

Jovan Mikulović
Željko Đurišić

SOLARNA ENERGETIKA

Akadska misao
Beograd, 2019.

Jovan Mikulović
Željko Đurišić

SOLARNA ENERGETIKA

Recenzenti

Prof. dr Dušan Mikičić
Prof. dr Tomislav Šekara

Izdavač

AKADEMSKA MISAO
Beograd

Štampa

Akademski misao, Beograd

Tiraž

300 primeraka

ISBN 978-86-7466-773-6

NAPOMENA: Fotokopiranje ili umnožavanje na bilo koji način ili ponovno objavljivanje ove knjige u celini ili u delovima - nije dozvoljeno bez saglasnosti i pismenog odobrenja izdavača.

Predgovor

Knjiga „Solarna energetika“ namenjena je za sticanje osnovnih znanja o potencijalu sunčevog zračenja, kao i inženjerskih znanja o sistemima za fotonaponsku i toplotnu konverziju sunčeve energije. Knjiga je koncipirana da bude prvenstveno udžbenik koji pokriva delove gradiva iz predmeta: Obnovljivi izvori energije, Integracija obnovljivih izvora energije u EES, Sistemi za skladištenje energije u EES i Vetroenergetika i solarna energetika, koje studenti pohađaju na osnovnim, master i doktorskim studijama na Elektrotehničkom fakultetu u Beogradu.

Udžbenik u potpunosti pokriva problematiku solarne energetike, uključujući i ekološke aspekte proizvodnje električne energije iz obnovljivih izvora. Kvalitetnijem razumevanju dodatno doprinose rešeni primeri koji se navode na kraju svakog poglavlja kao dopuna prethodno izloženim teorijskim osnovama.

Iako je knjiga pre svega koncipirana da bude nastavno sredstvo, ona podjednako može biti korisna i inženjerima koji se bave solarnom energetikom, s obzirom na to da sadrži dosta praktičnih iskustava autora u proračunu solarnog potencijala i projektovanju solarnih sistema. Imajući u vidu da na srpskom jeziku ne postoji jasno definisana terminologija iz oblasti solarne energetike, poseban zadatak ove knjige je bio da predloži termine, kako bi se izbeglo korišćenje različitih pojmova i slobodnih prevoda određenih termina preuzetih iz engleskog jezika. Mnoge od citiranih referenci koje su korišćene tokom pisanja ovog udžbenika su knjige renomiranih svetskih izdavača, kao i naučni radovi publikovani u renomiranim međunarodnim časopisima, a naučno-stručni radovi autora ovog udžbenika potvrđuju da je udžbenik rezultat desetogodišnjeg naučno-stručnog rada autora u oblasti solarne energetike.

U uvodnom poglavlju knjige su razmatrani osnovni oblici energije, obnovljivi i konvencionalni izvori energije, ekološki problemi i značaj obnovljivih izvora energije. U drugom poglavlju je opisano Sunce kao izvor energije. Razmatrano je elektromagnetsko zračenje Sunca i prikazani su uzroci slabljenja sunčevog zračenja u Zemljinj atmosferi. Posebna pažnja je posvećena osnovnim fizičkim veličinama koje opisuju sunčevo zračenje. Treće poglavlje se bavi koordinatnim sistemima i osnovnim veličinama koje opisuju položaj sunca na nebeskoj sferi. U ovom poglavlju je takođe razmatran uticaj senki okolnih objekata, kao i uticaj senki koje stvaraju moduli unutar fotonaponskog sistema. U četvrtom poglavlju su obrađeni postupci za proračun potencijala solarnog zračenja. Razmatrani su modeli koji se zasnivaju na jednačinama za izračunavanje snage i energije sunčevog zračenja pri vedrom danu. Takođe su razmatrane metode za proračun potencijala sunčevog zračenja koje se zasnivaju na dugoročnim merenjima intenziteta sunčevog zračenja. U petom poglavlju je obrađena fotonaponska konverzija energije sunčevog zračenja. U cilju razumevanja principa fotonaponske konverzije, date su osnove fizike poluprovodnika. U ovom poglavlju se razmatra fotonaponska ćelija, fotonaponski moduli i paneli, kao i uticaj delimičnog zasenčenja modula i panela na njihovu efikasnost. Opisani su osnovni tipovi fotonaponskih materijala koji se koriste za izradu fotonaponskih ćelija i modula. Šesto poglavlje se bavi fotonaponskim sistemima. Opisane su vrste i komponente fotonaponskih sistema, kao i njihove karakteristike. Dati su postupci za dimenzionisanje autonomnih fotonaponskih sistema, kao i fotonaponskih sistema koji

su priključeni na distributivnu mrežu. Sedmo poglavlje se bavi toplotnom konverzijom solarne energije. Razmatrani su solarni termalni kolektori, solarne termalne elektrane, kao i fotonaponski termalni kolektori.

