

**TEHNIKE REKONSTRUKCIJE U FOTONAPONSKIM ELEKTRANAMA U SLUČAJU
SENČENJA PANELA**
**RECONFIGURATION TECHNIQUES IN PHOTOVOLTAIC POWER PLANTS IN CASE
OF PARTIAL SHADING OF PHOTOVOLTAIC PANELS**

 Marija Joković, Vladimir Katić, *Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad*
Oblast – ELEKTROTEHNIKA I RAČUNARSTVO

Kratak sadržaj – U ovom radu govori se o problemu smanjenja proizvodnje električne energije u fotonaponskim elektranama u uslovima promenljivog zračenja. Predlaže se metoda analize rada u uslovima senčenja putem isključivanja i prespajanja osenčenih panela u nizu čime se dovodi do povećanja u proizvodnji električne energije.

Ključne reči: Fotonapsko pretvaranje, fotonaponski panel, inverter, senčenje, proizvodnja električne energije

Abstract - The paper presents the problem of reducing electricity production of PV power plant under variation of solar radiation conditions. It proposed a method of analysis PV power plant works under partial shading condition by switching off and rebinding shaded PV modules of PV array which leads to an increase in production of electric energy.

Keywords: Photovoltaic conversion, PV module, inverter, shading, electricity generation

1. UVOD

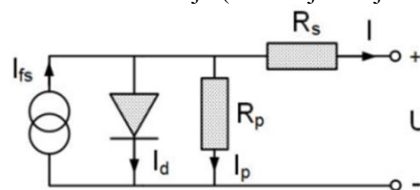
Solarna energija je najobilniji dostupan vid energije. Prednosti solarnih sistema su prvenstveno ekološkog karaktera: proizvedena energija je čista bez bilo kakvih štetnih nus proizvoda, osnovni energent je neiscrpan i besplatan, vek trajanja je dug (preko 25 godina) uz minimalno održavanje. Velika nedostatak je da nije konstantna tokom dana, kao i da ima promenljivu prirodu tokom cele godine. Negativan uticaj senčenja FN panela najčešći je problem koji se javlja pri radu FN elektrane. Pojava senke na FN panelima drastično smanjuje njihovu snagu i proizvedenu energiju.

Cilj ovog rada jeste smanjenje uticaja promenljivog zračenja na rad FN elektrane FTN1. Zbog toga se predlaže nova metoda analize rada FN elektrane u uslovima promenljivog zračenja. Rezultat istraživanja sa tehničkog aspekta treba da bude smanjenje gubitaka snage u razmatranom funkcionalnom delu FN elektrane FTN1.

2. MODEL FN ČELIJE I FN PANELA

Ekvivalentna šema fotonaponske ćelije jeste šema jednodiodnog modela, koji uvažava postojanje paralelne i redne otpornosti fotonaponske ćelije kojima se modeluje

parazitna struja FN ćelije i kontaktna otpornost i otpornost samog poluprovodnika, respektivno – slika 1. Struja idealnog strujnog izvora u modelu je direktno proporcionalna sunčevom zračenju (modeluje struju saturacije).



Slika 1. Ekvivalentna šema jedno-diodnog modela fotonaponske ćelije

Struja ćelije jednaka razlici struje svetla i struje koja protiče kroz diodu te se mogu definisati dve struje, struja svetla I_{fs} i struja diode I_d gde važi:

$$I = I_{fs} - I_d \quad (1)$$

Struja kroz diodu je proporcionalna inverznoj struji zasićenja I_0 i ima eksponencijalnu zavisnost koja je karakteristična za diodu.

$$I_d = I_0 \cdot \left(e^{\frac{V_d}{n \cdot V_{th}}} - 1 \right), \quad (2)$$

gde je V_d napon na diodi, n faktor idealnosti diode a V_{th} napon održavanja diode dat sa:

$$V_d = U + I \cdot R_s, \quad (3)$$

$$V_{th} = \frac{k \cdot T}{q}. \quad (4)$$

V_{th} je srazmeran temperaturi i zavisi od Bolzmanove konstante (k) i konstante elementarnog naelektrisanja (q). Uvrštavanjem jednačina 2), 3) i 4) u početnu relaciju 1) dobija se zavisnost struje od napona ćelije:

$$I = I_{fs} - I_0 \cdot \left(e^{\frac{q(U+I \cdot R_s)}{n \cdot k \cdot T}} - 1 \right). \quad (5)$$

