

Utjecaj tranzistora u izmjenjivačima na naponske prilike distribucijske mreže

Matej Kolarik^a

^a Mag. ing. el., predavač, Istarsko Veleučilište – Università Istriana di scienze applicate, Preradovićeve 9D, 52100 Pula, Hrvatska, mkolarik@iv.hr

Sažetak

Obnovljivi izvori energije čine značajan udio u ukupnoj proizvodnji električne energije. Elektrane koje proizvode električnu energiju su u velikom udjelu hidroelektrane, nuklearne elektrane i termoelektrane koje imaju generatore s rotorima koji tvore pravilan trofazani sinusoidni oblik napona i struje. Izuzevši hidroelektrane, od obnovljivih izvora energije, najzastupljenije su vjetroelektrane i sunčane elektrane koje nisu direktno povezane na distribucijsku ili prijenosnu mrežu već koriste elektronički sklop koji se naziva izmjenjivač (engl. Inverter). U radu je prikazano načelo rada izmjenjivača koristeći tranzistore kao glavni element kao i zahtjeve za kvalitetom napona koji trebaju zadovoljiti elektrane priključene na hrvatsku distribucijsku mrežu. Izmjenjivači visokim frekvencijama uključivanja i isključivanja sklopki povratno utječu na mrežu te dolazi do izobličenja sinusnog oblika napona koji može dovesti do pregrijavanja i kvara na osjetljivim trošilima, a koja su povezana na obližnju distribucijsku mrežu.

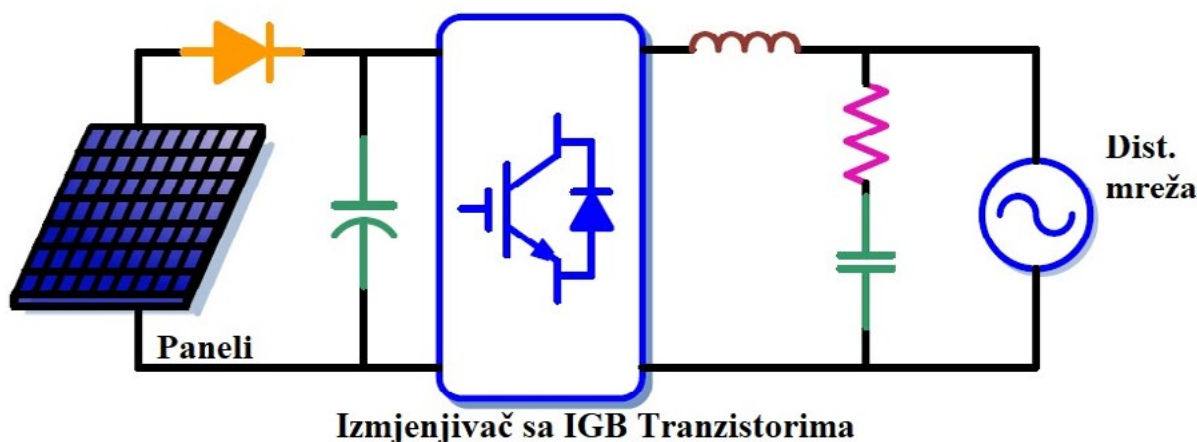
Ključne riječi: IGBT, tranzistor, kvaliteta napona, distribucijska mreža

1. Uvod

Jedan od najvažnijih oblika energije za svakodnevni život je električna energija. Osim informatičke opreme, industrije i rasvjete, električna energija se uvelike koristi za grijanje i hlađenje. Razvojem električnih vozila dodatno se povećavaju procjene povećane buduće potrošnje električne energije. Obnovljivi izvori energije sa svojim razvojem su sve učinkovitiji i zastupljeniji. Električnu energiju koja se proizvodi iz vjetroelektrana i sunčanih elektrana potrebno je prilagoditi na mrežni izmjenični napon pomoću izmjenjivača. Rad prikazuje zahtjeve

