

Velimir Ravlić, dipl. ing. el.
Ravel d.o.o.
velimir.ravlic@ravel.hr

dr. sc. Sonja Ravlić Begić, mag. ing. el.
Ravel d.o.o.
sonja.ravlic@ravel.hr

Tajana Nižić, mag. ing. el.
KONČAR – Distributivni i specijalni transformatori d.d.
tajana.nizic@koncar-dst.hr

SPECIFIČNOSTI TRANSFORMATORA ZA SUNČANE ELEKTRANE VELIKE SNAGE

SAŽETAK

U referatu su opisane osnovne značajke transformatora koji se koriste u sunčanim elektranama velike snage preko 5 MW.

Prilikom izbora karakteristika transformatora treba uzeti u obzir specifičnosti nestandardnih pogonskih uvjeta, pri čemu je od posebne važnosti voditi računa o uvjetima ponovnog opterećenja transformatora zbog rada fotonaponskih panela i izmjenjivača.

To znači da je već kod projektiranja transformatora i sunčanih elektrana potrebno uzeti u obzir predviđena ciklička opterećenja transformatora.

Primjenom suvremenih tehnoloških dostignuća postižu se karakteristike koje zadovoljavaju zahtjeve kupaca transformatora nižih gubitaka i veće pouzdanosti u pogonu.

Ključne riječi: transformator, distribuirani obnovljivi izvori energije, sunčane elektrane, projektiranje, pogon

SPECIFIC REQUIREMENTS FOR TRANSFORMERS FOR HIGH POWER SOLAR POWER PLANTS

ABSTRACT

The article describes the basic features of transformers, which are used in solar power plants with a power of over 5 MW.

When choosing the characteristics of the transformer, the specifics of non-standard operating conditions should be taken into account, where it is of particular importance to calculate the conditions of reloading the transformer due to the operation of photovoltaic panels and converters.

This means that when designing transformers and solar power plants, it is necessary to consider account the expected cyclic loads of the transformer.

By applying modern technological achievements, characteristics are achieved that meet the demands of transformer buyers for lower losses and greater reliability in operation.

Key words: transformer, distributed renewable energy resources, solar photovoltaic power generation, design, operation

1. UVOD

U svrhu povećanja globalne energetske učinkovitosti i globalnog povećanja korištenja obnovljivih izvora energije te posljedično smanjenja emisija stakleničkih plinova, grade se neintegrirane sunčane elektrane velike snage (preko 5 MW). Na slici 1 prikazana je fotografija instaliranih solarnih panela u sunčanoj elektrani velike snage. Osnovni elementi sunčanih elektrana velike snage, uz fotonaponske panele i izmjenjivače, su transformatori. Transformatori koji se koriste u sunčanim elektranama u uobičajenim shemama sunčanih elektrana su:

1. Izmjenjivački transformatori – to su transformatori za podizanje izlaznog (AC) napona izmjenjivača (invertera) na srednjenaponsku razinu (najčešće od 10 kV do 35 kV).
2. Transformatori za vlastitu potrošnju u TS SN/NN – služe za napajanje vlastite potrošnje i izmjenjivača i imaju prijenosni omjer srednjeg napona mreže $X/0,4$ kV ili izlaznog napona izmjenjivača (npr. 0,8/0,4 kV).
3. Zbirni transformator (engl. collector transformer) koji služi za spajanje većeg broja transformatora i podizanje napona interne srednjenaponske mreže na visokonaponsku mrežu.
4. U slučaju spoja YNd5 zbirnog transformatora najčešće je potrebno koristiti transformator za uzemljenje srednjenaponske mreže za formiranje umjetnog zvjezdišta SN mreže.



Sl. 1.: Fotografija instaliranih solarnih panela u sunčanoj elektrani velike snage

U daljnjem radu razmatrat će se izmjenjivački transformatori u sunčanim elektranama.

