

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

dr. sc. Srdjan Zutobradic, dipl. ing. el.
szutobradic@gmail.com

ANALIZA ZAHTJEVA ZA IZMJENJIVAČKE TRANSFORMATORE KOJI SE KORISTE ZA SUNČANE ELEKTRANE VELIKE SNAGE

SAŽETAK

U referatu su opisane osnovne značajke transformatora koji se koriste u sunčanim elektranama velike snage. Radi se o transformatorima preko kojih se preuzima električna energija proizvedena iz fotonaponskih panela. Uobičajeno se smatra da su sunčane elektrane velike snage elektrane s instaliranom snagom preko 5 MW. Prilikom izbora karakteristika transformatora treba uzeti u obzir specifičnosti nestandardnih pogonskih uvjeta pri čemu je od posebne važnosti uzimanje u obzir uvjeta ponovnog opterećenja transformatora zbog rada fotonaponskih panela i izmjenjivača. Također, u obzir treba uzeti zahtjeve postojećih normi koje se odnose na transformatore koji se koriste za sunčane elektrane velike snage. Primjenom suvremenih tehnoloških dostignuća postižu se karakteristike koje zadovoljavaju zahtjeve kupaca transformatora nižih gubitaka i veće pouzdanosti u pogonu.

Ključne riječi: sunčane elektrane, izmjenjivački transformator, projektiranje, pogon, transformatorska stanica

ANALYSIS OF THE REQUIREMENTS FOR INVERTER TRANSFORMERS USED FOR HIGH POWER SOLAR POWER PLANTS

SUMMARY

The article describes the basic features of transformers used in high power solar power plants. The electrical energy produced from photovoltaic panels is delivered to the grid through these transformers. Large solar power plants are usually considered to be power plants with an installed capacity 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 take into account the conditions of reloading the transformer due to the operation of photovoltaic panels and inverters. In addition, the requirements of the existing norms related to the transformers used in high-power solar power plants should be taken into account. 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: solar photovoltaic power generation, inverter transformer, design, operation, substation

1. UVOD

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 zajedno sa 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, preseljiva).

Prilikom izbora karakteristika transformatora za primjenu u sunčanim elektranama treba uzeti u obzir specifičnosti montaže, spajanja, transporta i održavanja, dok prilikom projektiranja treba uzeti u obzir ograničenja u vezi dimenzija i mase.

Isto tako treba uzeti u obzir nestandardne pogonske uvjete pri čemu su od posebne važnosti uvjeti ponovnog opterećenja transformatora zbog rada fotonaponskih panela i izmjenjivača.

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



Slika 1. Solarni paneli instalirani u solarnoj elektrani velike snage

Prilikom projektiranja transformatora potrebno, također, uzeti u obzir visoke harmoničke struje koje mogu uzrokovati povećanje ukupne struje opterećenja te je stoga potrebno odgovarajuće rješenje relejne zaštite transformatora.

U svakom slučaju potrebno je uzeti u obzir zahtjeve vrlo čestog promjenljivog opterećenja tijekom čitavog godišnjeg opterećenja.

Dakle, kod izbora karakteristika transformatora potrebno je uzeti u obzir sljedeće sistemske parametre: harmonike, istosmjernu komponentu struje, svojstva opterećenja transformatora.

Za priključak i siguran paralelni rad sunčanih elektrana (SE) veće snage (iznad 5 MW) s distribucijskom mrežom, bez štetnog djelovanja, sunčana elektrana mora zadovoljiti četiri osnovna kriterija:

- 1) kriterij najveće dopuštene snage SE;
- 2) kriterij flikera;

- 3) kriterij dopuštenih struja viših harmonika;
- 4) kriterij struje kratkog spoja.

U Elaboratu optimalnog tehničkog rješenja priključenja (EOTRP-u) se definira način priključenja SE na distribucijsku mrežu kao i osnovni zahtjevi potrebni za zadovoljenje navedena četiri kriterija.

U Republici Hrvatskoj su nazivni naponi sredjenaponske distribucijske mreže 10, 20 i 35 kV pa za uklapanje SE u lokalnu distribucijsku mrežu Investitor SE treba osigurati odgovarajuću međutransformaciju jer su nazivni naponi na izmjeničnoj strani izmjenjivača (invertera) najčešće 400 V, 690 V i 800 V.

U slučaju SE većih snaga najekonomičnije rješenje je u primjeni napona 800 V jer su u tom slučaju najmanje struje i gubici.