koje izmjenjivači trebaju zadovoljiti te probleme koji nastaju pri korištenju tranzistora za pretvorbu istosmjernog u izmjenični napon. Na slici 1. prikazana je osnovna struktura izmjenjivača koji se povezuje na distribucijsku mrežu. Fotonaponski paneli daju istosmjerni napon te većim brojem panela napon se zbraja te izmjenjivač koji sadrži tranzistore i diode brzom pulsno širinskom modulacijom cjepka napon kako bi se prividno dobio izmjenični izvor. Na izlazu se nalaze prigušnice i kondenzatori kojima je uloga ugađivanje izlaznog napona da bude sličniji trofazno sinusnom obliku kao što u elektranama tvore generatori s rotorom.

Slika 1. Struktura osnovnog izmjenjivača za paralelni rad s distribucijskom mrežom



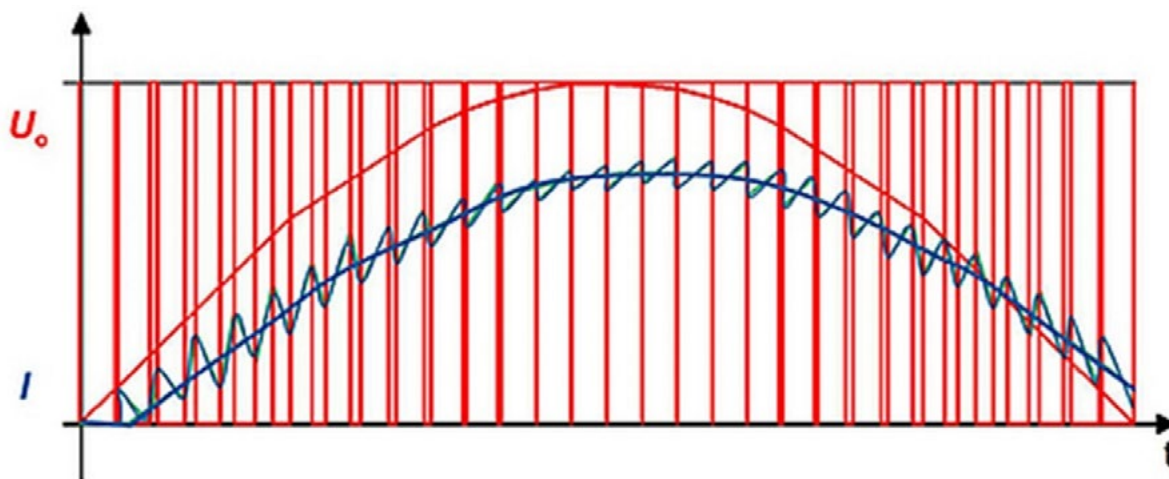
Izvor: Zeng i sur. (2013, str. 224).

2. Zahtjevi za kvalitetom napona u distribucijskoj mreži

Elektroenergetski sustavi su najveći sustavi na svijetu, a ono što ih karakterizira je nužnost iste frekvencije za svaki sustav te se stoga svi rotori elektrana okreću podjednako brzinom i kutom. Kao što je navedeno da se sunčane elektrane i vjetroelektrane ne spajaju direktno na mrežu već se koriste izmjenjivači koji visokom frekvencijom uključivanja i isključivanja tranzistora prividno tvore sinusoidni oblik napona ukoliko se gleda srednja vrijednost napona. Prema radu Chou (2008, str. 22) frekvencija uključivanja i isključivanja IGBT-a u

izmjenjivačima za sunčane elektrane koji trebaju modulirati sinusoidni napon od 50 Hz, frekvencije sklapanja tranzistora pretežito iznose 20 kHz. Na slici 2. je prikazan izlazni valni oblik napona i struje na izlazu iz izmjenjivača koji ne koristi filter. Crveni pravokutni oblik napona je različite širine, ali srednja vrijednost napona prividno tvori sinusoidni oblik napona. Plavom bojom je prikazan valni oblik struje koje poprima sinusoidni oblik. Vidljivo je kako je i valni oblik struje distorziran, ali je daleko ugađeniji u usporedbi s naponskim valnim oblikom, a to je zbog ne mogućnosti naglog prekidanja struje uslijed prijelaznih pojava u induktivitetu mreže i trošila.

