

**MOGUĆNOSTI PRIMENE ENERGETSKIH ELEKTRONSKIH TRANSFORMATORA  
POSSIBILITY OF APPLICATION OF POWER ELECTRONIC TRANSFORMERS**Nikola Đorđević, Vladimir A. Katić, *Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad***Oblast – ELEKTROTEHNIKA I RAČUNARSTVO**

**Kratak sadržaj** – U radu su predstavljene konvencionalni i elektronski transformatori i izvršeno je njihovo poređenje, i predstavljena je njihova analiza prema zapremini, težini i ceni. Nakon predstavljanja osnovnih topologija elektronskih transformatora i prikazanih modela za svaku kategoriju topologije, opisana je primena elektronskih transformatora u obnovljim izvorima energije, vučnim sistemima i punjačima električnih automobile. Na kraju su predstavljene problemi i izazovi budućeg razvoja elektronskih transformatora.

**Ključne reči:** Transformatori, Konvencionalni transformatori, Elektronski transformatori

**Abstract** – Conventional and electronic transformers are presented in the paper and their comparison is made and their analysis according to volume, weight and price is presented. After presenting the basic topologies of electronic transformers and presented models for each category of topology, the application of electronic transformers in RES, traction systems and electric car chargers is described. Finally, the problems and challenges of the future development of electronic transformers are presented.

**Keywords:** Transformers, Conventional transformers, Electronic transformers

**1. UVOD**

Tehnologija energetskih transformatora poznata je još od početka razvoja elektrotehnike. Bazira se na osnovnim postavkama elektrotehnike, odnosno zakonu elektromagnetne indukcije i danas predstavlja jednu od najpouzdanijih komponenti elektroenergetskog sistema [1].

Razvoj ovih transformatora sve više ide u pravcu njihove digitalizacije. Uvode se razni elektronski i komunikacioni sklopovi, senzori, merni i nadzorni sistemi (SCADA), automatski regulatori i dr. U praksi, oni se u novije vreme nazivaju *elektronskim transformatorima*, mada ne rade na elektronskim principima.

Pored toga, ovaj termin je raširen i za visoko-frekventne transformatore male snage, koji se nalaze primenu u DC/DC pretvaračima, osvetljenju, i dr. Time se pravi zbrka, jer ugrađena digitalna oprema ili mesto primene ne utiču na princip rada samog transformatora.

**NAPOMENA:**

Ovaj rad proistekao je iz master rada čiji mentor je bio prof. dr Vladimir Katić.

Termin energetski elektronski transformator, EET (engl. *Power Electronic Transformer, PET*), ili elektronski energetski transformator (engl. *Electronic Power Transformer, EPT*), ili solid-stejt transformator (engl. *Solid State Transformer, SST*), koji je tema ovog rada, podrazumeva principijelno drugačiji tip transformatora [2-4]. Radi se o potpuno novoj konstrukciji, koja treba da zameni energetske sklopove transformatora, uređajima energetske elektronike, odnosno odgovarajućim energetskim elektronskim pretvaračima. Time se u suštini menja karakter transformatora, čiji rad se sada zasniva na elektronskim principima uz značajnu primenu najmodernijih digitalnih upravljačkih komponenti (mikroprocesora) i algoritama. Cilj je da se unaprede performanse klasičnog transformatora, smanje gabariti, eliminiše njegov štetni uticaj po okolinu, omogući direktna daljinska kontrola i upravljanje, te unesu druga poboljšanja.

Današnji energetski transformatori nalaze se i u prenosnom i u distributivnom delu elektroenergetskog sistema. Međutim, savremene elektronske komponente, koje su osnova svih energetskih elektronskih pretvarača, imaju ograničena naponska i strujna naprezanja, pa je time limitirana i oblast moguće primene EET i to na distributivnu mrežu.

U ovom preglednom radu biće ukratko predstavljen koncept EET, kao i neke moguće oblasti primene u savremenim distributivnim mrežama.

**2. KONCEPT KONVENCIONALNOG TRANSFORMATORA**

Konvencionalni transformator je električni uređaj, koji transformiše energiju iz jednog kola u drugo posredstvom magnetne sprege, bez ikakvih pokretnih delova. Transformator se sastoji od dva (ili više) spregnuta namotaja ili jednog namotaja sa više izvoda i u većini slučajeva, magnetnog jezgra koje koncentriše magnetni fluks. Brojne su prednosti ovakvog rešenja: jednostavna struktura, visoka pouzdanost i efikasnost, dug vek trajanja, jednostavno priključenje na električnu mrežu, relativno niska cena i dr.