Autori se zahvaljuju recenzentima, prof. Dušanu Mikičiću i prof. Tomislavu Šekari, koji su dali korisne savete i ukazali na nekoliko nedostataka u inicijalnom rukopisu udžbenika. Autori se zahvaljuju Đorđu Lazoviću i Kristini Džodić, asistentima na predmetu Obnovljivi izvori energije, na pomoći u otklanjanju grešaka i nejasnoća u rukopisu udžbenika, kao i svim članovima Katedre za elektroenergetske sisteme na podršci u pisanju ovog udžbenika. Autori se takođe zahvaljuju studentu master studija Matiji Kostiću na svesrdnoj pomoći u rešavanju problema iz oblasti astronomije.

Posebnu zahvalnost autori duguju profesoru Dušanu Mikičiću, koji je prvi započeo istraživanja i uveo nastavu iz oblasti solarne energetike na Energetskom odseku Elektrotehničkog fakulteta u Beogradu. Nesebično je preneo na nas svoja znanja i viziju solarne energetike i bez njega danas ova knjiga ne bi postojala.

U Beogradu, juna 2019. godine

Autori

Sadržaj

1. Uvod	1
1.1 Izvori energije.....	1
1.2 Obnovljivi i neobnovljivi izvori energije.....	4
1.3 Potencijali, resursi i rezerve obnovljivih izvora energije.....	4
1.4 Struktura i trendovi proizvodnje i potrošnje energije u svetu.....	5
1.5 Izvori energije i ekološki problemi.....	9
1.5.1 Uticaj sagorevanja fosilnih goriva na globalno zagrevanje.....	11
1.6 Trendovi i struktura proizvodnje električne energije iz obnovljivih izvora.....	17
1.7 Koncept budućeg elektroenergetskog sistema.....	20
1.7.1 Podela distribuirane proizvodnje.....	21
1.8 Primeri	22
2. Energija Sunca	25
2.1 Sunce kao izvor energije.....	25
2.2 Elektromagnetsko zračenje Sunca	30
2.2.1 Osnovne veličine koje karakterišu elektromagnetsko zračenje Sunca	31
2.2.2 Osnovni zakoni zračenja.....	33
2.2.3 Zračenje Sunca na površini Zemljine atmosfere	36
2.3 Elektromagnetsko zračenje Sunca na Zemlji.....	38
2.3.1 Zemljina atmosfera.....	38
2.3.2 Bilans energije Sunčevog zračenja na Zemlji.....	40
2.3.3 Apsorpcija zračenja u atmosferi	41
2.3.4 Rasejanje zračenja u atmosferi	42
2.3.5 Koeficijent vazdušne mase	43
2.3.6 Spektar Sunčevog zračenja na površini Zemlje.....	46
2.4 Primeri	51
3. Položaj sunca na nebeskoj sferi	56
3.1 Koordinatni sistemi za određivanje položaja sunca na nebeskoj sferi.....	56
3.1.1 Zemljina putanja oko Sunca	56
3.1.2 Ekliptički koordinatni sistem.....	57
3.1.3 Nebeski ekvatorski koordinatni sistem.....	59
3.1.4 Mesni ekvatorski koordinatni sistem	60
3.1.5 Horizontski koordinatni sistem.....	62
3.1.6 Transformacija sfernih koordinata iz jednog u drugi koordinatni sistem....	63
3.2 Osnovne veličine koje opisuju položaj sunca na nebeskoj sferi.....	64
3.2.1 Ugao deklinacije sunca.....	64
3.2.2 Altitudni i azimutni ugao sunca.....	66
3.2.3 Časovni ugao sunca	68
3.2.4 Solarno vreme i jednačina vremena.....	70
3.2.5 Časovni i azimutni ugao izlaska i zalaska sunca	72
3.2.6 Orijentacija solarnog kolektora u odnosu na položaj sunca	73
3.3 Proračun neiskorišćene insolacije usled senki okolnih objekata	75
3.3.1 Uticaj senki koje stvaraju okolni objekti	75
3.3.2 Uticaj senki koje stvaraju moduli unutar fotonaponskog sistema	78
3.4 Primeri	81