Slika 2. Stvarni valni oblik struje i napona na izlazu izmjenjivača bez filtera



Izvor: Zdenković (2017, str. 23).

Problem se javlja iz razloga što veliki broj uređaja ne može funkcionirati s pravokutnim oblikom napona koji je visoke frekvencije te se dolazi do značajnih visokih harmonika koji bi posebice loše utjecali na sve električne motore, ali i na veliki broj pretvarača koji se oslanjaju na sinusoidni oblik napona frekvencija 50 Hz. Prema radu Zeng i sur. (2013, str. 225) navedeno je kako zbog nelinearnosti i reaktivnosti trošila izlazni valni oblik napona od izmjenjivača se dodatno distorzira što dovodi do većih gubitaka i pregrijavanja opreme, a kod rotacijskih strojeva dolazi do oscilacija u momentu i buke. U praksi se događa da korisnici s kućnim sunčanim elektranama imaju problema s dizalicama topline i pumpama za bazene koje se kvare zbog loših izmjenjivača kod sunčane elektrane i prisutnosti povećane harmoničke distorzije valnog oblika struje i napona.

2.1. Regulativa za utjecaj elektrana na distribucijsku mrežu

Operator distribucijskog sustava u svakoj zemlji je zadužen za praćenje i osiguravanje isporuke kvalitetne električne energije kako ne bi dolazilo do neispravnog rada industrijskih i kućanskih uređaja. Na distribucijsku mrežu povratno djeluje svaki potrošač stoga svi uređaji koji se koriste moraju biti usklađeni s brojnim normama kako ne bi utjecaj pojedinog trošila uništio preostale uređaje u blizini. Osim što potrošači utječu na distribucijsku mrežu, također i proizvođači električne energije povratno utječu na mrežu stoga svi izmjenjivači moraju biti izrađeni prema europskim normama kako bi predavali električnu energiju unutar propisanih granica.

Tablica 1. Važni pokazatelji kvalitete napona

Parametar	Granične vrijednosti	Napomena
Treperenje napona	<0,9 – kratkotrajno <0,7 – dugotrajno	Srednji napon (SN) – Čl. 38 St. 1
	<0,8 – kratkotrajno <0,5 – dugotrajno	Niski napon (NN) – Čl. 41 St. 1
Ukupno harmoničko izobličenje – THD	<6,5%	SN – Čl. 38 St. 4
	<8%	NN
Nesimetričnost napona	<1,8% Un	SN – Čl. 38 St. 7
	<0,7% Un	NN – Čl. 41 St. 3
Kolebanje napona	90-110% Un	SN
	90-110% Un	NN – 95% vremena u rasponu, a u 5% vremena može biti 85-110% Un
Frekvencija	±1%	99,5% vremena, a u 0,5% vremena može biti unutar +4% i -6%
Viši harmonici	2.h. <2% U	Prikazani su samo harmonici s većom tolerancijom koji su izraženiji u distribuciji.
	3.h. <5% U	
	5.h. <6% U	
	7.h. <5% U	
	11.h. <3,5% U	
	13.h. <3% U	

Izvor: HEP ODS (2018).

Temeljni dokument koji propisuje tehničke zahtjeve na području Republike Hrvatske su Mrežna pravila distribucijskog sustava kojeg donosi HEP

Operator distribucijskog sustava d.o.o. [HEP ODS] uz suglasnost Hrvatske regulatorne agencije.