Ipak, uprkos širokoj upotrebi, ovaj transformator ima i odgovarajuće nedostatke, koji su vezani za njegove velike gabarite i težinu, za ugrožavanje životne sredine usled primene mineralnog transformatorskog ulja, koje je kancerogeno, kao i generisanja elektromagnetnih smetnji u neposrednoj okolini, te pojave zujanja i buke i dr. Sve ovo dalo je istraživačima motivaciju da se traga za naprednijim rešenjima, a jedno od najperspektivnijih je EET [2-5]:

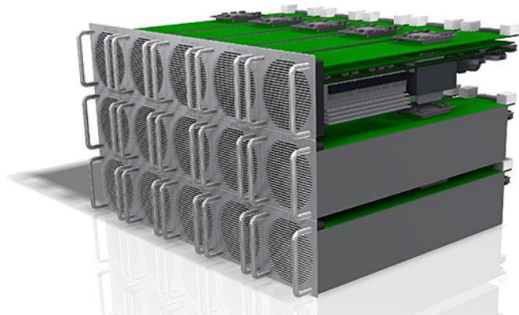
### 3. TEHNOLOGIJA ELEKTRONSKOG TRANSFORMATORA

Poslednjih godina, složenost električne mreže je porasla zbog povećane upotrebe obnovljivih izvora energije i drugih distribuiranih izvora proizvodnje. Zbog te složenosti, nove tehnologije su potrebne zbog bolje kontrole i pouzdanijeg rada mreže.

#### 3.1. Koncept EET

EET su energetske transformatori napravljeni od elemenata energetske elektronike, što znači da nemaju klasične namote kao konvencionalni transformatori te omogućavaju povezivanje mreža različitih karakteristika [5,6]. Elektronski transformator je zapravo konverter AC/AC, vrsta pretvarača električne energije, koji zamenjuje konvencionalni transformator. Može biti manji i efikasniji od konvencionalnog transformatora, jer radi na visokoj frekvenciji.

Da bi se obezbedila mogućnost podizanja/spuštanja izlaznog napona i galvansko odvajanje, u njih se ugrađuju i visoko-frekventni transformatori. Naprednim metodama upravljanja, mogu se obezbediti dodatne karakteristike vezane za prenos aktivne i reaktivne energije, popravku faktora snage, eliminaciju viših harmonica i dr. Na slici 1 predstavljen je fizički izgled distributivnog 10/0,4 kV EET-a razvijen od strane istraživača sa ETH iz Ciriha, gde je uočljiva kompaktna struktura i modularna arhitektura [7].



Sl. 1. EET 10/0,4 kV razvijen od strane ETH Ciriha [7]

#### 3.2. Prednosti i mane EET

EET imaju više prednosti u odnosu na nisko-frekventne konvencionalne transformatore, koje se ogledaju u smanjenoj zapremini i težini (zahvaljujući primeni visoko-frekventnog transformatora), mogućnosti korekcije faktora snage, visokoj upravljivosti, trenutnoj regulaciji napona, izolovanju kvarova, lakoj dijagnostici, odsustvu buke i kancerogenog transformatorskog ulja, niskom nivou zračenja i dr.

Ipak, uprkos ovim prednostima, postoje određeni nedostaci za koje se očekuje da će biti rešeni daljim razvojem tehnologije i napretkom nauke. Neki od ovih problema vezani su za visoke troškove, nižu očekivanu pouzdanost, kao i dostignutu efikasnost. U laboratorijskim istraživanjima ona iznosi od 90% do 98,1%, ali u praktičnom radu može biti nešto manja. U tabeli 1 dato je poređenje konvencionalnog (indukcionog) transformatora i EET. Vidi se da je EET u mnogim aspektima bolji, ali i da postoje nekoliko oblasti u kojima je potrebno iznaći neka izrazitija poboljšanja.

