ELEKTRANE

Čedomir Zeljković
Univerzitet u Banjoj Luci
Elektrotehnički fakultet

UNIVERZITET U BANJOJ LUCI
AKADEMSKA MISAO
Banja Luka - Beograd, 2024.

Тако да се свијетли свјетлост ваша пред људима, да виде ваша добра дјела и прославе Оца вашега који је на небесима.
(Јеванђеље по Матеју 5,16)

PREDGOVOR

Knjiga, koja je pred vama, je zamišljena kao osnovni udžbenik za predmet *Elektrane*, koji se izučava na prvom ciklusu studija Elektrotehničkog fakulteta Univerziteta u Banjoj Luci. Predmet *Elektrane* je uveden 1997. godine, kada je osnovan Odsjek za elektroenergetiku. Prvi nastavnik zadužen na predmetu bio je prof. dr Milenko Đurić, gostujući profesor sa Elektrotehničkog fakulteta u Beogradu. Lično sam, kao asistent na predmetu, bio angažovan od 2006. godine, a profesora Đurića, na mjestu nastavnika, sam zamijenio 2014. godine.

Pišući ovu knjigu umnogome sam se oslanjao na dosadašnji osnovni udžbenik, knjigu „Elektrane" autora Milenka Đurića, Željka Đurišića i Aleksandra Čukarića. Dok su osnovna ideja i program predmeta ostali nepromijenjeni, trudio sam se da osavremenim sve oblasti prikazane u knjizi. Takođe, pripremljeni su numerički ilustrativni primjeri, koji prate teorijsko izlaganje, a posebno su razmotrene i opisane karakteristike elektrana koje se nalaze u Republici Srpskoj.

Prema programu predmeta knjiga se fokusira na fizičke principe u skladu sa kojima se proizvodi energija u klasičnim elektranama (hidroelektranama, parnim termoelektranama, nuklearnim elektranama i gasnim elektranama). U knjizi se, ipak, ne razmatraju neki konstrukcioni i eksploatacioni aspekti elektrana, kao što su npr. sinhroni generator, razvodna postrojenja ili automatsko upravljanje elektranom, koji se detaljno izučavaju u okviru drugih predmeta na fakultetu. Sadržaj knjige je podijeljen u pet poglavlja i dva dodatka.

U uvodnom poglavlju ukratko je opisan razvojni put klasičnih elektrana, od njihovog pronalaska, pa do današnjeg dana. Navedeni su karakteristični momenti iz istorijata elektrana, kako na svjetskom nivou, tako i na teritoriji današnje Bosne i Hercegovine. Identifikovana je aktuelna konfiguracija prenosnog sistema BiH i navedene elektrane koje su priključene na njega.

Drugo poglavlje posvećeno je hidroelektranama, pa se u njemu razmatraju projektni, konstrukcioni i eksploatacioni aspekti ovih proizvodnih postrojenja. Kao ilustrativni primjer hidroelektrane u Republici Srpskoj, detaljno je predstavljena elektrana HE „Bočac I".

U trećem poglavlju razmatra se problematika termoelektrana koje kao radni medijum koriste vodenu paru. Na početku poglavlja izlažu se neophodne osnove termodinamike, a potom se detaljno obrađuju najvažniji elementi termoelektrane. Kao ilustrativni primjer termoelektrane u Republici Srpskoj, opisana je elektrana TE „Stanari".

Nuklearne elektrane su tema četvrtog poglavlja. Prvi dio izlaganja posvećen je principima nuklearnih reakcija i ciklusu nuklearnog goriva, a u drugom se razmatraju tipovi nuklearnih reaktora, njihov princip rada i primjena. NE „Krško", kao nuklearna elektrana najbliža Banjoj Luci, detaljnije je opisana kao ilustrativni primjer iz prakse.

U petom poglavlju govori se o gasnim elektranama. Prvo su razmotreni tipovi i karakteristike gasnih elektrana sa osnovnim Brajtonovim ciklusom, a potom je naglašen značaj elektrana koje rade sa kombinovanim ciklusom i kogeneracijom. Na kraju su prikazani primjeri realizacije savremenih gasnih turbina i mikroturbina.