Prema Mrežnim pravilima distribucijskog sustava (HEP ODS, 2018) koristi se više tehničkih

zahtjeva za kvalitetu električne energije te se pozivaju na nekoliko sljedećih normi:

1. HRN EN 50160 – Naponske karakteristike iz javnog distribucijskog sustava,
2. HRN EN 61000-X Razine dopuštenog povratnog utjecaja, smetnji postrojenja i instalacije korisnika mreže te metode mjerenja kvalitete električne energije,
3. HRN EN 50549 – Zahtjevi za priključak elektrane na distribucijsku mrežu.

Mrežna pravila distribucijskog sustava (2018) u poglavlju 2.4.6. definiraju Povratni utjecaj na mrežu tako da ne prelazi propisane razine za kratkotrajne promjene napona, treperenje napona, pojavu viših harmonika u struji i naponu te ometanje rada pomoćnih sustava.

U tablici 1. prikazane su najznačajnije granice koje su povezane s kvalitetom električne energije za rad izmjenjivača.

Povratni utjecaj elektrane je definiran te je nagašena tolerancija za treperenje napona koje se vidljivo primijeti na rasvjetnim uređajima i potencijalnim kvarovima na kućanskim odnosno industrijskim uređajima. Sunčane elektrane i vjetroelektrane imaju velike oscilacije u snazi što utječe na treperenje napona. Prema Rahimi i sur. (2016, str. 1) izlazna snaga sunčane elektrane može pasti za 80% uslijed prolaska oblaka odnosno pojave sjene na panelima. Nagle promjene utječu brzo na naponske prilike, na povratne tokove snaga i ostale poteškoće s kvalitetom napona.

3. Izmjenjivači za distribucijsku mrežu

Rad sunčanih elektrana odnosno sunčanih panela na svome izlazu ima istosmjerni napon (DC) kojeg izmjenjivač treba preoblikovati u izmjenični napon (AC) kako bi mogao predati električnu energiju u distribucijsku mrežu. Kao što su u prethodnom poglavlju navedena regulativna i tehnička ograničenja, postavljeni su visoki uvjeti za priključenje koji su se unazad nekoliko godina mijenjali i postalo pristupačniji za spajanje izmjenjivača na distribucijsku mrežu.

3.1. Osnovne komponente mrežnog izmjenjivača

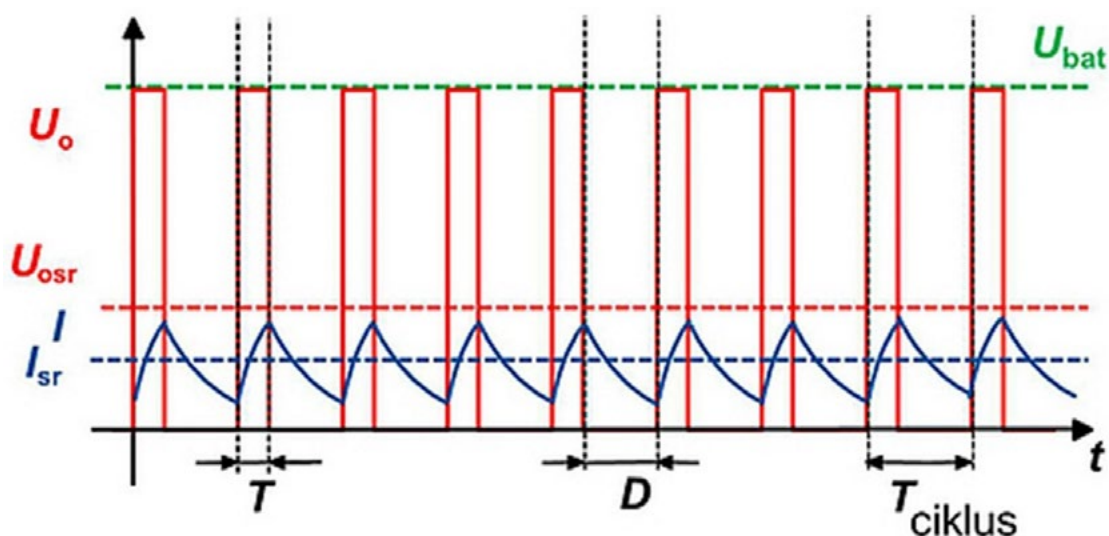
Kako bi se lakše shvatilo rad izmjenjivača, rad prikazuje osnovne i najvažnije elemente od kojih se mrežni izmjenjivač sastoji, a to su:

