

Ivan Perišić, mag. Ing. el.
Končar D&ST
Ivan.Perisic@koncar-dst.hr

Kristijan Špoljarić, mag. Ing. el.
Končar D&ST
Kristijan.Spoljaric@koncar-dst.hr

UTJECAJ POGONSKIH UVJETA U OKRUŽENJU DIE NA DISTRIBUCIJSKE TRANSFORMATORE

SAŽETAK

Tehnologije poput sunčanih i vjetro-turbinskih elektrana, sustava za pohranu energije i e-mobilnosti ključne su za postizanje klimatske neutralnosti, no postoje prepreke za njihov puni razvoj i integraciju u elektroenergetski sustav, koji je prvotno projektiran za radialno napajanje. Fluktuacije proizvodnje iz intermitentnih obnovljivih izvora energije (OIE) i povećana potrošnja povezane s e-mobilnošću zahtijevaju prilagodbu mrežnih infrastruktura. Ove promjene utječu na distribucijske transformatore, koji se suočavaju s novim izazovima u pogledu stabilnosti napona i kvalitete električne energije. U radu se analizira razlikuju li se transformatori u ovim uvjetima od konvencionalnih mrežnih distribucijskih transformatora.

Europska unija bilježi značajan porast instalirane snage iz decentraliziranih izvora energije (DIE), uz istovremeni rast instalacija sustava za pohranu energije (BESS) i e-mobilnosti. Projekcije su takve da se očekuje daljnji porast ovih tehnologija u nadolazećim godinama, što će dodatno mijenjati dinamiku opterećenja mreža. Iz tog razloga, potrebna su dodatna ulaganja i tehnička rješenja kako bi se osigurala stabilnost elektroenergetskog sustava (EES) i kvaliteta električne energije.

Ključne riječi: DIE, distribucijski transformator, stabilnost EES-a, kvaliteta električne energije

IMPACT OF OPERATING CONDITIONS IN THE DER ENVIRONMENT ON DISTRIBUTION TRANSFORMERS

SUMMARY

Technologies such as solar and wind power plants, energy storage systems, and e-mobility are crucial for achieving climate neutrality, but there are obstacles to their full development and integration into the power grid, which was originally designed for radial power supply. Fluctuations in energy production from RES (renewable energy sources) and increased consumption linked to e-mobility require adjustments to grid infrastructure. These changes impact distribution transformers, which face new challenges in terms of voltage stability and power quality. This study examines whether transformers under these conditions differ from conventional network distribution transformers.

Currently, the European Union is experiencing a significant increase in installed capacity from decentralized energy resources (DER), along with a rise in battery energy storage system (BESS) installations and e-mobility. Projections suggest further growth of these technologies in the coming years, which will continue to alter grid load dynamics. Therefore, additional investments and technical solutions are required to ensure the stability of the power system and the quality of electricity.

Key words: DER, distribution transformer, power system stability, power quality

1. UVOD

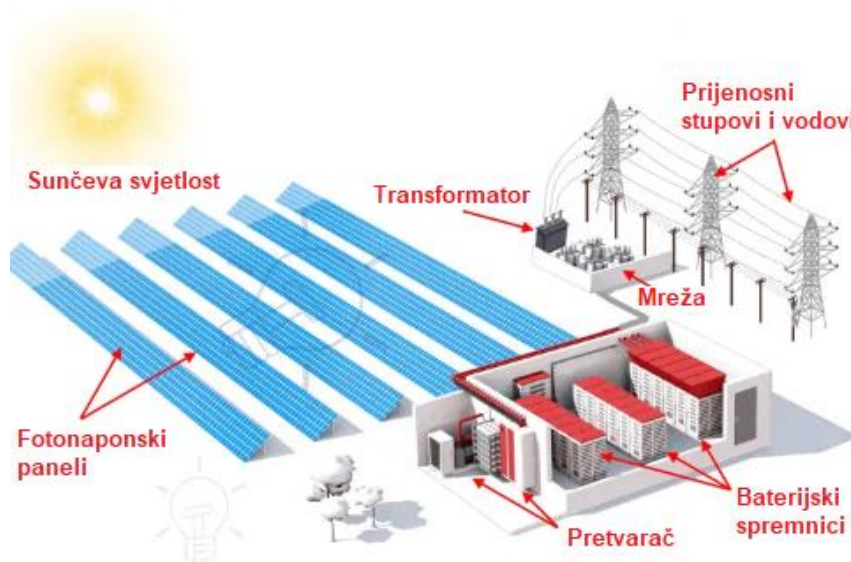
Razvoj i implementacija obnovljivih izvora energije, osobito sunčanih elektrana i vjetroelektrana te baterijskih sustava, ključni su faktori u procesu dekarbonizacije elektroenergetskih sustava i prelaska na održivije izvore energije. Iako ove tehnologije značajno pridonose smanjenju emisije CO₂, njihova integracija u postojeću distribucijsku mrežu stvara nove izazove i to u pogledu stabilnosti napona i struje. Ovi izazovi također otvaraju prostor za daljnji razvoj distribucijskih mreža, s naglaskom na implementaciju naprednih mreža koje omogućuju bolju prilagodbu i integraciju novih izvora energije.