U prvom dodatku knjige tabelarno su navedeni najvažniji tehnički parametri hidroelektrana u Republici Srpskoj. U drugom dodatku tabelarno i dijagramski prikazane su osnovne termodinamičke karakteristike vazduha i vodene pare, kao medijuma koji se najčešće koriste u gasnim i parnim termoelektranama. Podaci iz ovih dodataka namijenjeni su da pomognu studentima prilikom rješavanja ilustrativnih numeričkih primjera iz ove knjige, te sličnih zadataka iz srodne literature.

Posebnu zahvalnost dugujem dipl. inž. Aleksandru Protiću iz Hidroelektrane „Bočac" i dipl. inž. Zoranu Andriću iz Termoelektrane „Stanari" za tehničku pomoć i mnogobrojne časove terenske nastave, koje su organizovali za naše studente. Kompaniji „EFT – Rudnik i termoelektrana Stanari", na čelu sa direktorom dipl. inž. Savom Mirkovićem, zahvaljujem se na materijalnoj pomoći, značajnoj za štampanje ove knjige. Nuklearnoj elektrani „Krško" izražavam zahvalnost za omogućavanje stručne posjete i dozvolu za objavljivanje autentičnih fotografija. Veliko hvala višem asistentu Bojanu Ercegu, koji je provjerio tačnost svih numeričkih primjera u knjizi i iznio niz korisnih sugestija za unapređenje tehničkog izgleda knjige. Poboljšanju kvaliteta knjige veoma je doprinio i viši asistent Predrag Mršić, koji je takođe uočio niz nedostataka u rukopisu.

Najtoplije se zahvaljujem recenzentima, cijenjenim profesorima Željku Đurišiću sa Elektrotehničkog fakulteta u Beogradu i Petru Matiću sa Elektrotehničkog fakulteta u Banjoj Luci, na pažljivom iščitavanju rukopisa knjige i konstruktivnim primjedbama.

Dragom profesoru Milenku Đuriću, koji je dao nemjerljiv doprinos nastanku i opstanku Katedre za elektroenergetiku na Elektrotehničkom fakultetu u Banjoj Luci, posvećujem ovu knjigu.