1. Kondenzatori za kratkotrajnu pohranu energije prije tranzistora,
2. IGBT tranzistori (engl. *Insulated Gate Bipolar Transistor*),
3. Povratne diode za omogućavanje protoka struje trošila,
4. Prigušnice –filter za ujednačavanje izlaznog valnog oblika struje,
5. Kondenzatori - filter za ujednačavanje izlaznog valnog oblika napona
6. Transformator – podizanje napona i galvansko odvajanje DC i AC dijela

3.2. Princip rada izmjenjivača

Izmjenjivači korištenjem pulsno širinske modulacije (engl. *PWM – Pulse Width Modulation*) i preciznim računanjem vremena uključanja tranzistora tvore promjenjivi iznos srednje vrijednosti napona. Na slici 3. je prikazan valni oblik napona koji se nalazi na izlazu iz pojednostavljenog izmjenjivača bez filtera. Oznaka U_{osr} prikazuje srednju vrijednost napona iako je stvarni napon pravokutnog oblika i daleko veće amplitude.

Slika 3. Princip oblikovanja struje i napona pomoću tranzistora i modulacije

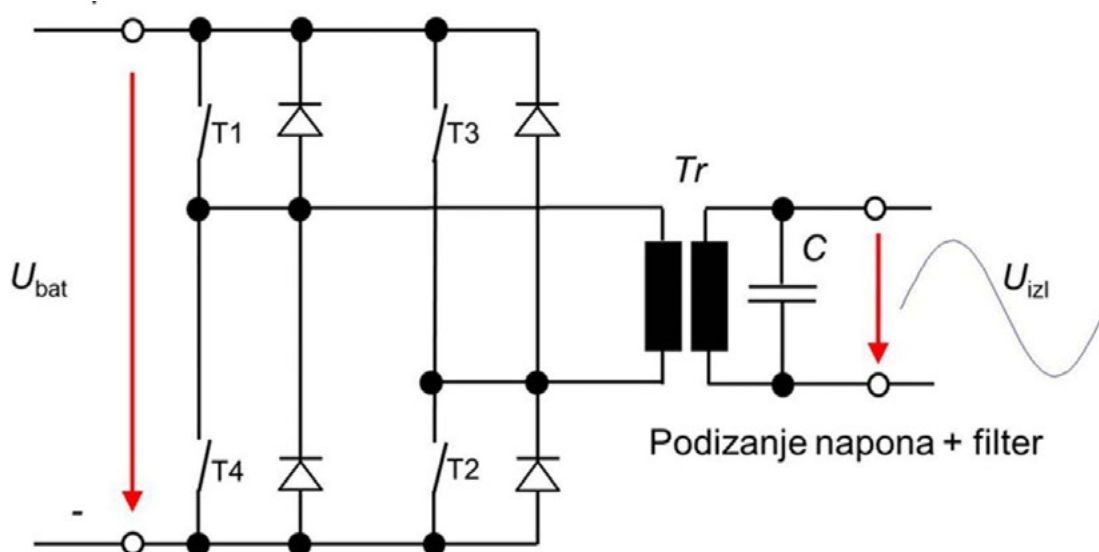


Izvor: Zdenković (2017, str. 23).

Za moduliranje izmjeničnog napona iz istosmjernog napona koristiti se sljedeća konfiguracija na slici 4. Sklopke T1 do T4 označavaju četiri bipolarna tranzistora s izoliranim vratima za upravljanje sklopkom. Tranzistorom se upravlja pomoću naponskog nositelja signala stoga je omogućena visoka frekvencija upravljanja i manje zagrijavanje tranzistora odnosno učinkovitija izmjena napona.