Tabela 1. Poređenje konvencionalnog transformatora i EET

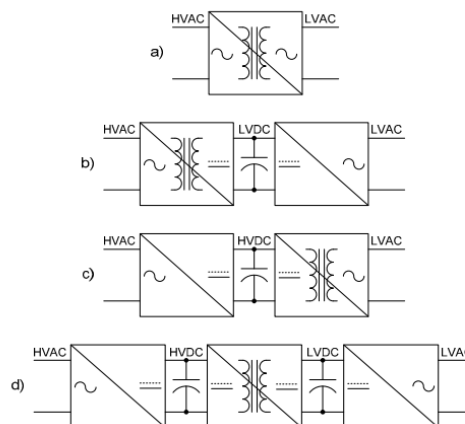
	Konvencionalni transformator	EET
Veličina (gabariti)	Velikog gabarita	Smanjenog gabarita i kompaktan
Težina	Velika težina	Znatno manja težina
Uticaj na životnu sredinu	Uljni transformator zagađuje	Nema zagađenja
Cena	Relativno jeftin	Skup, oko 5x skuplji
Efikasnost	Visoka efikasnost (98 % - 99,5 %)	Niža efikasnost (90 % - 98,1 %)
Harmonici	Pik zbog zasićenja jezgra, harmonici struje	Harmonici su smanjeni pravilnim kontrolisanjem
Regulacija napona	Ima problem sa regulacijom	Trenutna regulacija napona
Faktor snage	Nizak	Skoro jedinični zbog AC-DC konverzije
Izlazni napon	Zavisi od faze opterećenja distributivnog transformatora	Ostaje konstantan zbog pravilno kontrolisanog pretvarača
Struja	Velika struja pokretanja (udarna struja)	Regulisana

### 4. TIPOVI STRUKTURE I TOPOLOGIJE ELEKTRONSKIH TRANSFORMATORA

Topologije elektronskog transformatora se mogu široko klasifikovati u četiri kategorije:

- Jednostepena topologija bez jednosmerne veze
- Dvostepena topologija sa jednosmernom vezom na niskonaponskoj strani
- Dvostepena topologija sa jednosmernom vezom na visokonaponskoj
- Trostepena topologija sa jednosmernom vezom i na visokonaponskoj i niskonaponskoj strani.

Na slici 2 dat je pregled nekoliko najznačajnijih topologija EET-a.



Sl. 2. Topologije EET-a [5]

## 5. PRIMENA EET

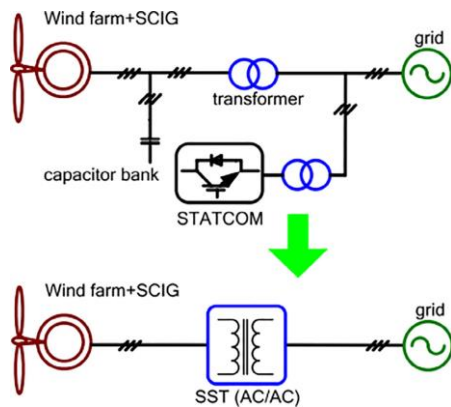
Prelaz sa sadašnjih mreža na napredne mreže sa EET ne može se dogoditi odjednom, već bi se postojeća mreža trebala dizajnirati i uvoditi elektronske transformatore korak po korak.

Primene elektronskih transformatora kao superiorne alternative konvencionalnom transformatoru i novije primene su istražene u nastavku.

### 5.1. Obnovljivi izvori energije

Priroda vetroelektrana je da njihov rad najviše zavisi od aktivnih i reaktivnih snaga koje se prenose u mrežu. U ovim sistemima je potreban kompenzator reaktivne snage za stabilizaciju napona.

Korišćenjem i kombinovanjem funkcije EET, kao što su prenos aktivne snage, kompenzacija reaktivne snage i regulacija napona, može se stvoriti savremeni sistem energije vetra sličan onom prikazanom na slici 3, gde je EET efektivno zamenio dva konvencionalna transformatora, kompenzator reaktivne snage STATCOM i interni kondenzator.



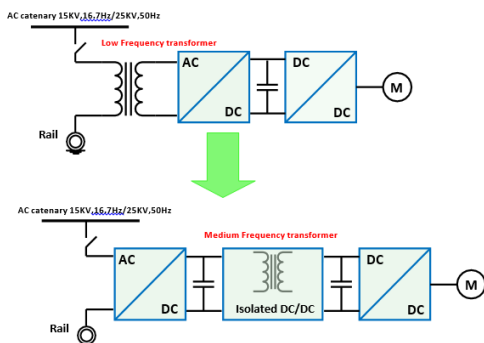
Sl. 3. Sistem energije vetra [5]

### 5.2. Lokomotive i drugi vučni sistemi

Danas mnogi istraživači i kompanije žele da razviju jednofazni elektronski transformator (AC-DC) u vučnim sistemima. U sistemima električne vučne železnice veoma je važno pitanje smanjenja težine i zapremine opreme jer to ima direktan uticaj na povećanje efikasnosti sistema.