Sunčane elektrane, zbog svoje ovisnosti o sunčevoj energiji, podložne su varijacijama u proizvodnji koje su direktno povezane s vremenskim uvjetima. U situacijama kada fotonaponski paneli proizvode veliku količinu energije, može doći do prenapona u mreži, dok niska proizvodnja može izazvati pad napona. S druge strane, baterijski sustavi, koji su često integrirani s ciljem stabilizacije mreže, mogu također uzrokovati probleme, poput strujnih udara uslijed naglog punjenja ili pražnjenja, te nelinearnih izobličenja struje koja proizlaze iz primjene energetske elektronike.

Pojave poput oscilacija napona, harmonika i neravnoteže struja mogu ozbiljno ugroziti pouzdanost mreže i uzrokovati degradaciju opreme, smanjiti kvalitetu električne energije te povećati gubitke u sustavu. Spomenute pojave unutar EES-a utječu i na distribucijske transformatore u blizini OIE. Stoga je od ključne važnosti razumjeti uvjete koji dovode do ovih neželjenih pojava, kao i razviti učinkovite strategije za njihovo smanjenje i prevenciju, kako bi se očuvala stabilnost elektroenergetskog sustava i osigurala pouzdana opskrba električnom energijom. Također, potrebno je vidjeti razliku li se dizajn transformatora namijenjenog za rad u mreži u kojoj se očekuju prethodno opisani uvjeti u odnosu na konvencionalne distribucijske transformatore. Naglasak u radu je na izmjenjivačkim transformatorima u sunčanim elektranama.

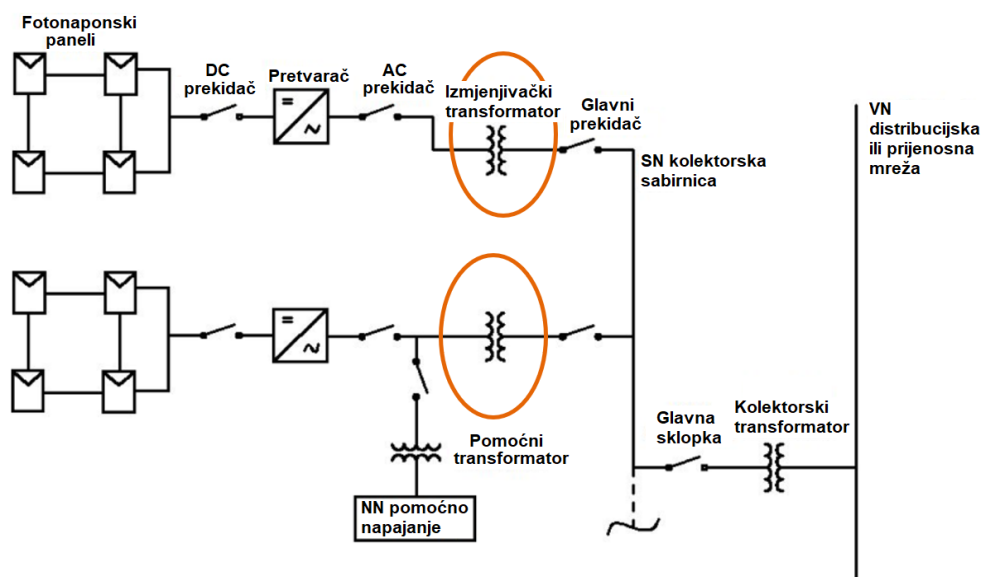
2. FUNKCIJA I OSNOVNE KARAKTERISTIKE IZMJENJIVAČKIH TRANSFORMATORA U SUNČANIM ELEKTRANAMA

Sunčane elektrane sastoje se od nekoliko ključnih elemenata, među kojima su fotonaponski paneli, izmjenjivači, niskonaponski i visokonaponski kabeli, transformatorske stanice te transformatori, slika 1.



Slika 1. Ključni elementi sunčanih elektrana

Transformatori, koji igraju centralnu ulogu u prijenosu električne energije, široko se koriste u ovakvim sustavima, jer omogućuju učinkovito podizanje napona s izlaza izmjenjivača na srednjenaponsku razinu, slika 2. Međutim, spomenuti transformatori isto tako mogu raditi i kao silazni (eng. *step-down*) transformatori, kada je tok energije u sustavu obrnut, što se obično događa u uvjetima kada fotonaponski paneli ne proizvode energiju, poput noći ili oblačnih dana [1].



