezgra i namotaja



(a)



(b)

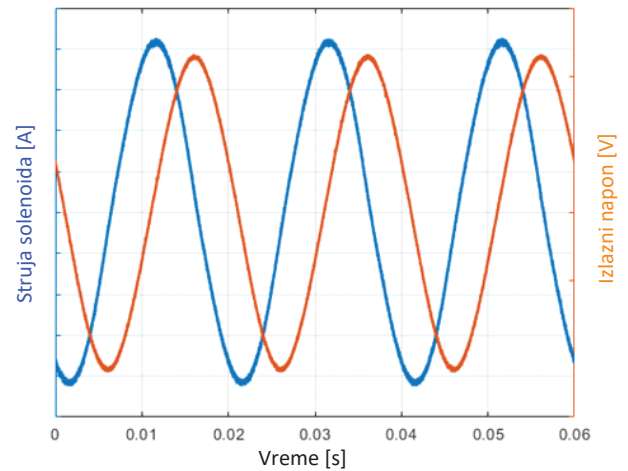
Sl. 4: Laboratorijska postavka za ispitivanje kalema: (a) solenoid koji stvara spoljašnje polje, (b) kalem smešten unutar solenoida

Tabela II: Rezultati merenja indukcije u solenoidu i napona praznog hoda kalema

R. br	Električne veličine		
	$I_{s,rms}$ [mA]	B_{rms} [μ T]	$U_{ph,rms}$ [V]
1	112	32	4.1
2	148	70	5.2
3	186	85	6.6
4	220	100	8
5	260	114	9.3
6	296	130	10.6
7	334	146	12
8	369	159	13.1
9	406	175	14.6

prikazani su u tabeli III, čemu je sa $I_{s,rms}$ označena efektivna vrednost struje solenoida, sa $U_{R,rms}$ i $I_{R,rms}$ efektivne vrednosti napona i struje otpornika i sa P_R aktivna snaga otpornika. Na Sl. 5 prikazani su talasni oblici struje solenoida i napona na opterećenju za proizvoljan slučaj. Tokom testiranja, izmerena vrednost induktivnosti prekompenzovana je redno vezanim kondenzatorom, što dovodi do nešto lošijih rezultata. Međutim, takav pristup je opravdan iz dva razloga. Prvi je to što je poželjno testirati rad kalema sa određenom tolerancijom na grešku redno vezane kapacitivnosti. Drugi, potencijalno bitniji razlog, je činjenica da se induktivnost kalema povećava kada se on nalazi u blizini metalnih objekata sa feromagnetskim svojstvima. Kako je predviđena montaža kalema na kućiste transformatora, ovakav efekat bi trebalo očekivati. U tom slučaju bi izabrani kondenzator približnije kompenzovao induktivnost u stvarnim uslovima rada u odnosu na onu izmerenu u laboratorijskim uslovima.

U cilju objektivnog poređenja rezultata treba se osvrnuti na jačinu polja u kojoj je predviđeno da uređaj radi, a to je polje čija amplituda magnetske indukcije iznosi $150 \mu\text{T}$, što odgovara pobudnoj struji solenoida efektivne vrednosti 220 mA . Prema rezultatima testiranja datim u tabeli III, ova vrednost struje pri vrednosti otpora opterećenja od 1000Ω daje izlaznu snagu od $P_{out} = 37.45 \text{ mW}$, što je dovoljno za punjenje baterija senzorskih sistema ili njihovo direktno napajanje. S druge strane, prilikom rada u realnim uslovima, gde je rezultujuća induktivnost kalema veća usled prisustva metalnih feromagnetskih objekata u blizini, očekuju se bolji rezultati od laboratorijskih. U slučaju potpune kompenzacije, u polju iste vrednosti indukcije, a na osnovu rezultata iz tabele II, može se pretpostaviti da će pri indukovanom naponu od 8 V i rezistivnom opterećenju od 55Ω , što odgovara režimu



Sl. 5: Talasni oblici struje solenoida i napona na opterećenju

maksimalne snage, izlazna snaga biti oko $P_{out} = 290 \text{ mW}$. Ukoliko bi se takvi uslovi stekli, ovakav prikupljač snage mogao bi služiti kao izvor napajanja za baterijski sistem koji bi potom snabdevao celu grupu senzora, čime bi se potencijalno smanjili inicijalni troškovi, ali i ukupan broj ovakvih uređaja koji bi se postavljali na transformatore.