Tradicionalni vučni sistemi uključuju nisko frekventne transformatore i back-to-back konvertore (BTB) koji imaju efikasnost između 88% i 92%.

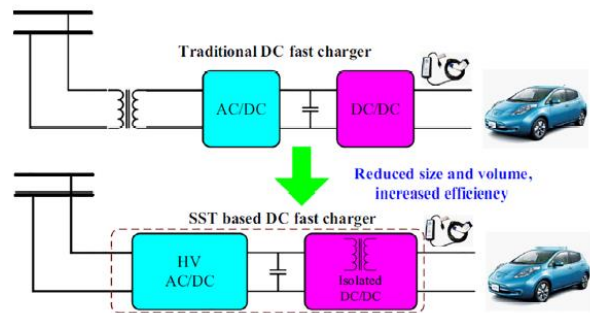
Ako se pomenuti system implementira sa elektronskim transformatorom, njegova efikasnost će dostići više od 95%. Pored toga, smanjuje zapreminu i težinu sistema. Na slici 4 prikazano jedno takvo rešenje.



Sl. 4. Vučni sastav lokomotive i EET [5]

### 5.3. Punjači električnih vozila

Na slici 5 prikazana je tradicionalna struktura sistema punjača koji uključuje niskofrekventne transformatore, AC/DC i DC/DC pretvarače. Efikasnost takvog sistema je oko 90%. Efikasnost ovog sistema se povećava na više od 95% korišćenjem elektronskog transformatora. Pored toga, implementacija ovog sistema zasnovanog na tehnologiji elektronskog transformatora značajno će smanjiti obim i težinu, kao i njegovu cenu. Pristup sa elektronskim transformatorom omogućava spajanje DC punjaca na MV vod sa uklanjanjem LF transformatora.



Sl. 5. Stanica brzog punjenja električnih vozila zasnovana na tehnologiji EET [5]

## 6. PROBLEMI I IZAZOVI BUDUĆEG RAZVOJA TEHNOLOGIJE EET

Razvoj elektronskog transformatora u poslednjoj deceniji privukao je veliku pažnju komercijalista kao zamena konvencionalnog transformatora. Komercijalizacija EET će biti odlučujući faktor njegovog razvoja i implementacije. U nastavku su navedeni značajni budući izazovi koji trenutno ugrožavaju tehnologiju EET-a [4]:

**Troškovi** - Cena EET je mnogo veća od cene konvencionalnog transformatora. Postoje naznake u vezi sa smanjenjem troškova EET na osnovu potencijalne masovne proizvodnje i široke primene. Glavni doprinos ovom smanjenju troškova biće elektronska kola.

**Efikasnost** - Zahtevana ukupna standardna efikasnost za distributivni transformator bilo koje snage mora biti iznad 97%. Uobičajena efikasnost većine tradicionalnih transformatora je veća od 98%, ali elektronski transformator nisu dovoljno efikasni.

**Pouzdanost** - EET su prilično pouzdani, ali ne toliko kao konvencionalni jer koriste aktivnije komponente umesto pasivnih komponenti. Pored toga, potrebna im je opsežna i redovna nega. Pouzdanost zavisi od ocene uređaja i redundantnosti.

**Zaštita** - U normalnim uslovima, elektronski transformator štiti opterećenje od kvarova, pada napona i fluktuacija koje proizilaze iz električne mreže. EET takođe zahteva zaštitu sopstvenih unutrašnjih uređaja i kola od velike struje tokom abnormalnih uslova kao što je kratki spoj magistrale na DC strani. Očekuje se da EET izdrži nenormalne uslove, koji uključuju eksterne greške, kvarove na mreži, greške na nivou pretvarača, kvarove DC-sabirnice.

**Kompatibilnost** - Promena mrežne infrastrukture je neverovatna i troškovno neefikasna. Međutim, implementacija EET u mikro mreži je bolji pristup za postepenu zamenu konvencionalnih.



Izolacija - Iako EET obezbeđuje galvansku izolaciju preko visokofrekventnog transformatora, što je zahtev pametnih mreža, on uključuje više međustepena. Ovi međustepeni smanjuju efikasnost.