Slika 2. Prikaz procesa pretvorbe sunčevog zračenja u korisnu izmjeničnu električnu energiju uz pomoć dvonamotnog transformatora

U standardnom, uzlaznom načinu rada, kada izmjenjivački transformator podiže naponski nivo, postoji rizik prijenosa visokofrekventnih naponskih smetnji, osobito harmonika, s niskonaponskog (NN) na visokonaponski (VN) namot transformatora, a zatim u mrežu. S obzirom na to da harmonici nastaju uslijed pretvorbe istosmjernog u izmjenični napon, njihov sadržaj u struji visokonaponskih postrojenja ovisi o interakciji između izmjenjivača i transformatora te mogućim rezonancijama unutar sustava. Stoga je ključno specificirati sadržaj harmonika pri odabiru transformatora, kao i razmotriti ovo pitanje u pregovorima s proizvođačima transformatora.

U sunčanim elektranama najčešće se koriste uljni transformatori punjeni mineralnim uljem ili esterima, dok su suhi transformatori, bilo klasični suhi bilo zaliveni, rjeđa opcija. Tipična naziva snaga izmjenjivačkih transformatora u ovim sustavima varira između 400 kVA i 5000 kVA, dok su naponi na visokonaponskoj strani obično između 10 kV i 35 kV.

Ovaj tip transformatora obično je opremljen preklopkom koja omogućuje prilagodbu primarnog napona u beznaponskom stanju, u skladu s naponom mreže na mjestu ugradnje, pri čemu se napon regulira u stupnjevima $\pm 2,5\%$ ili $\pm 5\%$ nazivnog napona.

Transformatori koji se koriste u distribuciji za povezivanje izmjenjivača u sunčanim elektranama mogu biti dvonamotni ili tronamotni, ovisno o potrebama strujnog opterećenja na niskonaponskoj strani sustava. Za tržišta Hrvatske i Europske unije, distributivni izmjenjivački transformatori moraju udovoljavati strogim zahtjevima ekološkog dizajna, koji se odnose na smanjenje gubitaka, u skladu s Uredbom Komisije (EU) 548/2014, kao i zahtjevima normi IEC 60076, kako bi se osigurala njihova efikasnost i dugoročna održivost unutar elektroenergetskog sustava

3. ANALIZA UVJETA U MREŽI S NAGLASKOM NA DISTRIBUCIJSKE IZMJENJIVAČKE TRANSFORMATORE

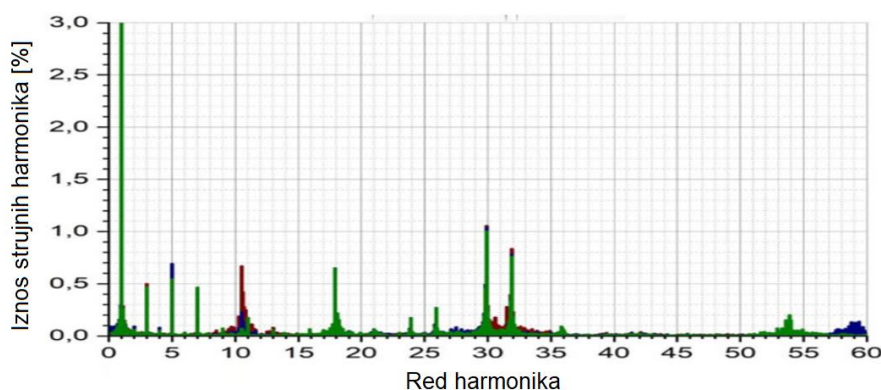
Distribucijski izmjenjivački transformatori imaju ključnu ulogu u održavanju stabilnosti elektroenergetske mreže i osiguravanju kvalitete električne energije i to u područjima gdje se nalaze sunčane elektrane i baterijski sustavi. Ovi transformatori omogućuju prijenos energije s niskonaponske (NN) na visokonaponsku (VN) stranu mreže, uz istovremeno očuvanje sinusoidalnog oblika i kvalitete napona. Spomenuti transformatori izloženi su specifičnim pojavama koje mogu utjecati na njihov rad i vijek trajanja, a te pojave uključuju:

3.1. Viši harmonici i harmonička izobličenja

Kao što je prethodno i spomenuto, prilikom projektiranja transformatora, posebnu pažnju treba posvetiti harmoničkom izobličenju (eng. *Total Harmonic Distortion - THD*), koje označava izobličenje osnovnog vala napona i struje uslijed prisutnosti viših harmonika. Solarne elektrane i baterijski sustavi, koji koriste elektrotehničke pretvarače, često generiraju harmonike tijekom procesa pretvorbe jednosmjerne struje (DC) u izmjeničnu struju (AC).

U većini EES-a, strujni harmonici imaju značajniji utjecaj u usporedbi s naponskim harmonicima. Prisutnost harmonika u sustavu povećava zagrijavanje transformatora, što može dovesti do pregrijavanja namota i ubrzanog starenja izolacije i njezine razgradnje, što znatno smanjuje efikasnost i vijek trajanja transformatora. Visoke temperature i prisutnost harmonika u transformatorima punjenim tekućinom mogu ubrzati oksidaciju ulja i stvaranje plinova (vodika). Oksidacija degradira kvalitetu ulja, smanjujući njegovu sposobnost da adekvatno izolira i hladi transformator. Degradirano ulje smanjuje dielektričnu čvrstoću izolacije, što znači da izolacija postaje slabija i može doći do električnog proboja ili kvara u transformatoru.