U Banjoj Luci, marta 2024. godine

Čedomir Zeljković

SADRŽAJ

PREDGOVOR ..... **V**

SADRŽAJ ..... **VII**

1 UVOD **1**

1.1 ELEKTRANE U SVIJETU KROZ ISTORIJU 1

1.2 POČETAK ELEKTRIFIKACIJE U BIH 5

1.3 PRVE ELEKTRANE U BANJALUČKOJ REGIJI 5

1.4 RAZVOJ ELEKTROENERGETSKOG SISTEMA 7

1.5 ELEKTRANE U DANAŠNJEM ELEKTROENERGETSKOM SISTEMU BIH 9

1.6 ELEKTRANE U REPUBLICI SRPSKOJ 12

2 HIDROELEKTRANE **19**

2.1 TIPOVI HIDROELEKTRANA 21

2.1.1 Podjela hidroelektrana prema snazi 21

2.1.2 Podjela hidroelektrana prema položaju mašinske zgrade 21

2.1.3 Podjela hidroelektrana prema načinu korišćenja 27

2.1.4 Podjela hidroelektrana prema funkciji u EES 30

2.2 TIPOVI BRANA U HIDROELEKTRANAMA 31

2.3 IZBOR POTENCIJALNE LOKACIJE ZA IZGRADNJU HIDROELEKTRANE 33

2.3.1 Raspoloživi dotok vode 33

2.3.2 Mogućnost formiranja akumulacionog jezera 36

2.3.3 Raspoloživi pad 37

2.3.4 Mogućnost izgradnje kaskadnih hidroelektrana 39

2.3.5 Mogućnost izgradnje višestrukih (kombinovanih) akumulacija ... 41

2.3.6 Osvrt na ostale kriterijume za izbor lokacije hidroelektrane 41

2.4 HIDRAULIČKA ENERGIJA VODE 42

2.4.1 Potencijalna energija 43

2.4.2 Kinetička energija 43

2.4.3 Pritisna energija 45

2.4.4 Ukupna hidraulička energija i snaga 45

2.5 ISKORISTIVA ENERGIJA VODOTOKA 46

2.6 JEDINIČNI RAD I SNAGA TURBINE 48

2.7 TIPOVI HIDRAULIČKIH TURBINA 51

2.7.1 Peltonova turbina 52

2.7.2 Frensisova turbina 56

2.7.3 Kaplanova i propelerna turbina 59
2.7.4 Dijagonalna turbina 61
2.7.5 Cijevna turbina 62
2.7.6 Posebni tipovi turbina za male hidroelektrane 64
2.8 SPECIFIČNA BRZINA OBRTANJA TURBINE 67
2.9 EFIKASNOST HIDRAULIČKIH TURBINA 70
2.10 KAVITACIJA HIDRAULIČKIH TURBINA 72
2.11 IZBOR TURBINE 79
2.11.1 Određivanje snage i broja turbina 79
2.11.2 Određivanje tipa turbine 81
2.11.3 Izbor turbine u zavisnosti od brzine obrtanja 82
2.11.4 Izbor turbine u zavisnosti od pojave kavitacije 84
2.12 EKSPLOATACIONI ASPEKTI HIDROELEKTRANE 84
2.12.1 Pokretanje agregata 84
2.12.2 Zaustavljanje agregata 85
2.12.3 Regulacija snage i učestanosti 85
2.12.4 Regulacija napona 87
2.12.5 Izbjegavanje nepovoljnih i nedozvoljenih režima rada 88
2.12.6 Raspolaganje količinom vode u akumulacionom jezeru 89
2.12.7 Zbirni stepen iskorišćenja hidroelektrane 92
2.12.8 Faktor kapaciteta 93
2.13 PRIMJER REALNE HIDROELEKTRANE: HE „BOČAC I" 95
2.13.1 Položaj elektrane i akumulacionog jezera 95
2.13.2 Podužni presjek i osnovni elementi elektrane 97
2.13.3 Hidromehanička oprema 98
2.13.4 Agregati 98
2.13.5 Veza generatora sa pripadajućom opremom 99
2.13.6 Pobudni sistem 101
2.13.7 Eksploatacioni aspekti 103
2.13.8 Pomoćni sistemi u elektrani 104
3 TERMOELEKTRANE 107
3.1 OSNOVNI POJMOVI TERMODINAMIKE 108
3.1.1 Jednačina stanja idealnog gasa 109
3.1.2 Energetska jednačina 111
3.1.3 Unutrašnja energija 111
3.1.4 Entalpija 113
3.1.5 Entropija 115

3.2 TERMODINAMIČKI PROCESI ... 116
3.2.1 Izohorski proces ... 117
3.2.2 Izobarski proces ... 119
3.2.3 Izotermički proces ... 120
3.2.4 Adijabatski proces ... 122
3.3 TERMODINAMIČKI PROCESI U OTVORENIM SISTEMIMA ... 125
3.4 TERMODINAMIČKI CIKLUSI ... 127
3.5 KARNOOV TERMODINAMIČKI CIKLUS ... 130
3.6 VODENA PARA KAO RADNI MEDIJUM ... 133
3.7 KARNOOV TERMODINAMIČKI CIKLUS SA VLAŽNOM PAROM ... 138
3.8 RENKINOV TERMODINAMIČKI CIKLUS SA PREGRIJANOM PAROM ... 140
3.8.1 Poboljšanje efikasnosti Renkinovog ciklusa ... 145
3.8.2 Međupregrijavanje pare ... 150
3.8.3 Regenerativno zagrijavanje napojne vode ... 155
3.8.4 Toplotna šema realne termoelektrane ... 161
3.8.5 Realni Renkinov ciklus sa uvažavanjem gubitaka ... 163
3.9 ZBIRNI STEPEN ISKORIŠĆENJA PARNE TERMOELEKTRANE ... 166
3.10 RENKINOV KOGENERATIVNI CIKLUS ... 168
3.11 UGALJ KAO GORIVO U PARNIM TERMOELEKTRANAMA ... 170
3.11.1 Neposredna analiza uglja ... 171
3.11.2 Elementarna analiza uglja ... 172
3.11.3 Toplotna moć uglja ... 173
3.11.4 Ugalj u Republici Srpskoj ... 175
3.12 OSNOVNI ELEMENTI TERMOELEKTRANE ... 176
3.12.1 Iskopavanje i transport uglja ... 176
3.12.2 Parni kotao (generator pare) ... 178
3.12.3 Tehnologije sagorijevanja uglja ... 180
3.12.4 Zagrijač napojne vode (ekonomajzer) ... 185
3.12.5 Zagrijač vazduha ... 185
3.12.6 Otklanjanje čvrstih čestica iz dimnih gasova ... 185
3.12.7 Smanjenje emisije štetnih gasova ... 188
3.12.8 Odlaganje pepela i šljake ... 190
3.12.9 Priprema napojne vode ... 191
3.12.10 Kondenzator ... 192
3.12.11 Regenerativni zagrijači napojne vode ... 196
3.12.12 Deareator ... 197
3.12.13 Parna turbina ... 199
3.12.14 Regulacija snage parnih turbina ... 207
3.12.15 Sinhroni generator u termoelektrani ... 208