Izolacijski transformator se koristi za galvansko odvajanje AC i DC kruga te podizanje napona što je korisno ukoliko ne postoji veliki broj fotonaponskih panela. Transformator zbog svojeg induktiviteta djelomično filtrira više harmonike struje, a kondenzator se ponaša kao niskopropusni naponski filter, sve kako bi izlazni napon bio u propisanim granicama iz prethodnog poglavlja.

Slika 4. Konfiguracija izmjenjivača sa sinusnim valnim oblikom izlaznog napona

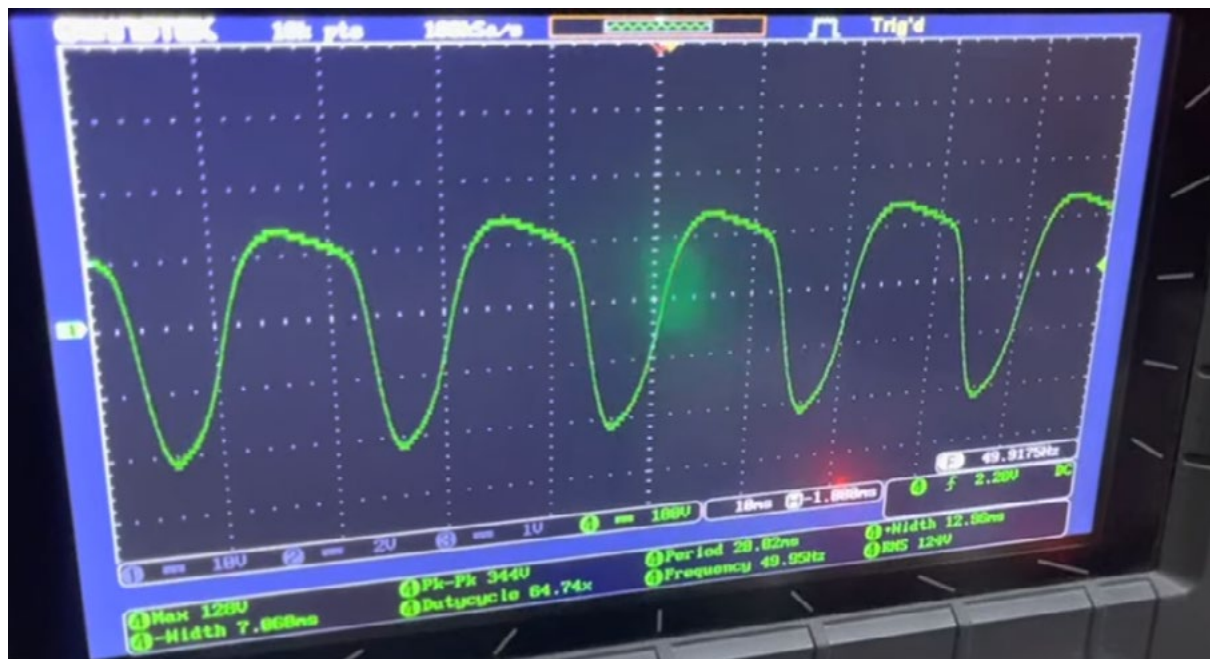


Izvor: Zdenković (2017, str. 25).

Renomirani proizvođači mrežom vođenih izmjenjivača usavršavaju odabir topologije izmjenjivača i komponenti te prema uputama proizvođača ABB postižu učinkovitost izmjenjivača iznad 98% (ABB, 2017), ali većina proizvođača deklarira da je utjecaj na ukupno harmoničko izobličenje ispod 3% što zadovoljava mrežna pravila od 8% odnosno 6,5%

za srednji napon, ali i dalje ne uspijevaju značajnije suzbiti harmoničko izobličenje. Na slici 5. prikazan je valni oblik napona amaterskog izmjenjivača s IGBT tranzistorima i filterima na izlazu. Vidljivo je da valni oblik sadrži šum i nepravilnog je sinusnog oblika zbog značajnih viših harmonika.