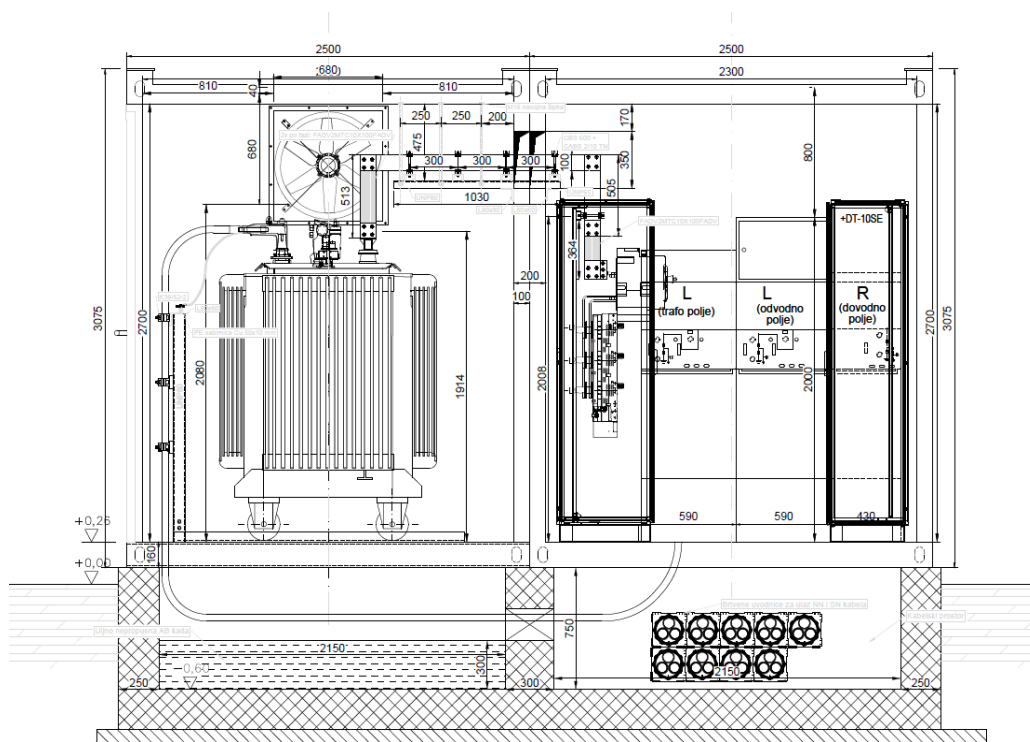
Uobičajeno se u sunčanim elektranama koriste uljni ili suhi transformatori

2. ULJNI TRANSFORMATORI

U slučaju uljnih transformatora, najčešće se koriste sljedeće izvedbe uljnih transformatora:

- 1) Trofazni uljni transformator nazivne snage 2500 kVA, nazivnih napona 20(10)/0,8 kV; grupe spoja Dyn11;
- 2) Trofazni uljni transformator nazivne snage 2500 kVA, nazivnih napona 35/0,8 kV; grupe spoja Dyn11;
- 3) Trofazni uljni transformator nazivne snage 5000/2500/2500 kVA, nazivnih napona 20(10)/0,8/0,8 kV; grupe spoja Dyn11yn11;
- 4) Trofazni uljni transformator nazivne snage 5000/2500/2500 kVA, nazivnih napona 35/0,8/0,8 kV; grupe spoja Dyn11yn11.

Treba naglasiti da su navedeni transformatori najčešće ugrađeni u metalna kućišta (kontejnere) ili u betonske kućice te stoga moraju zadovoljiti zahtjeve norme IEC 62271-202:2022, a posebno u vezi dopuštenog opterećenja.



Slika 2. Primjer smještaja uljnog transformatora u metalni kontejner

Uljni transformatori su uobičajeno sljedećih karakteristika:

• Vrsta transformatora	Hermetički
• Izolacijska tekućina	Mineralno ulje
• Norma	EN 60076
• Način hlađenja	ONAN
• Broj faza	3
• Nazivna frekvencija	50 Hz
• Ispitni napon (50 Hz, 1 min.) za nazivni napon 35 kV	70/3 kV
• Udarni napon (1,2 / 50) za nazivni napon 35 kV	170/- kV
• Temperatura okoline	-25 ... +40°C

Transformatori obvezno trebaju zadovoljiti zahtjeve za ekološki dizajn u vezi gubitaka prema Uredbi Komisije (EU) 548/2014.