Na slici 3. prikazan je primjer harmoničkog izobličenja koje se javlja tijekom povećanog opterećenja transformatora koji se nalazi u blizini sunčane elektrane. Također, iz priložene tablice može se primijetiti da je na istom tom transformatoru uočena povećana prisutnost vodika u ulju.



Plinovi	Vodik (H ₂)	Metan (CH ₄)	Acetilen (C ₂ H ₂)	Etilen (C ₂ H ₄)	Etan (C ₂ H ₆)	Ugljikov monoksid (CO)	Ugljikov dioksid (CO ₂)
Izmjereno ppm	2494	277	0.2	0.8	24.2	226	1062

Slika 3. Sadržaj harmonika i plinova na primjeru izmjenjivačkog transformatora

Valni oblik svakog pretvarača možda nije u potpunosti sinkroniziran, što dovodi do poremećaja magnetskog toka transformatora i promjene u njegovoj veličini, obliku vala i sadržaju harmonika. Česta pojava je i prijenos istosmjernih strujnih harmonika s pretvarača na spojeni namot transformatora. Istosmjerna struja povećava struju magnetiziranja transformatora, što dovodi do zasićenja jezgre. Rezultat ovih pojava je porast vrtložnih struja, temperature jezgre i razine buke [1].

Stoga, pri dizajnu transformatora za sunčane elektrane i baterijske sustave, posebna pažnja posvećuje se hlađenju transformatora te odabiru odgovarajuće izolacije namota. Preporučuje se ugradnja elektrostatskog ekrana između visokonaponskog (VN) i niskonaponskog (NN) namota kada ukupni harmonijski izobličeni faktor (THD) prelazi 5%. Prema IEC 60076-1 standardu, kod normiranih uvjeta rada, THD bi trebao biti manji od 5%, a elektrostatski ekran se instalira samo na zahtjev korisnika, o čemu će više riječi biti u poglavlju 4.

3.2 Fluktuacije napona

Sunčane elektrane, ovisno o uvjetima sunčevog zračenja, proizvode energiju koja može izazvati fluktuacije napona u mreži. U situacijama kada proizvodnja energije premašuje lokalne potrebe, višak energije se preusmjerava natrag u distribucijsku mrežu, što dovodi do obrnutih tokova energije [3], slika 4.

Takvi tokovi mogu prouzročiti pojavu prenapona na niskonaponskoj strani transformatora, koji su obično dizajnirani za jednosmjerni tok energije, ali isto tako povećava se i rizik od prekoračenja dopuštenog nazivnog napona koji prema mrežnim pravilima i normi EN 50160 u Hrvatskoj mora biti unutar maksimalno dozvoljenih $\pm 10\%$. U tom kontekstu, transformatori moraju biti dizajnirani tako da omogućuju protok struje u oba smjera, odnosno kao "uzlazni" i "silazni" transformatori, čime se omogućuje rad u uvjetima s promjenjivim tokom električne energije.



Slika 4. Dvosmjernan tok električne energije

S druge strane, tijekom noći ili oblačnih dana kada solarna proizvodnja opada, a opterećenje raste, transformatori mogu doživjeti značajne padove napona. Naponske fluktuacije mogu uzrokovati toplinske stresove, ubrzati starenje izolacije i aktivirati zaštitne uređaje, što može poremetiti stabilnost mreže. Jedno od rješenja ovog problema je ugradnja sklopke s automatskom regulacijom napona koja radi pod teretom umjesto klasične preklopke. Na taj način se napon održava unutar propisanih granica te nema potrebe za širenjem tradicionalne elektroenergetske mreže za svladavanje varijacija napona.

Visokonaponski namoti mogu također biti podložni prijelaznim prenaponima, čiji su uzroci ponovna paljenja sredjenaponskih prekidača, što zahtijeva dodatnu zaštitu u obliku odvodnika prenapona na tim priključnicama. Svaki prekidač ima svoj "prozor ponovnog paljenja" (eng. *reignition window*), koji ovisi o brzini uspostavljanja dielektrične čvrstoće međukontaktne razmaka, a koja pak ovisi o mediju gašenja, brzini kontakata i obliku elektroda. Prekidači koji koriste vrlo visoke vrijednosti rezane struje obično imaju ponovno paljenje tijekom prvog vrha prenapona rezanja, dok prekidači s nižim rezanim strujama (poput plinom izoliranih prekidača SF6) rijetko ponovo pale pri prvom prenaponu rezanja [1].