3.13 Karakteristični režimi rada termoelektrane 209
3.14 Primjer realne termoelektrane: TE „Stanari" 211
3.14.1 Linija (doprema) uglja 214
3.14.2 Linija vode (pare) 216
3.14.3 Linija električne energije 218
3.15 Solarne termoelektrane 219

4 NUKLEARNE ELEKTRANE 223
4.1 Nuklearne reakcije 225
4.1.1 Nuklearna fisija 225
4.1.2 Oplodne nuklearne reakcije 229
4.1.3 Nuklearna fuzija 230
4.2 Ciklus nuklearnog goriva 230
4.3 Nuklearni reaktori 232
4.4 Osnovni tipovi nuklearnih reaktora 235
4.4.1 Reaktor sa ključalom vodom (BWR) 236
4.4.2 Reaktor sa vodom pod pritiskom (PWR) 238
4.4.3 Reaktor sa teškom vodom pod pritiskom (PHWR) 240
4.4.4 Reaktori hlađeni gasom (GCR i AGR) 241
4.4.5 Reaktor sa brzim neutronima (FNR) 242
4.5 Nenuklearni dio elektrane 244
4.6 Termodinamički ciklus nuklearne elektrane 245
4.7 Primjer realne nuklearne elektrane: NE „Krško" 248
4.7.1 Primarna kontura elektrane 250
4.7.2 Sekundarna kontura elektrane 251
4.7.3 Tercijarna (rashladna) kontura elektrane 252
4.7.4 Eksploatacione karakteristike NE „Krško" 253

5 GASNE ELEKTRANE 255
5.1 Prirodni gas kao gorivo 256
5.2 Termodinamičke karakteristike vazduha 258
5.3 Idealizovani termodinamički ciklus gasne elektrane 261
5.3.1 Gasna elektrana sa zatvorenim ciklusom 261
5.3.2 Gasna elektrana sa otvorenim ciklusom 263
5.3.3 Stepen iskorišćenja gasne elektrane 264
5.4 Termodinamički ciklus realne gasne elektrane 267
5.5 Moguća poboljšanja Brajtonovog ciklusa 272
5.5.1 Rekuperativno zagrijavanje vazduha 272
5.5.2 Višestepena kompresija i ekspanzija 274

5.6 GASNE ELEKTRANE SA SKLADIŠTEM VAZDUHA POD PRITISKOM 277
5.7 ELEKTRANE SA KOMBINOVANIM CIKLUSOM I KOGENERACIJOM 278
5.8 PRAKTIČNA REALIZACIJA GASNIH TURBINA 279
5.9 GASNE MIKROTURBINE 281
LITERATURA 285
DODATAK A: HIDROELEKTRANE U REPUBLICI SRPSKOJ 289
DODATAK B: TERMODINAMIČKE KARAKTERISTIKE 297
INDEKS 303