Za dalji proračun modela potrebna je vrednost struje kratkog spoja modela $I_{sc(T_1)}$ i napon praznog hoda solarnog $U_{oc(T_1)}$ izvora. Obe vrednosti se dobijaju ogledom na temperaturi T_1 . Aproximacijom može da se pretpostavi da je struja I_d u praznom hodu panela jednaka struji $I_{sc(T_1)}$ tj. $I_d = I_{sc(T_1)}$, podrazumevajući da se oba ogleda vrše na temperaturi T_1 . Svođenjem (2) za temperaturu T_1 se dobija:

$$I_{sc(T_1)} = I_{0(T_1)} \cdot \left(e^{\frac{q \cdot U_{oc(T_1)}}{n \cdot k \cdot T_1}} - 1 \right). \quad (6)$$

NAPOMENA:

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

Struja I_0 za bilo koju temperaturu se može dobiti u zavisnosti od struje $I_{0(T_1)}$, za dobijenu temperaturu T_1 , u funkciji od tražene temperature T po relaciji:

$$I_0 = I_{0(T_1)} \cdot \left(\frac{T}{T_1}\right)^{\frac{3}{n}} \cdot e^{\frac{-q \cdot V_g}{n \cdot k} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_1}\right)} \quad (7)$$

gde je V_g (band gap voltage) napon zabranjene zone. Struja osvetljaja za temperaturu T_1 ($I_{fs(T_1)}$) je proporcionalna struji kratkog spoja pri nominalnoj osvetljenosti na temperaturi T_1 i odnosom datog nominalnog osvetljaja.

$$I_{fs(T_1)} = \frac{G}{G_{nom}} \cdot I_{sc(T_1, nom)} \quad (8)$$

Struja osvetljaja I_{fs} za temperaturu T je data relacijom:

$$I_{fs} = I_{fs(T_1)} \cdot (1 + K_0 \cdot (T - T_1)), \quad (9)$$

gde je K_0 koeficijent koji predstavlja zavisnost temperatura T_1 i T_2 i dat je izrazom (10):

$$K_0 = \frac{I_{sc(T_2)} - I_{sc(T_1)}}{I_{sc(T_1)} \cdot (T_2 - T_1)}, \quad (10)$$

a struja $I_{sc(T_2)}$ se dobija eksperimentalno, kao $I_{sc(T_1)}$ za temperaturu T_2 .

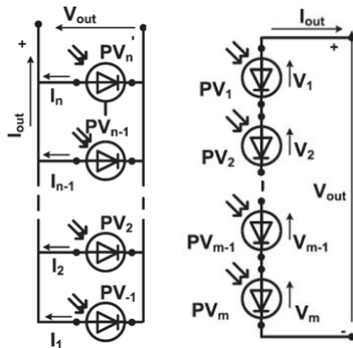
Konačna zavisnost struje od napona je data jednačinom (5), s tim da se navedene relacije parametara neće uvrštavati u krajnji izraz jer bi postao preobimian. Struja I_0 se uvrštava u izraz (5) proračunata po (7) a struja I_{fs} iz (9). Za potrebe modela panela kojim se vrši simulacija zahteva se zavisnost napona od struje, izražavajući jednačinu (5) po struji:

$$I_0 \cdot \left(e^{\frac{q \cdot (U + I \cdot R_s)}{n \cdot k \cdot T}} - 1 \right) = I_{fs} - I. \quad (11)$$

Iz 11) se matematičkim operacijama logaritmovnja dobija napon:

$$U = \frac{n \cdot k \cdot T}{q} \cdot \ln \left(1 + \frac{I_{fs} - I}{I_0} \right) - I \cdot R_s. \quad (12)$$

Relacija 12) je konačan izraz zavisnosti struje od napona kojom se matematički modeluje rad solarnog panela [1]. Snaga koju može proizvesti jedna fotonaponska ćelija je relativno mala, te se iz tog razloga veći broj fotonaponskih ćelija povezuje u grupu, čime se formira fotonaponski modul. Na slici 2 prikazana je paralelna i redna veza fotonaponskih ćelija koje čine modul.