3.3. Asimetrična opterećenja

Kao što je u prethodnom poglavlju spomenuto, sunčane elektrane mogu uzrokovati neuravnotežena opterećenja, npr. značajno preopterećenje transformatora tijekom sunčanih sati, dok tijekom noći transformatori ostaju gotovo neopterećeni, kada su prisutni samo gubitci u praznom hodu. Takve fluktuacije opterećenja, u kombinaciji s noćnim rasterećenjem, mogu izazvati termičke i mehaničke sile koje negativno utječu na namote i izolaciju transformatora. Tijekom dnevnog rada, transformatori mogu doživjeti fluktuacije snage, koje mogu varirati od 20% do 100% nominalne snage u razdoblju od 5 do 10 minuta. Ovakve fluktuacije nastoje se smanjiti zbog toplinske vremenske konstante komponenti transformatora [1].

Transformatori se također redovito uključuju i isključuju tijekom puštanja u rad i održavanja, a česta isključenja, primjerice noću radi uštede u gubiticima, mogu dovesti do dodatnih mehaničkih i električnih naprezanja. Ova naprezanja, uključujući asimetrično opterećenje u slučaju tronamotnih transformatora, mogu uzrokovati povećano zagrijavanje namota i jezgre, zasićenje jezgre, a u ekstremnim slučajevima i smanjenje efikasnosti sustava.

Transformator mora biti projektiran za dugotrajan rad u uvjetima asimetričnog opterećenja na sekundarnoj (NN) strani. To znači da, u slučaju dizajna s tri namota, transformator mora raditi pouzdano čak i kada samo jedan pretvarač napaja jedan NN namot.

3.4. Frekvencijske oscilacije i nestabilnost frekvencije

Brze promjene i neuravnoteženost u proizvodnji i potrošnji energije u električnoj mreži mogu izazvati oscilacije frekvencije koje transformatori moraju apsorbirati ili prenijeti. Da bi transformatori učinkovito prenijeli energiju moraju raditi s konstantnim naponom i frekvencijom. Ako frekvencija oscilira previše, transformatori mogu postati nestabilni, što može dovesti do kvarova, oštećenja ili smanjenja učinkovitosti, tj. sposobnosti koordinacije s ostatkom mreže kako bi ostala stabilna. To je posebno izraženo u manjim mrežama koje nemaju dovoljno razvijen sustav za regulaciju frekvencije u blizini sunčanih elektrana i baterijskih sustava.

3.5. Rezonantne pojave

Interakcije između transformatora, kabela i invertera u sustavima s nelinearnim induktivitetom transformatora i značajnim kapacitetom kabela mogu uzrokovati pojavu rezonancije na određenim frekvencijama. Takva rezonancija može dovesti do povećanja harmonika, zasićenja magnetske jezgre transformatora i pregrijavanja sustava, a to pak uzrokuje oštećenje komponenti transformatora i smanjuje učinkovitost sustava.

Kod primjene tronamotnih transformatora gdje se oba sekundarna niskonaponska (NN) namota napajaju posebnim izmjenjivačem, može se javiti rezonancija kod sklopnih operacija bipolarnih tranzistora s izoliranom upravljačkom elektrodom (eng. *Insulated gate bipolar transistor - IGBT*) u izmjenjivačima koji nisu sinkronizirani [1].

4. PREPORUKE ZA DIZAJN IZMJENJIVAČKIH TRANSFORMATORA

4.1 Poboljšani dizajn izolacije

Izolacijski sustav izmjenjivačkih transformatora trebao bi biti pojačan kako bi podnio više harmonijske frekvencije i prenaponske udare. Korištenje izolacijskih materijala otpornih na visoke temperature, poput termički unaprijeđene celuloze ili sintetičkih alternativa s poboljšanim dielektričnim svojstvima, može značajno produljiti vijek trajanja transformatora.

Ovi materijali smanjuju učinke djelomičnih izboja i rizik od kvarova izolacije, čime se osigurava veća pouzdanost i dugovječnost uređaja. Jačanje izolacijskog sustava ključno je za povećanje otpornosti transformatora na električna naprezanja koja nastaju zbog dinamičkih uvjeta rada.

Termički poboljšani papir (eng. *Thermally upgraded paper – TUP*) je papir na bazi celuloze koji je kemijski modificiran kako bi se smanjila brzina razgradnje papira. Svrha toplinske nadogradnje izolacijskog papira je neutralizacija kiselina uzrokovanih toplinskom degradacijom celuloze tijekom vijeka trajanja transformatora. Termički poboljšani papir zadržava mnogo veću rasteznu čvrstoću i čvrstoću na pucanje od netretiranog papira kada je izložen povišenim temperaturama.

4.2 Poboljšani sustav hlađenja

Visoke razine harmonika karakterističnih za transformatore u blizini pretvarača, direktno utječu na veća termička opterećenja izolacije te time zahtijevaju i bolje hlađenje. Kod dizajniranja hlađenja transformatora potrebno je osigurati zalihost u proračunima dilatacije i zagrijanja.