2. OSNOVNE KARAKTERISTIKE IZMJENJIVAČKIH TRANSFORMATORA U SUNČANIM ELEKTRANAMA

Iako se izmjenjivački transformatori kao što je već navedeno, koriste za podizanje izlaznog AC napona izmjenjivača na srednjenaponsku razinu, oni mogu raditi i kao silazni (engl. step-down) transformatori. To je slučaj kada napajaju vlastitu potrošnju (kućni transformator iz srednjenaponske mreže – to je uglavnom noću), te je tada tok energije u izmjenjivačkom transformatoru obrnut u odnosu na tok energije tijekom dana kada rade fotonaponski paneli.

Kada je transformator u uobičajenom, uzlaznom načinu rada, postoji mogućnost prelaska visokofrekventnih naponskih smetnji, najviše harmonika (koji su posljedica izmjene DC napona na AC) ,

sa NN namota transformatora na VN namot pa dalje na mrežu. Pošto sadržaj harmonika u struji visokonaponskih postrojenja ovisi o interakciji izmjenjivača i transformatora i mogućim rezonancijama u sustavu, važno je specificirati sadržaj harmonika i razmotriti ga u pregovorima sa proizvođačem transformatora.

Transformatori obvezno trebaju zadovoljiti zahtjeve za ekološki dizajn u vezi gubitaka prema Uredbi Komisije (EU) 548/2014 kao i sve zahtjeve norme HRN IEC 60076, HRN EN 50708-1-1 te HRN EN 50708-2-1.

2.1 Detalji izvedbe

Koriste se, ili uljni transformatori (punjeni mineralnim uljem ili esterima, ili suhi transformatori (klasični suhi ili zaliveni).

Transformatori za primjenu u sunčanim elektranama najčešće se montiraju u zatvorenim transformatorskim stanicama koje se razlikuju s obzirom na:

- izvedbu (u vlastitom metalnom kućištu, u zidanoj zgradi, u metalnom kućištu - kontejneru za smještaj s postrojenjima srednjeg i niskog napona);
- dispoziciju i način posluživanja (vanjsko ili unutrašnje);
- pokretljivost (nepokretna, tj. s betonskim temeljem; pokretnim, tj. na saonicama, tračnicama ili cestovnim vozilima).

S obzirom na montažu transformatora u zatvorene prostore (betonske kućice ili kontejnere) malog volumena najčešće se koriste hermetički zatvoreni transformatori, a rjeđe transformatori sa konzervatorom.



Sl. 2.: Smještaj transformatora u betonsku transformatorsku stanicu

Prilikom projektiranja transformatora potrebno je obratiti pozornost na harmonike u mreži, odnosno na harmoničko izobličenje THD (engl. total harmonic distortion), a koje označava izobličenja osnovnog vala struje i napona. Poznato je da harmonijsko izobličenje struje i napona dovodi do dodatnog zagrijavanja aktivnog dijela, a samim time i do starenja izolacije, koja uvjetuje životni vijek transformatora. Prema tome prilikom projektiranja transformatora za solarne elektrane posebna pozornost se posvećuje hlađenju transformatora i izolaciji namota.

U slučajevima kada je $THD \geq 5\%$ preporuka je ugraditi elektrostatski ekran u rashladni kanal između VN i NN namota. Prema normi IEC 60076-1, normalni pogonski uvjeti uključuju $THD < 5\%$ i u tim slučajevima se elektrostatski ekran ugrađuje samo na zahtjev kupca.

Elektrostatski ekran je metalna mrežica koja se ugrađuje između VN i NN namota, te se uzemljuje i na taj način sprječava prelazak smetnji (harmonici, pulzacije i udari) sa jednog namota na drugi, a time i na mrežu.



Sl. 3.: Elektrostatski ekran

Tipične nazivne snage transformatora za izmjenjivače u sunčanim elektranama su između 400 kVA i 5000 kVA. Pri tome su naponi na VN strani između 10 kV i 35 kV.