4. Proračun potencijala solarnog zračenja	89
4.1 Ekstraterestričko solarno zračenje	89
4.1.1 Ekstraterestrička iradijansa.....	89
4.1.2 Ekstraterestrička insolacija	92
4.2 Proračun iradijanse i insolacije na solarni kolektor pri vedrom danu.....	94
4.2.1 Direktna komponenta iradijanse na solarni kolektor	95
4.2.2 Difuzna komponenta iradijanse na solarni kolektor	101
4.2.3 Reflektovana komponenta iradijanse na solarni kolektor.....	107
4.2.4 Ukupna iradijansa na solarni kolektor	110
4.2.5 Izračunavanje insolacije na solarni kolektor.....	110
4.3 Optimalni nagibni i azimutni uglovi fiksno postavljenih solarnih kolektora....	111
4.4 Solarni kolektori sa sistemima za optimalno praćenje sunca.....	113
4.4.1 Sistemi za praćenje položaja sunca po dve ose	115
4.4.2 Sistemi za rotaciju kolektora oko horizontalne ose u pravcu istok-zapad.	116
4.4.3 Sistemi za rotaciju kolektora oko horizontalne ose u pravcu sever-jug	117
4.4.4 Sistemi za rotaciju kolektora oko nagnute ose u pravcu sever-jug.....	117
4.4.5 Sistemi za rotaciju kolektora oko vertikalne ose	119
4.4.6 Uporedna analiza kolektora sa različitim sistemima za optimalno praćenje sunca	120
4.5 Proračun iradijanse i insolacije na solarni kolektor uz uvažavanje oblačnosti .	122
4.5.1 Merenje iradijanse	123
4.5.2 Indeks vedrine	124
4.5.3 Određivanje difuzne komponente zračenja na osnovu indeksa vedrine	128
4.5.4 Proračun insolacije na solarni kolektor na osnovu merenja horizontalne iradijanse.....	129
4.5.5 Primena modela za proračun potencijala solarnog zračenja na područje Srbije	132
4.6 Primeri	135
5. Fotonaponska konverzija solarne energije	152
5.1 Fotonaponski efekat.....	152
5.1.1 Fotoelektrični efekat	152
5.1.2 Istorijat fotonaponske konverzije	153
5.1.3 Osnovi fizike poluprovodnika	154
5.1.4 Uticaj energetske barijere na efikasnost fotonaponskih materijala	159
5.1.5 Princip fotonaponske konverzije	162
5.2 Fotonaponska ćelija	166
5.2.1 Osnovni model fotonaponske ćelije	166
5.2.2 Složeniji modeli fotonaponske ćelije.....	169
5.2.3 Uticaj solarne iradijanse i temperature na strujno-naponsku karakteristiku fotonaponske ćelije	173
5.3 Fotonaponski moduli i paneli	177
5.3.1 Fotonaponski moduli	178
5.3.2 Fotonaponski paneli.....	182
5.3.3 Uticaj solarne iradijanse i temperature na strujno-naponsku karakteristiku fotonaponskog modula	185
5.4 Efekti delimičnog zasenčenja na strujno-naponsku karakteristiku	