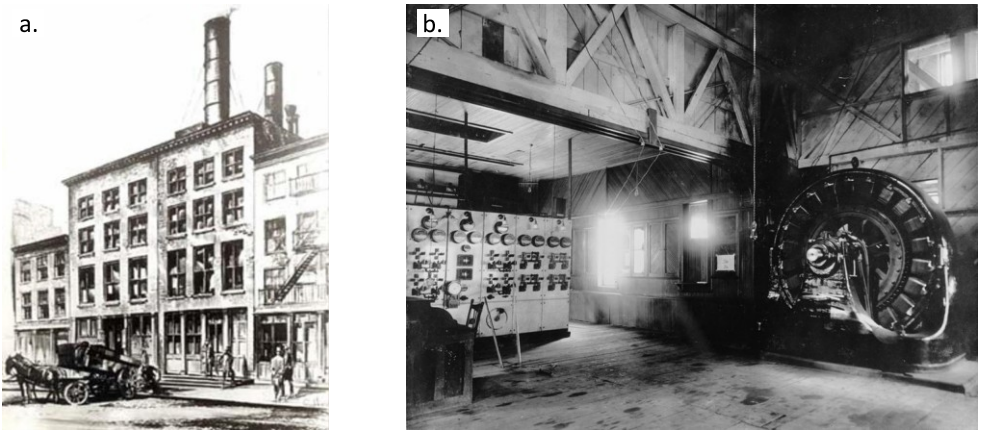
1 UVOD

Elektrane su postrojenja u kojima se energija iz nekog primarnog vida pretvara u električnu energiju. Izvori primarne energije koji se najčešće eksploatišu u elektranama su fosilna goriva (ugalj, gas, nafta), fisilni materijali (uranijum, plutonijum), voda (riječni tokovi, morski talasi, plima i oseka), vjetar, zračenje Sunca i biomasa. U ovoj knjizi obrađuju se fizičke osnove klasičnih elektrana u koje ubrajamo hidroelektrane, parne termoelektrane, nuklearne elektrane i gasne elektrane.

1.1 Elektrane u svijetu kroz istoriju

Mogućnost za izgradnju prvih elektrana otvorila je realizacija električnog generatora jednosmjerne struje 1871. godine od strane Zenoba Grama (*Zénobe Théophile Gramme*, 1826–1901). U decenijama koje su uslijedile, električni generatori upotrijebljeni su za napajanje različitih potrošača, uglavnom osvjetljenja. Kao prva hidroelektrana najčešće se navodi projekat Vilijama Armstronga iz 1878. godine kojim je u svojoj umjetničkoj galeriji u kući u Kregsajdu u Engleskoj realizovao napajanje jedne elektrolučne svjetiljke. Prvom pravom komercijalnom elektranom u svijetu smatra se Edisonova termoelektrana na ugalj, koja je izgrađena 1882. godine na adresi *Pearl Street* 255−257 u Finansijskom distriktu grada Njujorka. Spoljašnjost ove elektrane prikazana je na slici 1.1a. Edisonova elektrana je u prvoj verziji imala šest mašina jednosmjerne struje, instalisane snage od po 100 kW, a napajala je 82 korisnika sa ukupno 400 svjetiljki. Za prenos energije korišćen je jednosmjerni napon 110 V, pa su vodovi bili relativno kratki, a gubici u prenosu znatni. Pobjeda Teslinog sistema naizmjenične struje u tzv. *ratu struja* omogućila je jednostavnu transformaciju napona pomoću transformatora i prenos energije na znatno veće daljine, te je dala novi zamah intenziviranju elektrifikacije. Prvom komercijalnom elektranom, koja je radila na naizmjeničnoj struji, smatra se hidroelektrana koju je sagradila kompanija *Westinghouse Electric* u naselju Ejps u Koloradu 1891. godine. Ova hidroelektrana napajala je rudnik zlata, od kojeg je bila udaljena oko četiri kilometra. Jednofazni generator snage

75 kW, radio je na nominalnom naponu 3 kV i na nominalnoj učestanosti 133 Hz, a za pogon generatora korišćena je Peltonova turbina, pri padu od 98 metara. Unutrašnjost mašinske hale ove elektrane prikazana je na slici 1.1b.



SLIKA 1.1

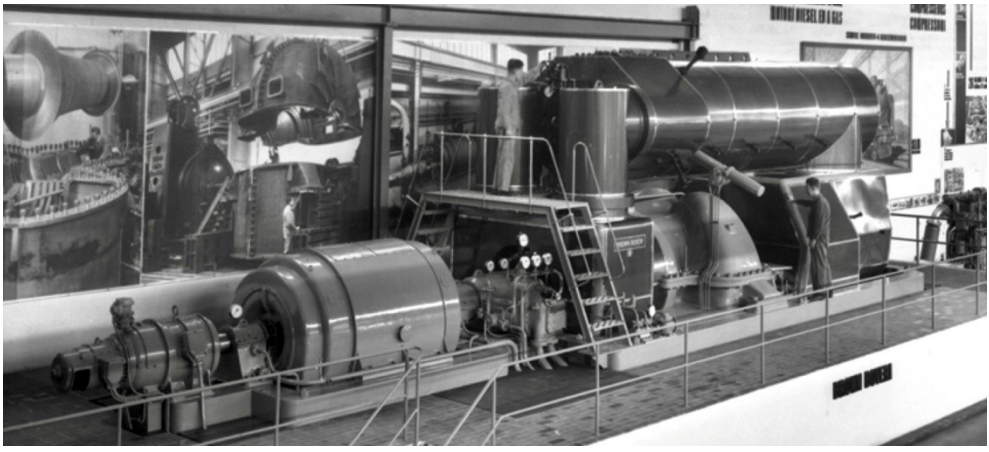
Prve komercijalne elektrane jednosmjerne i naizmjenične struje: (a) Edisonova termoelektrana iz 1882. godine i (b) Vestinghausova hidroelektrana iz 1891. godine