Ovaj tip transformatora ima preklopku kojom se primarni napon može u beznaponskom stanju prilagoditi naponu mreže na mjestu ugradnje, najčešće u stupnjevima $\pm 2,5\%$ i $\pm 5\%$ nazivnog napona. Koriste se slagane jezgre, te najčešće slojni namot za VN stranu i folijski namot za NN stranu.

Transformatori za spoj izmjenjivača u sunčanim elektranama se izvide kao dvonamotni ili tronamotni, ovisno o struji na niskonaponskoj strani.

2.1.1 Dvonamotni transformatori

Najčešće se koriste dvonamotni transformatori nazivnih snaga do 2500 kVA. U slučaju nazivnih snaga preko 1000 kVA koriste se nazivni naponi 600 V ili 800 V zbog visokih struja na niženaponskoj strani.

Za nazivne snage 2500 kVA najčešće se koristi nazivni napon 800 V jer omogućuje primjenu standardne izvedbe prekidača na sekundarnoj (niženaponskoj) strani transformatora ($I_n = 2500$ A te kratkotrajno podnosive struje $I_{ks} = 40$ kA).

Najčešće se koriste dvonamotni transformatori grupe spoja Dyn5 i Dyn11.



Sl. 3: Tipični primjer transformatora za SE proizveden u Končar D&ST-u nazivne snage 2000 kVA

2.1.2 Tronamotni transformatori

Tronamotni transformatori se koriste u slučaju kada je struja na NN strani prevelika za opremu u postrojenju. Tronamotni transformatori se projektiraju sa po jednim VN namotom te dva NN namota u svakoj fazi, te na taj način smanjuju struju NN strane na pola i omogućuju lakše spajanje na već postojeću opremu.

Primjena tronamotnog transformatora s dva sekundarna namota iste snage (npr. 2500 kVA), omogućava primjenu standardne opreme ($I_n = 2500$ A i $I_{ks} = 40$ kA) u slučaju nazivne snage primarnog namota 5000 kVA i dva sekundarna namota, pri čemu je svaki nazivne snage 2500 kVA.

Najčešće su grupe spoja Dyn5yn5 ili Dyn11yn11, pri čemu je zvjezdište (neutralna točka) niženaponske strane uvijek neuzemljeno.

Zbog blizine između namota višenaponskog (primarnog) namota i niženaponskih (sekundarnih) namota je vrijednost kratkog spoja oko 6 %, pri čemu je vrijednost razlike impedancije između primarnog namota i pojedinog sekundarnog namota 2 %.

Impedancija između sekundarnih namota LV1 – LV2 je > 8 % na bazi nazivne snage sekundarnih namota.

2.2 Ispitivanja transformatora

Prema normi IEC 60076-1:2011 [3] postoje tri grupe ispitivanja transformatora: rutinska, tipska i specijalna. Ispitivanja novih transformatora provode se u tvornici prilikom preuzimanja, osim ako nije drugačije dogovoreno između proizvođača i kupca. Norma [3] daje preporuke za ispitivanje, a kupac transformatora je taj koji odlučuje koja ispitivanja će se provesti.

Rutinska ispitivanja provode se na svakom proizvedenom transformatoru. Tipska ispitivanja provode se na jednom predstavničkom transformatoru za određeni tip transformatora ili prema zahtjevu kupca, dok se specijalna ispitivanja provode uglavnom na zahtjev kupca transformatora [23].

Za transformatore za spoj izmjenjivača u sunčanim elektranama najčešće se zahtijevaju rutinska i tipska ispitivanja. Od tipskih ispitivanja najčešće je pokus zagrijavanja transformatora, a ponekad tipska dielektrična ispitivanja.

Specijalna ispitivanja se vrlo rijetko traže za transformatore za solarne elektrane, a ako se traže to su onda obično sljedeća specijalna ispitivanja:

1. Impulsno ispitivanje na niskonaponskoj strani.
2. Mjerenje parcijalnih ispitivanja PD (engl. Partial Discharge) za suhe i uljne transformatore pri čemu se rutinski ispituju suhi transformatori > 1,2 kV.