fotonaponskih modula	187
5.4.1 Modelovanje delimičnog zasenčenja fotonaponskog modula	187
5.4.2 Diode za premoščavanje	190
5.4.3 Diode za zaštitu od inverzne struje (“blokirajuće diode”)	194
5.5 Tipovi fotonaponskih materijala	194
5.5.1 Monokristalni silicijum	196
5.5.2 Polikristalni silicijum	197
5.5.3 Amorfni silicijum	197
5.5.4 Tankoslojni fotonaponski materijali (tanki filmovi)	198
5.5.5 Tankoslojne monokristalne fotonaponske ćelije i višespojne strukture	200
5.5.6 Fotonaponski moduli sa koncentradorima	202
5.5.7 Efikasnost fotonaponskih ćelija	202
5.6 Primeri	203
6. Fotonaponski sistemi	214
6.1 Vrste fotonaponskih sistema	214
6.1.1 Autonomni (samostalni) fotonaponski sistemi	214
6.1.2 Hibridni fotonaponski sistemi	216
6.1.3 Fotonaponski sistemi povezani na distributivnu mrežu	216
6.1.4 Fotonaponski sistemi integrisani u krovove i fasade zgrada	219
6.1.5 Plivajuće fotonaponske elektrane	219
6.1.6 Prednosti i nedostaci fotonaponskih sistema	220
6.2 Uređaji za praćenje tačke maksimalne snage	221
6.2.1 DC/DC pretvarači	222
6.2.2 Algoritmi za praćenje tačke maksimalne snage	227
6.3 Invertori	232
6.3.1 Osnovne topologije invertora	232
6.3.2 Karakteristike invertora za fotonaponske sisteme	233
6.3.3 Konfiguracije fotonaponskih panela kod sistema povezanih na mrežu	236
6.4 Projektovanje fotonaponskih sistema priključenih na distributivnu mrežu	239
6.5.1 Dimenzionisanje osnovnih komponenti fotonaponskog sistema	240
6.5.2 Dimenzionisanje pratećih komponenti fotonaponskog sistema	246
6.5.3 Zaštita od strujnog udara	247
6.5.4 Prekostrujna zaštita i zaštita od inverzne struje	248
6.5.5 Prenaponska zaštita	250
6.5.6 Elementi za odvajanje	250
6.5.7 Dimenzionisanje provodnika	250
6.5.8 Uzemljenje fotonaponskog sistema	252
6.5.9 Zaštita i dimenzionisanje komponenti na naizmeničnoj strani fotonaponskog sistema	254
6.5.9 Šema povezivanja fotonaponskog sistema na mrežu	255
6.5 Projektovanje autonomnih i hibridnih fotonaponskih sistema	257
6.5.1 Procena potrošnje i vršnog opterećenja	257
6.5.2 Određivanje jednosmernog napona sistema	258
6.5.3 Olovne akumulatorske baterije	260
6.5.4 Litijum-jonske akumulatorske baterije	264
6.5.4 Dimenzionisanje autonomnih fotonaponskih sistema	268

6.5.5 Dimenzionisanje hibridnih fotonaponskih sistema sa dizel i benzinskim agregatima	273
6.6 Primeri	278
7. Toplotna konverzija solarne energije	289
7.1 Solarni termalni kolektori	289
7.1.1 Pločasti kolektori	290
7.1.2 Vakuumski kolektori	294
7.1.3 Solarni kolektori u obliku koncentratora	296
7.1.4 Parabolični koncentratori.....	298
7.1.5 Koncentratori sa Frenelovim sočivima ili reflektorima	301
7.1.6 Heliostati.....	302
7.2 Solarne termalne elektrane.....	305
7.2.1 Solarne termalne elektrane sa kolektorima u obliku paraboličnih korita ..	306
7.2.2 Solarne termalne elektrane sa heliostatima i solarnim tornjem	308
7.2.3 Solarne termalne elektrane sa linearnim Frenelovim reflektorima.....	310
7.2.4 Solarne termalne elektrane sa kolektorima u obliku paraboličnih tanjira..	311
7.2.5 Hibridne solarne termalne elektrane	313
7.2.6 Skladištenje energije kod solarnih termalnih elektrana	313
7.2.7 Termodinamički ciklus kod solarne termalne elektrane	317
7.3 Fotonaponski termalni kolektori	319
7.3.1 PV/T vazdušni kolektori.....	321
7.3.2 PV/T kolektori za zagrevanje vode.....	323
7.4 Kućne instalacije hibridnih solarno-termalnih sistema za pripremu sanitarne tople vode	326
7.4.1 Unapređenje instalacije akumulacionog bojlera	327
7.4.2 Unapređenje instalacija veš mašine i mašine za pranje suđa.....	327
7.4.3 Matematički model za proračun bilansa proizvodnje, skladištenja i potrošnje tople vode	328
7.5 Primeri	331
Literatura	334