## 7. BUDUĆI PRAVCI RAZVOJA TEHNOLOGIJE EET

Pravci razvoja i unapređenja tehnologije EET u budućim energetske sistemima, radu i upravljanju su:

1. Finansijska procena tehnologije EET treba da se istraži i proceni zahteve za kalibraciju, filtriranje, zaštitu, komunikaciju, validaciju, sajber bezbednost i kvalitet energije. Pored toga, studija o isplativoj tehnologiji energetske elektronike u nastajanju u integrisanom EET će biti neophodna da bi se zamenio konvencionalni transformator u pravcu napretka tehnologije EET-a u budućnosti;
2. Tehnologija EET-a bi mogla biti obećavajuće rešenje za upravljanje obnovljivom energijom integrisano u mrežu u elektroenergetskim sistemima sledeće generacije.
3. Tehnologija EET-a sa efikasnim energetske ruterom i visokim nivoom funkcionalnosti može se koristiti za ispitivanje efikasnosti u različitim domenima, uključujući mrežnu inteligenciju, energetske elektroniku, komunikacije i zahteve mrežnog protokola;
4. Zaštita tehnologije EET-a zahteva dalju evaluaciju u okolnostima prevelike struje i prenapona. Stoga, napredne šeme zaštite sa poboljšanom kontrolnom funkcijom, kao i filteri i zaštitni releji mogu da igraju ključnu ulogu u sprečavanju nestanka struje pod pristupima brzog smanjenja opterećenja;
5. Komunikacija između EET i energetske uređaja u realnom vremenu je od vitalnog značaja za rešavanje problema razmene informacija i prenosa. Dakle, potrebna je inteligentna energetska informaciona struktura da bi napredni kompatibilni komunikacioni sistem prevazišao probleme pouzdanosti, bezbednosti i kašnjenja u prenosu.

## 8. ZAKLJUČAK

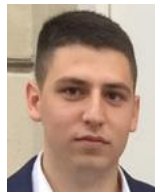
Konvencionalni indukcionni transformator, iako jednostavne strukture i dugog veka trajanja, kao i velike efikasnosti, ipak ima nedostatke, kao što su uticaj na okolinu (zbog ulja i elektromagnetnog zračenja), robustnost i velika težina, zasićenje jezgra za nelinearno opterećenje, loša regulacija napona, veliki gubici, bez kompenzacije snage, bez izolacije kvara. Većina ovih problema je smanjena ili potpuno rešena pomoću elektronskog transformatora.

Polje primene EET zasnovanog na energetskej elektronici, nije ograničeno na nivo distribucije, već takođe ima kapacitet da ga potpuno zameni u bliskoj budućnosti. EET se pokazao kao obećavajući kompenzator sa mnogim prednostima kao što su visok kvalitet energije, kontrola napona, izolacija kvara i kompenzacija reaktivne snage.

## 9. LITERATURA

- [1] J. Winders, "Power Transformers – Principles and Applications", CRC Press, Boca Raton, USA, 2002.
- [2] J. Feng, et al., "Power Electronic Transformer-Based Railway Traction Systems: Challenges and Opportunities", *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, Vol. 5, No.5, Sep. 2017, pp.1237–1253.
- [3] D. Wang et al., "Theory and Application of Distribution Electronic Power Transformer", *Electric Power Systems Research*, Vol. 77, Iss. 3-4, March 2007, pp.219–226.
- [4] S. Khan, et al., "Solid-State Transformers: Fundamentals, Topologies, Applications, and Future Challenges", *Sustainability*, Vol.14, #319, 2021,
- [5] H. Shadfar, M.G. Pashakolaei, A.A. Foroud, "Solid-state transformers: An overview of the concept, topology, and its applications in the smart grid", *International Transaction on Electrical Energy Systems*, Vol.31, e12996, 2021, pp.1-24.
- [6] V. Nejšgebauer, V. Katić, "Elektronski transformatori - pregled i rešenja", *Zbornik radova Fakulteta tehničkih nauka*, God.25, Br.15, 2010, pp.3305-3308
- [7] <https://pes.ee.ethz.ch/research/research-and-thesis-projects/ac-ac-converters/AC-AC-Converters-1.html>

### Kratka biografija:



**Nikola Đorđević** rođen je u Smederevu 1993. god. Master rad na Fakultetu tehničkih nauka iz oblasti Elektrotehnike i računarstva – Energetska elektronika i električne mašine odbranio je septembra 2022. god.



**Vladimir Katić** je rođen 1954. godine u Novom Sadu, gde je diplomirao na FTN 1978. god. Magistrirao je i doktorirao na Univerzitetu u Beogradu 1981. god. i 1991. god., respektivno Od 2002. god. je redovni profesor Univerziteta u Novom Sadu. Oblasti interesovanja su energetska elektronika, obnovljivi izvori električne energije, električna vozila i kvalitet električne energije