Slika 2. Paralelna i radna veza FN ćelija [2]

Moduli se povezuju redno kako bi se dobio veći radni napon i paralelno kako bi se dobila veća radna struja. Spajanjem većeg broja fotonaponskih modula dobija se fotonaponski panel. Fotonaponski paneli se uglavnom, povezuju serijski i formiraju FN niz.

3. SENČENJE FOTONAPONSKIH PANELA

Senčenje FN panela je jedan od uzroka smanjenja proizvodnje energije FN niza. Moduli FN niza dobijaju nehomogeno sunčevo zračenje, a time postoji neusklađenost između trenutnih struja modula. Kako osenčeni moduli generišu manje struje od neosenčenih, struja osenčenih modula ograničava izlaznu struju FN niza, a proizvodnja snage delimično osenčenog FN niza se smanjuje. Uticaj senčenja na FN polje nije linearno, što otežava predikciju proizvodnje FN elektrane.

Moduli FN niza izloženi delimičnom senčenju primaju različite nivoe sunčevog zračenja, što može davati višestruke lokalne maksimume na P-U karakteristici. Broj maksimuma zavisi od složenosti senke, odnosno od broja različitog nivoa zračenja na FN panelima. Sa promenom karakteristike FN panela, menja se napon praznog hoda i struja kratkog spoja.

Izlazna snaga FN panela linearno zavisi od zračenja. Istovremeno snaga FN panela zavisi i od temperature panela. Jednačina koja opisuje ove zavisnosti glasi

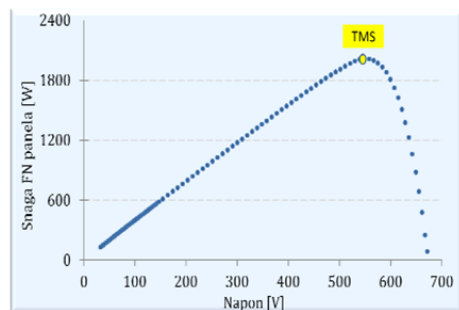
$$P = P_r \frac{G}{G_r} \left[1 + \gamma (T - T_r) / 100 \right], \quad (13)$$

gde su:

P_r , G_r i T_r redom snaga, zračenje i temperatura pri nekim uslovima, najčešće referentnim, koje nazivamo standardni uslovi testiranja FN panela. γ temperaturni koeficijent snage, izražen u $W/^\circ C$ [3].

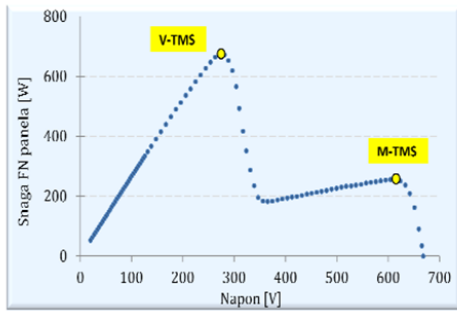
Svako stanje koje prouzrokuje generisanje različite struje i/ili napona FN panela u jednom FN nizu ili polju se naziva neusklađenost električnih parametara FN panela. Značajniji gubici u FN nizu se mogu javiti kada FN niz ili polje rade u uslovima koji dovode do neusklađenosti FN panela (engl. mismatch condition). Razlog tome je promena oblika I-U, odnosno P-U karakteristike, uz pojavu dve ili više tačaka maksimalne snage. Neusklađenost FN panela nastaje i tokom senčenja delova FN niza/polja.

Kod FN panela koji nije u senci postoji samo jedna tačka maksimalne snage, ona je na slici 3 označena sa TMS. Karakteristika FN panela zavisi od trenutne temperature i solarnog zračenja. Zbog toga se TMS panela stalno menja. U situaciji bez senke, nalaženje TMS od strane invertora, bez obzira na stalne promene, ne predstavlja problem.



Slika 3. P-U karakteristika FN niza bez senke [3].

Kada se FN panel nađe u senci, zbog pojave dva različita nivoa zračenja na FN nizu, najčešće se na P-U karakteristici pojavljuju dva izražena maksimuma snage. Ova situacija je prikazana na slici 4.