Također, ako pogonski uvjeti to zahtijevaju, transformatori bi trebali biti opremljeni naprednim sustavima hlađenja, poput hlađenja prisilnim zrakom ili prisilnim uljem, ovisno o profilu opterećenja i uvjetima okoliša u postrojenju. Ključno je i osigurati pravilnu ventilaciju oko transformatora kako bi se izbjeglo stvaranje lokaliziranih toplinskih točaka (eng. *Hot spot*).

4.3 Odabir materijala namota i jezgre

Dizajn namota treba uključivati materijale s višom toplinskom vodljivošću i smanjenim električnim otporom kako bi se ograničilo zagrijavanje uzrokovano harmonijskim strujama. U mnogim slučajevima bakreni namotaji su poželjniji od aluminijskih zbog boljih toplinskih svojstava.

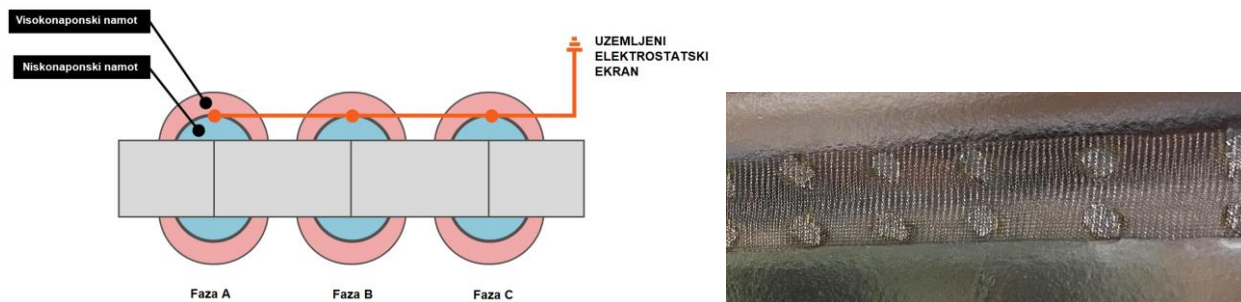
Odabir materijala jezgre s nižim gubicima uslijed histereze i vrtložnih struja može smanjiti ukupno toplinsko opterećenje transformatora.

4.4 Predimenzioniranje transformatora

U mnogim slučajevima, predimenzioniranje transformatora (dizajniranje tako da radi ispod svog nominalnog kapaciteta) može osigurati sigurnosnu rezervu koja smanjuje opterećenje na izolacijski i rashladni sustav. Ovakav pristup povećava pouzdanost transformatora u promjenjivim radnim uvjetima sunčanih elektrana.

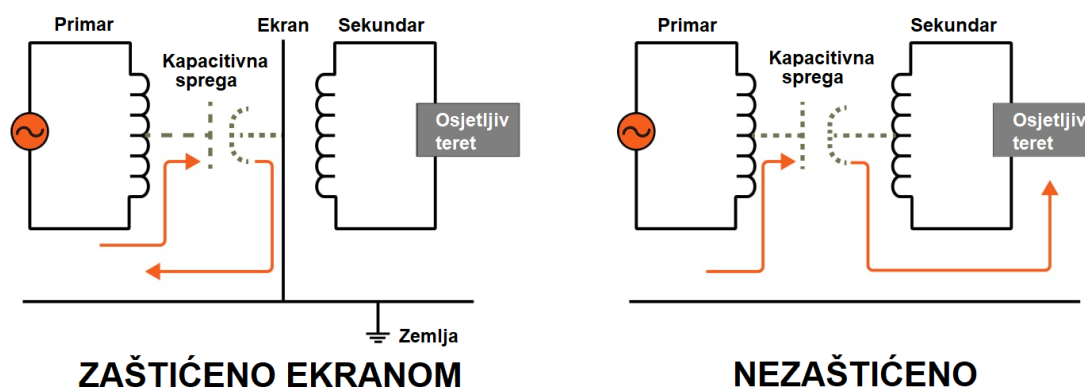
4.5 Dizajn s elektrostatskim ekranom

Elektrostatski ekran, obično bakrena ili aluminijska metalna mrežica, smješta se između primarnog i sekundarnog namota transformatora i uzemljuje, slika 5. Na taj način se sprječava prijenos visokonaponskih smetnji poput harmonika, pulsacija i udarnih napona s izmjenjivača prema mreži. Uloga ovog ekrana je i u smanjenju prijenosa tranzijenata (prenapona) iz srednjenaponske (SN) mreže na niskonaponsku stranu transformatora, te povećanju impedancije između namota, što doprinosi smanjenju mogućih štetnih učinaka tih smetnji. Elektrostatski ekran koristi se kod transformatora u mrežama s visokim udjelom pretvarača, poput sunčanih i vjetro-turbinskih elektranama, sustava za pohranu energije u baterijama (BESS) i za izolaciju pogona.