Prema dogovoru kupca i proizvođača transformatora mogu će je provesti i neka druga specijalna ispitivanja, a koja nisu specificirana u normi [3] npr. mjerenje viših harmonika u struji magnetiziranja.

3. ODABIR KARAKTERISTIKA TRANSFORMATORA ZA SE

Osnovni tehnički parametri koje treba razmatrati kod izbora karakteristika transformatora za izmjenjivače u sunčanim elektranama:

1. U slučaju tronamotnih transformatora može se očekivati nejednoliko ili asimetrično opterećenje niskonaponskih namota (strujno i naponsko). Nejednolike struje mogu uzrokovati nepoželjan oblik rasipnog toka te uzrokovati nepoželjno zagrijavanje dijelova namota. To se također događa za vrijeme rada s tokom snage u suprotnom smjeru od normalnog smjera. Neuravnoteženi naponi iz izmjenjivača također mogu uzrokovati nepoželjno zagrijavanje jezgre, buku i moguće zasićenje jezgre, što dovodi do visokih struja magnetiziranja i temperature jezgre.
2. Strujno opterećenje iz izmjenjivača ima harmoničke komponente (obično manje od 5 %) i istosmjernu (DC) komponentu (obično ograničenu na 0,5 % izlazne struje). Sadržaj harmonika struje rezultira povećanim zagrijavanjem namota. Istosmjerna (DC) komponenta proizvodi lagano povećanje gubitaka jezgre, ali i povećanje struje magnetiziranja i zvučne snage. Povećanje struje magnetiziranja može uzrokovati zasićenje jezgre te povećanje temperature jezgre i kružne struje u konstruktivnim dijelovima. Veće vrijednosti DC komponente mogu djelovati na sposobnost terećenja transformatora.
3. Zasićenje jezgre zbog DC komponente može uzrokovati rezonanciju u slučaju kablenskog spoja na transformatore. Nelinearni induktivitet transformatora i kapacitet kabela spojenih u sustavu (kabeli za spojeve izmjenjivača i filterski kapaciteti) mogu pridonijeti uvjetima za nastanak naponske rezonancije.
4. Ako proizvođač izmjenjivača zahtijeva, treba predvidjeti elektrostatski uzemljeni ekran između primarnog i sekundarnih namota. Ekran sprječava prijenos visokofrekvencijskih napona smetnji iz izmjenjivača (harmonici, pulzacije i udari) na srednjenaponsku stranu transformatora i u srednjenaponsku mrežu. Uloga uzemljenog ekrana je povećanje vrijednosti impedancije između namota. Uloga ekrana je i smanjenje prijenosa smetnji iz SN mreže na niskonaponsku stranu transformatora.
5. Niskonaponski namoti (LV) moraju podnijeti visoki porast napona (dV/dt) i to reda veličine 500 – 1000 V/ μ s .
6. Induktivitet transformatora treba biti određene veličine da ograniči vrijednost di/dt i zaštiti uređaj s poluvodičima, ali ne smije biti previsok da uzrokuje visoke padove napona koji bi mogli rezultirati prenaponima izmjenjivača.
7. Visokonaponski namot može biti podložan prijelaznim prenaponima čiji su uzrok ponovna paljenja srednjenaponskih prekidača. Zbog toga su česti zahtjevi za ugradnjom odvodnika prenapona kod priključnica visokonaponskog namota.