Slika 5. Osciloskopski prikaz izlaznog napona izmjenjivača s IGBT-ima



Izvor: Mondal (2023).

Zbog važnosti održavanja kvalitete napona unutar propisanih granica, za elektrane snage iznad 500 kW postavljaju se uređaji za trajno mjerenje kvalitete napona kako ne bi došlo do oštećenja opreme kod drugih korisnika. Trajnim mjerenjem kvalitete napona jednostavno je utvrditi utjecaj elektrane na mrežu te utjecati na proizvođača da poduzme korektivne mjere.

4. Zaključak

Izmjenjivači sa svojim radom utječu povratno na distribucijsku mrežu. Sve većom zastupljenosti sunčanih elektrana u mreži dolaziti će do više slučajeva kvara opreme u kućanstvima i u industriji. Preporuka je koristiti izmjenjivače od poznatih proizvođača opreme koji jesu nešto skuplji, ali neće utjecati na uređaje u blizini. Većom zastupljenosti izmjenjivača očekivano je da će se način filtriranja izlaznog napona usavršiti te da će se smanjiti negativni povratni utjecaj na mrežu. Pred operatorom distribucijskog sustava je izazovna budućnost u pogledu kontroliranja napona po dubini niskonaionske mreže te utvrđivanja štetnosti izmjenjivača na potrošače električne energije.

Citirani izvori

- ABB (2017). *Product Manual PVS-100/120-TL*, Revizija H, izdanje 12. 12. 2017.
- Chou, W. (2008). *Choose Your IGBTs Correctly for Solar Inverter Applications*. *Power Electronics Technology* (Elektrotehnički časopis međunarodne energetske istraživačke tvrtke Infineon Industries), str. 20-23. Dostupno na: <https://www.infineon.com/assets/row/public/documents/60/54/infineon-choose-your-igbt-correctly-for-solar-inverter-applications-article-en.pdf?fileId=5546d462533600a4015356926b322b5f>
- HEP Operator distribucijskog sustava (2018). *Mrežna pravila distribucijskog sustava NN 74/18*, 52/20.
- Mondal, S. (2023). *IGBT Based Pure Sine Wave Inverter*. Preuzeto 4.8.2025. s <https://www.youtube.com/watch?v=6n5NGR04IMc>
- Rahimi, K., Mohajeryami, S., & Majzoobi, A. (2016). *Effects of Photovoltaic Systems on Power Quality*, *North American Power Symposium (NAPS)*, p. 1-6. Conference held in Denver (CO, USA), 18-20 September 2016., DOI: 10.1109/NAPS.2016.7747955.
- Zdenković, J. (2017). *Autonomni izmjenjivač (inverter)*. *Burza nautike* (Nautički časopis i informativni portal), str. 20-25.
- Zeng, Z., Yang, H., Zhao, R., & Cheng, C. (2013). *Topologies and control strategies of multi-functional grid-connected inverters for power quality enhancement: A comprehensive review*. *Renewable and Sustainable Energy Review* (Međunarodni časopis namijenjen publiciranju istraživanja u području obnovljivih izvora energije), 24, 223-270, DOI: 10.1016/j.rser.2013.03.033.

The effect of transistors in inverters on power quality in the distribution grid

Summary

Renewable energy sources make up a large share of the electricity produced. Power plants that produce electricity are largely hydro power plants, nuclear and thermal power plants that have generators with rotors that create a true three-phase sinusoidal voltage and current form. Excluding hydro power plants, the most common renewable energy sources are wind power plants and solar power plants that are not directly connected to the distribution or transmission grid but use an electronic circuit called an inverter. The paper presents the principle of operation of an inverter using transistors as the main element and the power quality requirements that power plants connected to the Croatian distribution grid must meet. Inverters have a negative effect on the grid due to the high frequencies of transistors turning on and off, resulting in a distortion of the sinusoidal voltage waveform that can lead to overheating and failure of sensitive devices connected to the nearby distribution grid.

Keywords: IGBT, transistors, power quality, distribution grid