Slika 4. P-U karakteristika FN niza sa senkom [3]

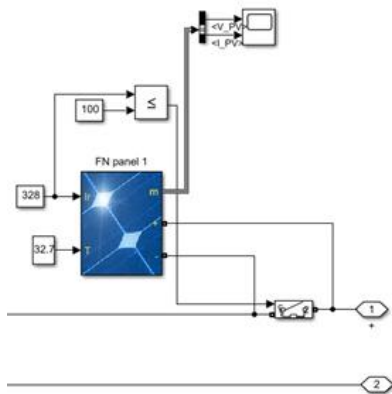
Po pravilu, broj maksimuma karakteristike FN niza se poklapa sa brojem različitog nivoa senčenja FN niza, a među maksimumima postoji jedan koji je najveći. Ovaj maksimum je obeležen sa V-TMS i naziva se veća tačka maksimalne snage (engl. GMPP, Global Maximum Power Point). Manja tačka maksimalne snage je obeležena sa M-TMS (engl. LMPP, Local Maximum Power Point). U zavisnosti od algoritma za nalaženje TMS inverter će naći ili V-TMS ili M-TMS. Bilo bi poželjno da inverter nalazi V-TMS.

4. MODELOVANJE FN ELEKTRANE FTN1 U MATLABU

Matlab model FN elektrane FTN1 sastoji od više podsistema. Svaki podsistem igra važnu ulogu u povezivanju fotonaponske elektrane na električnu mrežu. Osnovni blokovi su: podsistem niza panela, Boost pretvaraču, MPPT kontroler čija je svrha da se dobije maksimalno iskorišćenje ovog niza i centralnom invertoru na koji se niz povezuje.

Razvijeni model omogućava simulaciju ponašanja FN niza i u nehomogenim ambijentalnim uslovima.

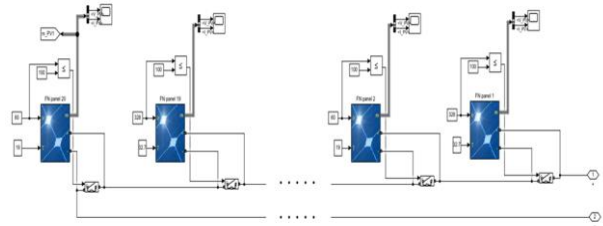
Opisać se samo podsistem niza panela zbog osobina potrebnih za realizaciju ove metode rekonfiguracije. Blok jednog FN panela u MATLAB/Simulink softveru, prikazan je na slici 5. Ulazni parametri bloka su solarno zračenje (G) i temperatura panela (T) Solarno zračenje je osnovni ulazni podatak na osnovu čije promene model daje izlazne veličine kao što su napon, struja i snaga.



Slika 5. Blok FN panela

Model FN niza je formira prostom rednom vezom blokova FN panela sa slike 5. Promena broja FN panela u nizu modela postiže se jednostavnim prevezivanjem, a samim tim i eliminacijom određenog broja blokova FN panela. Na slici 6 je prikazan model FN niza od 20 blokova, odnosno FN panela, FN elektrane FTN1.

Razvijeni model omogućava simulaciju ponašanja FN niza i u nehomogenim ambijentalnim uslovima. Za svaki FN panel u nizu može se definisati različito solarno zračenje i temperatura, mada je u praksi najčešći slučaj nehomogenog zračenja situacija sa dva različita para ambijentalnih uslova: $[G(1), T(1)]$ i $[G(2), T(2)]$. Ako AU označava broj uređenih parova solarnog zračenja i temperature panela $[G(x), T(x)]$, tada za model FN niza sa slike 7.5 važi da je $1 \leq AU \leq 20$. Ako je FN niz pod homogenim uslovima zračenja tada važi da je $AU=1$ i svi ulazi za zračenje i temperaturu u blok FN panela su jednaki: $G(1)=G(2)=\dots=G(20)$ i $T(1)=T(2)=\dots=T(20)$. U slučaju nehomogenog zračenja važi da je $AU \neq 1$ i maksimalan broj različito uređenih parova za prikazani model FN niza je $AU=20$.