Naime, svaki prekidač ima ponovna paljenja kada se gašenje luka dogodi na malom međukontaktom razmaku. Ovisno o brzini uspostavljanja dielektrične čvrstoće međukontaktog razmaka, a koja ovisi o mediju gašenja, brzini kontakata i obliku elektroda, svaki prekidač ima tzv. prozor ponovnog paljenja (engl. reignition window), koji može biti uži ili širi. Prekidači s vrlo velikom vrijednosti rezane struje obično imaju ponovno paljenje tijekom prvog vrha prenapona rezanja. Ova pojava uglavnom smanjuje prenapone rezanja. Prekidači koji imaju nisku vrijednost rezane struje (kao što je SF₆ puffer) rijetko imaju ponovno paljenje tijekom prvog vrha prenapona rezanja.

Treba naglasiti da je prekidna struja transformatora mala u usporedbi s nazivnim prekidnim strujama kratkog spoja prekidača. Osnovni problem nije uspješnost prekidanja već visina sklopnih prenapona koji se mogu pojaviti tijekom prekidanja.

Nastanak prenapona tijekom prekidanja malih induktivnih struja je veoma kompliciran proces. Svi tipovi prekidača kod manjih vrijednosti struja forsiraju prijevremeni prolazak struje kroz nulu, pri čemu se oslobađa energija u induktivnom opterećenju stvarajući prenapone. Osim toga, ograničena dielektrična čvrstoća međukontaktne razmaka prekidača, zatim sposobnost prekidača da prekida visokofrekvencijske struje, kao i transfer tranzijenata između faza, igraju važnu ulogu u stvaranju prenapona.

Kako je sklopni luk u prekidačima podvrgnut intenzivnom otpuhivanju (hlađenju) zbog što efikasnijeg gašenja struja kratkog spoja, može se dogoditi da se kod prekidanja malih struja luk ugasi prije prirodnog prolaska struje kroz nulu. Ova pojava je poznata pod nazivom rezanje struje (engl. current chopping) i može izazvati opasne prenapone.

Rezanje struje je posebno izraženo kod vakuumskih prekidača, a u najvećoj mjeri je povezano s nestabilnosti korijena električnog luka na katodi.

8. Transformatori trebaju biti prikladni za protjecanje struje u oba smjera (uzlazni i silazni transformator).
9. U slučaju primjene tronamotnih transformatora s dva sekundarna niskonaponska namota (LV) i s posebnim izmjenjivačima spojenim na svaki LV namot, moguća je pojava rezonancije s visokim naponima na transformatoru u slučaju sklopnih operacija IGBT tranzistora (bipolarni tranzistori s izoliranom upravljačkom elektrodom, engl. insulated gate bipolar transistor) u izmjenjivačima koji nisu sinkronizirani.
10. Referentna norma za izmjenjivačke transformatore u sunčanim elektranama koja je dostupna je IEEE C57.159-2016. „Guide on Transformers for application in Distributed Photovoltaic (DPV) Power Generation System“ [10].

4. OŠTEĆENJA I NENORMALNI REŽIMI RADA

U procesu eksploatacije nije isključena mogućnost oštećenja kako transformatora tako i njihovih spojeva s prekidačima. U toku rada mogu se pojaviti opasni nenormalni režimi rada koji nisu vezani s oštećenjima transformatora ili njihovih spojeva do prekidača.

Mogućnost oštećenja i nenormalnih režima zahtijeva ugradnju relejne zaštite na transformatoru.

U oštećenja transformatora spadaju:

- kratki spojevi u namotima vezanim u zvijezdu, bez obzira na način uzemljenja zvijezdišta;
- kratki spojevi u namotima transformatora vezanim u trokut;
- kratki spojevi između zavoja iste faze;
- kratki spojevi između namota različitih faza;
- oštećenja željezne jezgre;
- oštećenja kotla transformatora;
- proboji i preskoci na izvodima transformatora.

Nenormalni režimi rada transformatora uvjetovani su vanjskim djelovanjima. Pri vanjskim kratkim spojevima i preopterećenjima, kroz namote počinju teći velike struje (nadstruje). Pri tome su naročito opasne struje koje se javljaju pri vanjskim kratkim spojevima, jer mogu biti znatno veće od nazivne struje transformatora. U slučaju dužeg protjecanja ovako velikih struja, što se može dogoditi pri kratkim spojevima na sabirnicama ili pri neisključenom opterećenju na odvodima od sabirnica, može doći do intenzivnog zagrijavanja namota i oštećenja njegove izolacije.