V. ZAKLJUČAK

U ovom radu ukazano je na potrebe za razvojem uređaja za prikupljanje energije rasutog polja energetskog transformatora u cilju napajanja uređaja za monitoring i zaštitu. Glavne odrednice pri dizajniranju ovakvih uređaja jesu određena vrednost indukcije u prostoru u koji se uređaj postavlja, potrebna izlazna snaga uređaja i tendencija da uređaj bude slobodnostojeći, odnosno da njegova montaža bude jednostavna i bez krutih veza sa drugim elementima okolne sredine. Dimenzije i parametre jednog takvog uređaja najpre su iterativno izračunate i verifikovane u softverskom paketu za numerički proračun putem metode konačnih elemenata. Pri izboru konstrukcionih parametara posebno je vođeno računa o dostupnosti delova i jednostavnosti izrade feromagnetskog jezgra. Nakon ostvarivanja zadovoljavajućih rezultata FEM proračuna, napravljen je i u namenski formiranom solenoidu testiran prototip kalema. Izlazna snaga ostvarena u laboratorijskim uslovima je izuzetno zavisna od vrednosti indukcije koju stvara solenoid, pri čemu su ostvarene vrednosti snage i preko 100 mW . Pokazano je i da bi ostvarena izlazna snaga pri vrednosti indukcije merenoj na realnom transformatoru, uz odgovarajuću kompenzaciju, mogla napajati zajednički baterijski sistem većeg broja senzora koji se postavljaju na jednu transformatorsku jedinicu. Na ovaj način bi se umnogome uštedeo prostor i smanjio broj elemenata koji se postavljaju na transformator. Treba napomenuti da je ovako konstruisan sakupljač snage veoma pogodan za montiranje jer ne zahteva isključenje elektroenergetskog objekta na koji se postavlja niti specijalan način montaže. Dodatno, usled primenjenog oblika feritnog

Tabela III: Rezultati testova sa opterećenjem

R. br	Električne veličine			
	$I_{s,rms}$ [mA]	$U_{R,rms}$ [V]	$I_{R,rms}$ [mA]	P_R [mW]
1	113	3.34	3.34	11.16
2	126	4.21	4.2	17.68
3	184	5.22	5.2	27.14
4	219	6.14	6.1	37.45
5	258	7.1	7.1	50.41
6	294	8	8	64
7	331	8.9	8.9	79.21
8	370	9.81	9.8	96.14
9	404	10.53	10.5	110.56

jezgra, formirani sistem ima veliku toleranciju na odstupanje od idealne orijentacije prilikom postavljanja, što ga čini veoma pogodnim za postavljanje u različitim okruženjima.

LITERATURA

- [1] N. M. Roscoe and M. D. Judd, "Harvesting Energy From Magnetic Fields to Power Condition Monitoring Sensors," in *IEEE Sensors Journal*, vol. 13, no. 6, pp. 2263-2270, June 2013, doi: 10.1109/JSEN.2013.2251625
- [2] Yuan, Sheng, Huang, Yi, Zhou, Jiafeng, Xu, Qian, Song, Chaoyun and Thompson, Pete. (2015). Magnetic Field Energy Harvesting Under Overhead Power Lines. *IEEE Transactions on Power Electronics*. 30. 6191 - 6202. 10.1109/TPEL.2015.2436702.
- [3] Yuan, Sheng, Huang, Yi, Zhou, Jiafeng, Xu, Qian, Song, Chaoyun and Yuan, Guoqiang. (2017). A High Efficiency Helical Core for Magnetic Field Energy Harvesting. *IEEE Transactions on Power Electronics*. 32. 5365 - 5376. 10.1109/TPEL.2016.2610323.
- [4] Wang H, Shi G, Han C. 2021. A Free-Standing Electromagnetic Energy Harvester for Condition Monitoring in Smart Grid. *Wireless Power Transfer* 8: 6685308 doi: 10.1155/2021/6685308
- [5] A. E. Espe, T. S. Haugan and G. Mathisen, "Magnetic Field Energy Harvesting in Railway," in *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 37, no. 7, pp. 8659-8668, July 2022, doi: 10.1109/TPEL.2022.3141437
- [6] Yang, H., Li, Y., Liu, Z., Luo, H., Yan, Y., and He, Z.X. (2023). An Accurate Power Model and High Power Density Design Method of Free-Standing Magnetic Field Energy Harvesters With H-Shaped Core. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 70, 7965-7975.
- [7] Wang, Meng, Feng, Jing, Shi, Yanyan, Shen, Minghui. (2018). Demagnetization Weakening and Magnetic Field Concentration With Ferrite Core Characterization for Efficient Wireless Power Transfer. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. PP. 1-1. 10.1109/TIE.2018.2840485

A SYSTEM FOR POWERING LOW-POWER CONSUMERS BY HARVESTING ENERGY FROM AN EXTERNAL MAGNETIC FIELD

Luka Kostić, Bogdan Brković, Milovan Majstorović, Mladen Terzić

Abstract—This paper describes a device that enables autonomous operation of small consumers by harvesting energy from the external magnetic field, primarily with the idea of exploiting the stray flux of power transformers. The need for such devices arises in applications where, apart from the stray magnetic field, there is no other energy source available to power low-power sensors in transformer stations. These power harvesters should be implemented as standalone and relatively easy to handle, with a high degree of robustness regarding orientation during installation, in order to function under various conditions. The paper presents the conceptual design process of such a device using calculations based on the finite element method. Special attention was given to ensuring simplicity and low production costs of the system. Based on the design tested through simulations, a functional prototype of the device was created and subsequently tested under laboratory conditions. For a reference value of magnetic induction measured on a real transformer, a satisfactory output power value of the energy harvester was achieved. It was determined that the use of such a designed system could enable the powering of one or more sensors.

Index Terms—power transformer, sensor, autonomous operation, stray flux, energy harvesting