Isto tako treba naglasiti da je ukupna masa tronamotnih transformatora oko 12500 kg, što predstavlja značajan problem za transport i montažu na lokaciji sunčane elektrane. Prilikom projektiranja posebnu pažnju treba posvetiti dimenzioniranju uljne kade i ostalih zahtjeva u vezi zadovoljenja zahtjeva zaštite od požara i zaštite od utjecaja na okoliš s obzirom na količine ulja u transformatorima (cca 3000 kg).

U slučaju primjene uljnih transformatora grupe spoja Dyn11 i nazivne snage 2500 kVA te prijenosnog omjera 35/0,8 kV masa je oko 5300 kg, a masa ulja oko 1200 kg. Kod transformatora grupe spoja Dyn 11 i nazivne snage 2500 kVA te prijenosnog omjera 20000 (10000)/800 V ukupna masa je oko 5100 kg, a masa ulja 1000 kg.

Očita je prednost izvedbe dvonamotnih transformatora nazivne snage 2500 kVA u vezi transporta i montaže.

3. SUHI TRANSFORMATORI

U slučaju zahtjeva zaštite okoliša ili zbog nekog drugog zahtjeva (npr. brzina isporuke zbog trenutnog stanja na tržištu) koriste se suhi transformatori sljedećih osnovnih tehničkih karakteristika:

Suhi transformatori su uobičajeno sljedećih karakteristika:

• Norma	EN 60076, EN 50588-1
• Način hlađenja	ANAF
• Broj faza	3
• Nazivna frekvencija	50 Hz
• Grupa spoja	Dyn5
• Ispitni napon (50 Hz, 1 min.) za nazivni napon 35 kV	70/3 kV
• Udarni napon (1,2 / 50) za nazivni napon 35 kV	170/- kV
• Temperatura okoline	-25 ... +40°C

Transformatori obvezno trebaju zadovoljiti zahtjeve za ekološki dizajn u vezi gubitaka prema Uredbi Komisije (EU) 548/2014.

Suhi transformatori moraju biti predviđeni za ugradnju u metalna kućišta (kontejnere) ili u betonske kućice te zadovoljiti zahtjeve norme IEC 62271-202:2022, a posebno u vezi dopuštenog opterećenja.

Suhi transformatori trebaju zadovoljiti zahtjeve sadržane i u sljedećim normama:

1. IEC 60076-3:2014 / A1:2018
2. IEC 60076-4:2008
3. IEC 60270-200 + a1:2016

Svi transformatori za primjenu u sunčanim elektranama za spoj izmjenjivača trebali bi zadovoljiti zahtjeve IEEE Guide on Transformers for Application in Distributed photovoltaic (DPV) Power Generation Systems (IEEE Std C57.159-2016).

Posebno je važan zahtjev da transformatori trebaju imati namote spojene prema izmjenjivačima (inverterima) koji moraju biti dimenzionirani da izdrže naponske udare kod pogonskih operacija izmjenjivača (invertera). Pri tome je podnosivi porast napona (dU/dt) za namote spojene prema inverterima barem 500 V/ μ s prema zemlji.

Prema EN 50588-1:2017 za suhe transformatore 35/0,8 kV i nazivne snage 2500 kVA trebaju biti zadovoljeni sljedeće vrijednosti dopuštenih gubitaka:

- gubici praznog hoda: $3100 + 15\% = 3565$ W
- gubici kratkog spoja kod 75 °C: $19000 + 10\% = 20900$ W

Pri tome norma EN 50588-1:2017 definira gubitke kod napona kratkog spoja $u_k = 6\%$. Često proizvođači suhih transformatora definiraju napon kratkog spoja u_k drugih vrijednosti (npr. $u_k = 7\%$ ili $u_k = 8\%$). U slučaju većih vrijednosti napona kratkog spoja (npr. $u_k = 8\%$) dimenzije suhog transformatora su veće od dimenzija uljnog transformatora te u tom slučaju treba mijenjati dimenzije metalnog kućišta ako je bilo predviđeno za ugradnju uljnog transformatora ili koristiti izvedbu suhog transformatora u tvornički izrađenom kućištu koje treba spojiti s drugim kućištem (kontejnerom) u kojem će biti smještena srednjenaponska i niskonaponska postrojenja te ostala oprema (transformator vlastite potrošnje kao što je 800/400 V prijenosnog omjera, oprema za uvođenje u sustav daljinskog vođenja).