Ovome svakako treba dodati i utjecaje sniženja frekvencije u slučajevima velikih poremećaja u elektroenergetskom sustavu.

U najčešće kvarove spadaju jednofazni i međufazni kvarovi na izvodima transformatora i spojevi među zavojima iste faze. Da se ograniče razmjeri oštećenja u slučaju kratkih spojeva, zaštita od kratkih spojeva mora djelovati na isključenje transformatora praktično bez vremenskog kašnjenja.

Spoj jedne faze sa zemljom predstavlja opasnost za namot vezan na mrežu s velikim strujama zemljospoja. U tom slučaju zaštita mora isključiti transformator i u slučaju spojeva sa zemljom. Na isti način zaštita treba djelovati i u slučajevima težih oštećenja željezne jezgre transformatora .

U slučajevima pojave nenormalnih režima rada, trenutno isključenje transformatora nije neophodno, nego se način djelovanja zaštite definira na osnovu poznavanja parametara transformatora i procijenjenih efekata nenormalnog režima.

U oba slučaja način štice i izbor zaštite je ovisan o tehno-ekonomskim analizama. Dok se kod suhih ili uljnih transformatora malih snaga (do 1 MVA) kao zaštita često koriste osigurači, na uljnim transformatorima većih snaga obavezno se koristi plinska zaštita i nadstrujna zaštita. Za transformatore nazivnih snaga preko 5 MVA obično se koristi diferencijalna zaštita, a ako je zvjezdište transformatora uzemljeno preko malog otpora, onda i ograničena zemljospojna zaštita.

ZAKLJUČAK

U Republici Hrvatskoj se najčešće koriste trofazni uljni dvonamotni transformatori nazivne snage 2500 kVA, nazivnih napona 10(20)/0,8 kV ili 35/0,8 kV i grupe spoja Dyn5.

Prilikom izbora nazivnih snaga tvornički dogotovljenih transformatorskih stanica treba uzeti u obzir nazivne klase kućišta kako bi se dobilo parametre za određivanje faktora opterećenja.

Pri tome postoji šest klasa kućišta: 5, 10, 15, 20, 25 i 30 koje odgovaraju maksimalnim vrijednostima porasta temperatura energetskih transformatora od 5K, 10K, 15 K, 20 K, 25 K i 30 K, a sve prema zahtjevima norme IEC 62271- 202:2022.

U članku su iznesene specifičnosti o kojima treba voditi računa prilikom definiranja karakteristika transformatora koji se planiraju ugraditi za sunčane elektrane velike snage. Pri tome je najznačajnije da su zadovoljeni zahtjevi sljedećih normi:

- IEC 60296,
- IEC 60076-1,
- IEC 60076-2,
- IEC 60076-3,
- IEC 60076-4,
- IEC 60076-5,
- IEC 60076-7,
- IEC 60076-11,
- IEC 60085,
- EN 50588,
- EN 50708.

Također se često zahtijeva zadovoljenje zahtjeva sljedećih IEEE normi:

- IEEE C57.12.00-2010,
- IEEE C57.154-2012,
- IEEE C57.12.90-2010,
- IEEE 12.91-2011.
- IEEE C57.159-2016.