U prvoj polovini XX vijeka dolazi do značajnog povećanja broja hidroelektrana i termoelektrana izgrađenih širom svijeta. Ovaj period karakteriše ubrzan industrijski razvoj, te elektrane postaju ključni faktor za zadovoljavanje rastuće potražnje za energijom. Instalisana snaga elektrana se povećava kao i njihova udaljenost od centara potrošnje. Tome svakako pomaže ekspanzija elektroenergetske mreže i sve veći naponi prenosnih dalekovoda.

Prva gasna elektrana za komercijalnu upotrebu predstavljena je 1939. godine od strane švajcarske kompanije BBC (*Brown, Boveri & Cie*). Fotografija ove elektrane prikazana je na slici 1.2. Turbina u elektrani je izgrađena sa sedam stupnjeva, a kao gorivo korišćen je dizel. Kao neophodnu pomoćnu komponentu, turbina je pogonila kompresor sačinjen od 23 stupnja. Generator je imao nominalnu snagu od 4 MW, a ukupni stepen iskorišćenja elektrane bio je za današnje standarde skromnih 17,38%. Ova elektrana je korišćena kao rezervni izvor napajanja u Nešatelu, u Švajcarskoj, sve do 2002. godine, kada je rasformirana i pretvorena u muzejski eksponat.

Osnovu za razvoj nuklearnih elektrana predstavljali su vojni programi usmjereni ka stvaranju atomske bombe. Realizacijom prvog eksperimentalnog nuklearnog reaktora *Chicago Pile-1* u okviru američkog *Manhattan* projekta,

krajem 1942. godine, pokazano je da se kontrolisani proces fisije može iskoristiti za proizvodnju energije. Prvi reaktor koji je upotrijebljen za proizvodnju električne energije bio je eksperimentalni reaktor američke nacionalne laboratorije *Argonne* koji je testiran 1951. godine. Prva nuklearna elektrana koja je spojena na elektroenergetsku mrežu bila je sovjetska elektrana snage 5 MW, izgrađena u mjestu Obninsk. Ubrzo za njom se pojavljuju i nuklearne elektrane veće snage: britanska elektrana *Calder Hall* snage 50 MW izgrađena 1956. godine na bazi reaktora hlađenog gasom (GCR) i američka elektrana *Shippingport* snage 60 MW izgrađena 1957. godine na bazi reaktora sa vodom pod pritiskom (PWR).



SLIKA 1.2

Gasna elektrana iz Nešatela izgrađena 1939. godine

Krajem XX vijeka, stotinu godina nakon početka elektrifikacije, okosnicu proizvodnje električne energije u svijetu činile su klasične elektrane (hidroelektrane, termoelektrane, gasne elektrane i nuklearne elektrane). U posljednje vrijeme, a posebno od početka XXI vijeka, raste svijest o klimatskim promjenama, te se javlja potreba za smanjenjem emisije gasova staklene bašte i težnja ka ekološkoj održivosti. Sve više zemalja usvaja zakonsku regulativu i formira podsticajne mehanizme za povećanje udjela obnovljivih izvora u proizvodnji električne energije. Kao rezultat preduzetih mjera, došlo je do tehnološkog napretka i smanjenja cijene elektrana koje koriste obnovljive izvore, posebno kod vjetroelektrana i solarnih fotonaponskih elektrana.

Procjenjuje se da danas u svijetu radi preko 62 500 elektrana. Iako je trend rasta instalisane snage obnovljivih izvora intenzivan u posljednjim godinama, mora se reći da se još uvijek većina energije proizvodi u klasičnim elektranama. Prema