Slika 5. Elektrostatski ekran

Uzemljeni elektrostatski ekran smanjuje kapacitivnu vezu između primarnog i sekundarnog namota, slika 6. Umjesto povezivanja sa sekundarnim namotom, primarni namot se povezuje s ekranom koji osigurava put niske impedancije prema zemlji. Naponske smetnje preusmjeravaju se dalje od sekundarnog namota. Ovaj mehanizam djeluje i u suprotnom smjeru transformatora (od sekundarnog prema primarnom).



Slika 6. Kapacitivna veza primarnog i sekundarnog namota transformatora [8]

Elektrostatski ekrani osiguravaju zaštitu za transformator, elektroenergetsku mrežu i pretvarač. Smanjuju naponski stres na izolaciju što smanjuje termičko i električno starenje materijala izolacije čime se produljuje vijek trajanja transformatora i smanjuje mogućnost pojave kvarova i ispada.

5. ISPITIVANJE IZMJENJIVAČKIH DISTRIBUCIJSKIH TRANSFORMATORA

Prema normi IEC 60076-1:2011 [2], ispitivanja transformatora, pa tako u ovom slučaju i izmjenjivačkih transformatora, klasificirana su u tri osnovne skupine: rutinska, tipska i specijalna ispitivanja. Ispitivanje novih transformatora provodi se u proizvodnim pogonima prilikom preuzimanja transformatora, osim ako nije drugačije dogovoreno između proizvođača i kupca [5]. Norma [2] pruža smjernice za ispitivanja, dok kupac transformatora odlučuje koja će specifična ispitivanja biti provedena.

5.1 Rutinska ispitivanja

Rutinska ispitivanja obavljaju se na svakom pojedinačnom transformatoru koji je proizveden. Ova ispitivanja uključuju osnovne testove koji jamče ispravnost i funkcionalnost transformatora prije nego što se isporuči kupcu. Rutinska ispitivanja obuhvaćaju mjerenja otpora, prijenosnog omjera i provjeru grupe spoja, napona kratkog spoja i gubitaka tereta, gubitaka praznog hoda i struje magnetiziranja, dielektrična ispitivanja, provjera izolacije, nepropusnosti kotla te test preklopke (sklopke).

5.2 Tipska ispitivanja

Tipska ispitivanja provode se na reprezentativnim modelima transformatora određenog tipa. Ova ispitivanja obuhvaćaju sve testove potrebne za potvrdu specifičnih karakteristika dizajna transformatora, poput pokusa zagrijavanja, mjerenja buke, tipskih dielektričnih ispitivanja te mjerenja gubitaka praznog hoda i struje magnetiziranja pri $0,9 U_n$ i $1,1 U_n$.

5.3 Specijalna ispitivanja

Specijalna ispitivanja obavljaju se na zahtjev kupca, a provode se u iznimnim okolnostima ili kada specifične primjene zahtijevaju dodatne testove. Za transformatore koji se koriste u sunčanim elektranama, specijalna ispitivanja obično uključuju [1]:

- **Impulsno ispitivanje na niskonaponskoj strani:** Ovo ispitivanje osigurava da transformator podnosi naponske skokove i udare koji mogu nastati zbog raznih operativnih uvjeta.
- **Mjerenje parcijalnih izbijanja PD (engl. Partial Discharge):** Ovaj test, koji se provodi na suhim i uljnim transformatorima, omogućava otkrivanje unutarnjih oštećenja i potencijalnih problema u izolaciji. Parcijalna izbijanja se rutinski ispituju kod suhih transformatora s naponom višim od 1,2 kV.

Osim navedenih, prema dogovoru s kupcem, mogu se provesti i druga specijalna ispitivanja, kao što su testovi koji mjere prisutnost viših harmonika u struji magnetiziranja, što je relevantno za transformatore u sustavima s distribuiranim izvorima energije.

Za projektiranje, proizvodnju i ispitivanje izmjenjivačkih transformatora u sustavima sunčanih elektrana kao referentna norma koristi se IEEE C57.159-2016, „Guide on Transformers for application in Distributed Photovoltaic (DPV) Power Generation System“ [1]. Ova norma pruža smjernice koje specifične zahtjeve i karakteristike trebaju ispuniti transformatori koji se koriste u sustavima s integriranim intermitentnim OIE. Korištenjem norme [1] kao smjernice i provedbom odgovarajućih ispitivanja, osigurava se dugoročna pouzdanost, sigurnost i efikasnost transformatora u primjenama povezanim s takvim sustavima.

6. PREPORUKE ZA RUKOVANJEM I ODRŽAVANJEM TRANSFORMATORA

6.1 Redovito praćenje harmonika

Kontinuirano praćenje razina harmoničkih smetnji (THD) na izlazu pretvarača je ključno. Pravovremeno otkrivanje prekomjernih razina harmonika omogućuje operaterima postrojenja da poduzmu korektivne mjere, poput podešavanja postavki pretvarača ili primjene aktivnih ili pasivnih harmonijskih filtara, kako bi smanjili opterećenje na transformator.