Slika 6. Redna veza 20 panela niza FN elektrane FTN1

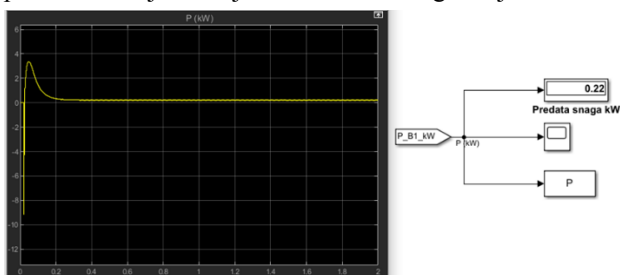
Kako bi u potpunosti omogućili nesmetani rad panela u nehomogenim uslovima, za svaki panel u nizu postavljen je prekidač. Kada panel radi u uslovima slabe ozračenosti tj. kada je panel u senci (zračenje manje od $100W/m^2$), to je znak prekidaču da se zatvori. Zatvoreni prekidač prespaja vezu između panela se leve i desne strane panela u senci i panel u senci je prekično izbačen iz rada. Ovime se dobija nesmetani rad elektrane sa panelima u senci koji značajno utiču na pad struje a time i izlazne snage FN elektrane.

5. EKSPERIMENTALNA VERIFIKACIJA REZULTATA PREDLOŽENOGMODELA

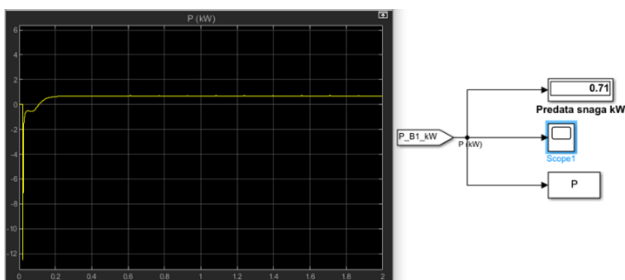
U radu su analizirane dve situacije. U slučaju nehomogenog zračenja menjao se broj FN panela u nizu od minimalne vrednosti - 10 do maksimalne vrednosti - 20. Za svaki broj FN panela u nizu vršena je simulacija pri čemu je za slučaj homogenog zračenja $AU=1$, a za slučaj nehomogenog zračenja $AU=2$ (slučaj sa dva para zračenja i temperature $[G(1), T(1)]$ i $[G(2), T(2)]$). Za slučaj nehomogenog zračenja svi FN paneli izloženi sunčevim zracima imaju isto zračenje i temperaturu, na primer $[G(1), T(1)]$, dok FN paneli u senci imaju drugi uređeni par, na primer $[G(2), T(2)]$. Da bi simulacioni rezultati bili uporedivi sa merenim vrednostima, koji su se obavljali u letnjem periodu, važi da je $G(2)=60W/m^2$, a $T(2)=19^{\circ}C$ (Za $G(1), T(1)$ je uzeto više vrednosti radi testiranja modela za više slučajeva).

Pošto se u slučaju simulacije sa nehomogenim zračenjem menja broj senčenih i osunčanih panela, uvode se dve nove promenljive. Ukupan broj FN panela u nizu je konstantan i iznosi 20, od čega je n u senci a $N=20-n$ osunčano. Na slici 7 prikazan je dobijeni grafik i izlazna snaga za prvu simulaciju, kada je 10 FN panela u senci a 10 ozračeno, u slučaju nehomogenih uslova bez rekonfiguracije. Može se primetiti da je inverter našao samo manju tačku maksimalne snage.

Na slici 8 prikazan je dobijeni grafik i izlazna snaga za prvu simulaciju kada je izvršena rekonfiguracija.



Slika 7. Nehomogeni uslovi bez rekonfiguracije

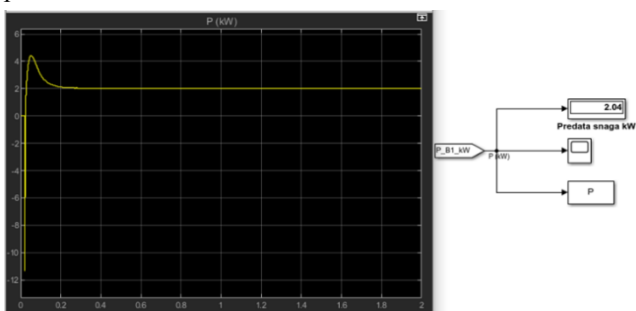


Slika 8. Nehomogeni uslovi sa rekonfiguracijom

Izlazna snaga je oko tri puta veća kada se prespoje 10 panela koji su u senci a rad elektrane nastavi sa ostalih 10 redno povezanih panela u niz koji se može smatrati homogenim.