Isto tako treba istaknuti da gubici transformatora za spoj izmjenjivača moraju zadovoljiti maksimalne gubitke prema zahtjevima za ekološku izvedbu prema Uredbi Komisije EU 548/2014.

Osnovni zahtjev kod izrade izmjenjivačkih transformatora je spajanje više izmjenjivača određene pojedinačne nazivne snage (najčešće su tipične snage izmjenjivača između 200 kW – 300 kW) na NN strani transformatora.

Transformatori trebaju zadovoljiti sljedeće IEC norme:

- IEC 60296,
- IEC 60076-1,
- IEC 60076-2,
- IEC 60076-3,
- IEC 60076-4,
- IEC 60076-5,
- IEC 60076-7,
- IEC 60137,
- IEC 60085.

Pripadajuće norme su zasnovane na tipu izolacije.

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.

4. NAZIVNA SNAGA TVORNIČKI DOGOTOVLJENIH TRANSFORMATORSKIH STANICA I KLASA KUĆIŠTA

Nazivna snaga tvornički dogotovljenih transformatorskih stanica se opisuje nazivnom snagom transformatora S_r (u kVA), pripadajućim nazivnim ukupnim gubicima (u W) i maksimalnim porastima temperature (definiranim u IEC 60076-1:2011 i IEC 60076-11:2018) za sve energetske transformatore za koje je tvornički dogotovljena transformatorska stanica projektirana i tipski ispitana u skladu s odjeljkom 7.5 iz IEC 62271-202:2022. To znači da se oznaka sastoji od tri parametra, npr. 630 kVA – 5500 W – 60/65 K za uljne transformatore ili 630 kVA – 5500 kVA – izolacijska klasa F za suhe transformatore.

Nazivna klasa kućišta je klasa kućišta koja korespondira s nazivnom snagom tvornički dogotovljene transformatorske stanice. Pri tome su nazivna klasa kućišta, nazivna snaga transformatora i maksimalni porasti temperature transformatora kao i uvjeti okoline ulazni parametri za određivanje faktora opterećenja, sukladno zahtjevima iz IEC 62271-202:2022.

Postoji šest nazivnih klasa kućišta: klasa 5, 10, 15, 20, 25 i 30 koje odgovaraju maksimalnim vrijednostima razlika porasta temperature energetskih transformatora od 5 K, 10 K, 15 K, 20 K, 25 K i 30 K.

Nazivne klase kućišta uzimaju u obzir samo interne (unutrašnje) izvore topline zbog ugradnje različitih komponenti transformatorske stanice unutar kućišta. Utjecaj vanjskih izvora topline kao što je sunčevo zračenje treba uzeti u obzir suglasno zahtjevima IEC 62271-202:2022.



Slika 3. Smještaj transformatora u betonsku kućicu

5. ZAKLJUČAK

Zbog sve većeg broja sunčanih elektrana veće snage, potrebno je analizirati specifičnosti izmjenjivačkih transformatora u sunčanim elektranama veće snage gdje se koristi veći broj izmjenjivačkih transformatora za spoj izlazne snage (AC) izmjenjivača (invertera) na niskom naponu (obično do 800 V) te transformaciju na sredjenaponsku razinu (obično 10 kV, 20 kV ili 35 kV).

U ovom članku analizirani su neki od najčešćih zahtjeva za uljnom i suhog tipa transformatore koji se koriste u sunčanim elektranama.

Treba naglasiti da izmjenjivački 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 te HRN EN 50588.

6. 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. I II.“, 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 50588-1:2017 Energetski transformatori srednjih snaga, 50 Hz, najvećeg napona opreme do 36 kV -- 1. dio: Opći zahtjevi (EN 50588-1:2017)
- [10] HRN EN 60085:2008 Električna izolacija -- Toplinska procjena i klasifikacija (IEC 60085:2007)
- [11] 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, midium and large power transformers
- [12] Directive 2009/125/EC of the European Parliament and of the Council of 21 October 2009 establishing a framework for the setting of ecodesing requirements for energy – related products, Official Journal of the European Union, 2009.
- [13] HRN EN IEC 62271-200:2021 Visokonaponska sklopna aparatura -- 200. dio: Sklopna aparatura izmjenične struje s metalnim plaštem za nazivne napone iznad 1kV do uključujući 52 kV (IEC 62271-200:2021)
- [14] 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)
- [15] 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)
- [16] HRN EN IEC 60076-11:2018/Ispr.1:2019 Energetski transformatori -- 11. dio: Suhu transformatori (IEC 60076-11:2018/Corr.1:2019)