6.2 Izbjegavanje čestih uklapanja i sklapanja

Opetovano uključivanje i isključivanje transformatora (posebno pod opterećenjem) može uzrokovati električne prijelazne pojave i mehanička naprezanja, što doprinosi prijevremenom kvaru. Preporučuje se izbjegavati učestalo uključivanje, osobito pri visokim razinama opterećenja, primjenom pametnih strategija upravljanja opterećenjem.

6.3 Uravnoteživanje napona i opterećenja

Održavanje uravnoteženih uvjeta napona i opterećenja na svim fazama transformatora ključno je za sprječavanje preopterećenja i neravnomjernog toplinskog naprezanja namota. Neuravnotežena opterećenja mogu uzrokovati lokalno pregrijavanje i ubrzati kvar izolacije.

6.4 Pravilno uzemljenje i prenaponska zaštita

Uzemljenje i prenaponska zaštita ključni su u sunčanim elektranama, gdje su izmjenjivački transformatori često izloženi nepovoljnim vanjskim uvjetima. Pravilno izabrani odvodnici prenapona mogu pomoći u zaštiti transformatora od udara munja i prenapona izazvanih mrežom. Česti su zahtjevi za ugradnjom odvodnika prenapona VN priključnica koji mogu biti podložni prijelaznim naponima uslijed ponovnih paljenja prekidača.

6.5 Rigorozniji program održavanja

Transformatori u okruženju DIE, zahtijevaju rigorozniji program održavanja od klasičnih distributivnih kako bi se smanjila mogućnost kvarova i ispada. Potrebna su redovita ispitivanja stanja izolacije, ulja i prekomjernog grijanja prema sljedećem planu [6]:

- Redovita termovizijska ispitivanja
- DGA ispitivanja (eng. *Dissolved Gas Analysis*)
- Uzimanje uzoraka i analiza ulja
- Ispitivanje otpora izolacije
- Redovita zamjena dotrajalih komponenti transformatora

7. ZAKLJUČAK

Transformatori u okolini DIE predstavljaju jednu od ključnih komponenata u takvim elektroenergetskim mrežama jer omogućuju učinkovitu i stabilnu integraciju sunčanih elektrana i baterijskih sustava. Međutim, specifične pojave poput harmonika, prenapona i asimetričnih opterećenja mogu ozbiljno ugroziti njihov rad i smanjiti efikasnost cijelog sustava. Za održavanje visoke kvalitete napona i stabilnosti mreže u područjima s integriranim intermitentnim obnovljivim izvorima energije, nužno je pažljivo projektiranje distribucijskih izmjenjivačkih transformatora.

Korištenje naprednih tehnika regulacije, kompenzacije i optimizacije može značajno poboljšati performanse mreže, smanjiti utjecaj negativnih pojava na transformator i osigurati dugoročnu pouzdanost sustava. Da bi proizvođači transformatora pravilno dimenzionirali i optimizirali dizajn transformatora, ključno je da dobiju sve informacije o pogonskim uvjetima mreže. Prethodno spomenute mjere uz ispravan način implementacije sustava za praćenje i održavanja mogu pomoći u prepoznavanju i otklanjanju potencijalnih problema na vrijeme.

Kako bi se dodatno unaprijedile strategije za smanjenje rizika od kvarova, potrebno je provesti dugoročna mjerenja u stvarnim uvjetima rada. Ova mjerenja omogućit će validaciju predloženih rješenja i pružiti korisne uvide u optimalno upravljanje transformatorima u sustavima s integriranim obnovljivim izvorima energije.

8. LITERATURA

- [1] IEEE C57.159-2016. Guide on Transformers for application in Distributed Photovoltaic (DPV) Power Generation System
- [2] HRN EN 60076-1:2011 Energetski transformatori - 1. dio: Općenito (IEC 60076-1:2011)
- [3] I. Perišić, Z. Grman, S. Carević, J. Hammer, "Razvoj distributivnih transformatora s automatskom regulacijom pod opterećenjem", 8.(14.) savjetovanje HO CIRED, Trogir, 4-6. lipnja 2023.
- [4] V. Ravlić, S. Ravlić Begić, T. Nižić "Specifičnosti transformatora za sunčane elektrane velike snage", HO CIGRE, studeni 2023.
- [5] D. Žarko, B. Čučić, "Transformatori u teoriji i praksi", Graphis Zagreb, Hrvatska, 2020.
- [6] I. Akhtar, "High Failure Rate of Inverter Duty Transformers in Solar PV Power Plants", LinkedIn, listopad 2024.
- [7] R. Murray, M. Hlatshwayo "Transformers within photovoltaic generation plants: Challenges and possible solutions", CIGRE SOUTH AFRICA, studeni 2017.
- [8] B. Gulick, N. Stenzel "Guide to Transformer Electrostatic Shields", MADDOX, lipanj 2024.