Može uočiti jedan nedostatak na dobijenim graficima, a to je nagli propad snage u početnim trenucima simulacije. Ovo se dešava usled kasnijeg uključenja invertora zbog smanjenog napona koji je posledica smanjenog broja FN panela. Ovo se odražava na dobijenu snagu simulacije tj. zbog smanjenog napona, snaga FN niza je manja, uključenje invertora je kasnije i kraće je vreme generisanja energije.

Uz to inverter sa smanjenim naponom ima manju efikasnost. Nakon nekoliko delova sekunde ova vrednost se ustaljuje na vrednost *M-TMS* kada se simulira slučaj bez rekonfiguracije ili TMS kada se simulira slučaj sa rekonfiguracijom. Na slici 9 prikazan je dobijeni grafik i izlazna snaga za poslednju simulaciju kada je svih 20 panela ozračeno.



Slika 9. Nehomogeni uslovi sa i bez rekonfiguracije

Ovo je jedini slučaj kada se dobijaju isti rezultati i sa i bez rekonfiguracije. Razlog toga je što su u ovom slučaju svi paneli ozračeni, tj. nema panela u senci. Rezultati ostalih simulacija prikazani su u tabeli 1.

Vrednosti maksimalnih snaga kada niz radi u nehomogenim uslovima senčenja bez rekonfiguracije višestruko su manje od vrednosti maksimalnih snaga kada je izvršena rekonfiguracija.

Inverter u slučaju nehomogenog zračenja bez rekonfiguracije nalazi samo *M-TMS* čime se snaga elektrane značajno smanjuje u odnosu na snagu koja se dobija kada su osenčeni paneli izostavljeni iz simulacije.

Prespajanjem FN panela dobija se niz panela sa jednakim ozračenjem i temperaturom gde inverter uvek naplazi TMS, što za rezultat ima višestruko veću snagu.

Tabela 1. Rezultati dobijeni simulacijama za različiti broj osenčenih panela

G [W/m ²]	T [°C]	N/n	Nehomogeni uslovi bez rekonfiguracije	Nehomogeni uslovi sa rekonfiguracijom
			M-TMS [kW]	TMS [kW]
328	32.7	10 / 10	0.22	0.71
374	35.9	14 / 6	0.23	1.13
398	36.8	16 / 4	0.25	1.37
431	38.6	18 / 2	0.29	1.65
480	40.4	20 / 0	2.04	2.04

6. ZAKLJUČAK

U ovom radu je prikazana praktična primena metode analize rada u uslovima senčenja putem isključivanja i prespajanja osenčenih panela u nizu. Rezultati simulacije su potvrdili zamisao da se može iskoristiti veća snaga fotonaponskog panela kada se umesto projektovanog punog broja FN panela u nizu, koji su pod nehomogenim uslovima senčenja, koristi smanjen broj FN panela u nizu, pri čemu su svi izloženi sunčevom zračenju. Pošto se formira niz koji je homogeno ozračen, karakteristika fotonaponskog niza poseduje samo jedan maksimum, što inverter bez problema nalazi i na taj način se snaga elektrane povećava u odnosu na slučaj kada su paneli u nizu nehomogeno ozračeni, što je u radu i pokazano.

7. LITERATURA

- [1] Z. Ivanović, V.A. Katić, „Obnovljivi izvori električne energije - vežbe“, Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad, 2018.
- [2] D. Nguyen and B. Lehman, „An Adaptive Solar Photovoltaic Array Using Model-Based Reconfiguration Algorithm“, IEEE Transactions on Industrial Electronics, July 2008.
- [3] Z. Čorba, „Novi metod analize rada fotonaponskog sistema u uslovima varijacije sunčevog zračenja“, doktorska disertacija, FTN, Novi Sad, 2016.

Kratka biografija:



Marija Joković rođena je u Kladovu 1996. god. Master rad na Fakultetu tehničkih nauka iz oblasti Elektrotehnike i računarstva – Energetska elektronika i električne mašine odbranila je 2020. god.



Vladimir Katić rođen je 1954. godine u Novom Sadu. Diplomirao je na Fakultetu tehničkih nauka u Novom Sadu 1978. god., a magistrirao i doktorirao na Univerzitetu u Beogradu 1981. i 1991. godine, respektivno. Od 2002. godine je redovni profesor Univerziteta u Novom Sadu. Oblasni interesovanja su energetska elektronika, obnovljivi izvori električne energije, kvalitet električne energije i električna vozila.