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 užbenika 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 Zemljinoj 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 fotononaponska 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 poglavnje 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 krakteristiku

fotonaponskih modula 187
5.4.1 Modelovanje delimičnog zasenčenja fotonaponskog modula 187
5.4.2 Diode za premošćavanje 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
5.5.5Tankoslojne monokristalne fotonaponske ćelije i višespojne strukture 200
5.5.6 Fotonaponski moduli sa koncentratorima 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