LITERATURA

- [1] HRN EN 61850-3:2015 Komunikacijske mreže i sustavi za automatizaciju u elektroprivredi -- 3. dio: Opći zahtjevi (IEC 61850-3:2013; EN 61850-3:2014)
- [2] A. Dolenc, *Transformatori I. III.*, Sveučilište u Zagrebu, Elektrotehnički fakultet, Zagreb, 1991.
- [3] HRN EN 60076-1:2011 Energetski transformatori -- 1. dio: Općenito (IEC 60076-1:2011)
- [4] HRN EN 60076-2:2011 Energetski transformatori -- 2. dio: Zagrijanje transformatora napunjenih tekućim dielektrikom (IEC 60076-2:2011)
- [5] HRN EN 60076-3:2011 Energetski transformatori -- 3. dio: Izolacijske razine, dielektrična ispitivanja i vanjski razmaci u zraku (IEC 60076-3:2013)
- [6] HRN EN 60076-4:2011 Energetski transformatori -- 4. dio: Upute za ispitivanja udarnim i sklopnim naponom -- Energetski transformatori i prigušnice (IEC 60076-4:2002)
- [7] HRN EN 60076-5:2008 Energetski transformatori -- 5. dio: Otpornost na kratki spoj (IEC 60076-5:2006)
- [8] HRN IEC 60076-7:2008 Energetski transformatori -- 7. dio: Opterećivanje uljem napunjenih energetskih transformatora (IEC 60076-7:2005)
- [9] HRN EN 50708-1-1:2020 Energetski transformatori – Dodatni europski zahtjevi – Dio 1-1: Zajednički dio – Opći zahtjevi (EN 50708-1-1:2020)
- [10] HRN EN 50708-2-1:2020 Energetski transformatori – Dodatni europski zahtjevi – Dio 2-1: Srednji energetski transformatori – Opći zahtjevi (EN 50708-2-1:2020)
- [11] HRN EN 60085:2008 Električna izolacija -- Toplinska procjena i klasifikacija (IEC 60085:2007)
- [12] Commission Regulation (EU) No 548/2014 of 21 May 2014. on implementing Directive 2009/125/EC of the European Parliament and of the Council with to small, medium and large power transformers
- [13] Directive 2009/125/EC of the European Parliament and of the Council of 21 October 2009 establishing a framework for the setting of Ecodesign requirements for energy – related products, Official Journal of the European Union, 2009.
- [14] HRN EN IEC 62271-200:2021 Visokonaponska sklopna aparatura -- 200. dio: Sklopna aparatura izmjenične struje s metalnim plaštem za nazivne napone iznad 1 kV do uključujući 52 kV (IEC 62271-200:2021)
- [15] HRN EN IEC 62271-202:2022 Visokonaponska sklopna aparatura -- 202. dio: Izmjenične tvornički dogotovljene transformatorske stanice za nazivne napone iznad 1 kV do uključivo 52 kV (IEC 62271-202:2022)
- [16] HRN EN IEC 61936-1:2021 Električna postrojenja nazivnih izmjeničnih napona iznad 1 kV izmjenično i 1,5 kV istosmjerno -- 1. dio: Izmjenično (IEC 61936-1:2021; EN IEC 61936-1:2021)
- [17] HRN EN IEC 60076-11:2018/Ispr.1:2019 Energetski transformatori -- 11. dio: Suhi transformatori (IEC 60076-11:2018/Corr.1:2019)
- [18] IEEE C57.159-2016. Guide on Transformers for application in Distributed Photovoltaic (DPV) Power Generation System
- [19] IEEE C57.12.00-2010 IEEE Standard for General Requirements for Liquid-Immersed Distribution, Power, and Regulating Transformers
- [20] IEEE C57.154-2012 IEEE Standard for the Design, Testing, and Application of Liquid-Immersed Distribution, Power, and Regulating Transformers Using High-Temperature Insulation Systems and Operating at Elevated Temperatures
- [21] IEEE C57.12.90-2010 IEEE Standard Test Code for Liquid-Immersed Distribution, Power, and Regulating Transformers
- [22] IEEE C57.12.91-2011 IEEE Standard Test Code for Dry-Type Distribution and Power Transformers
- [23] D.Žarko, B.Ćučić, *Transformatori u teoriji i praksi*, Graphis, Zagreb, 2020