

**SVEUČILIŠTE U SPLITU
FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, STROJARSTVA I
BRODOGRADNJE**

**POSLIJEDIPLOMSKI DOKTORSKI STUDIJI
STROJARSTVA**

KVALIFIKACIJSKI ISPIT

**DIMENZIONIRANJE I STRATEGIJE
UPRAVLJANJA ENERGIJOM HIBRIDNIH
SAMOODRŽIVIH ENERGETSKIH SUSTAVA**

Jakov Šimunović

Split, srpanj 2021.

Kvalifikacijski doktorski rad je izrađen na Katedri za toplinske strojeve, Zavoda za strojarstvo i brodogradnju, Fakulteta elektrotehnike, strojarstva i brodogradnje, Sveučilišta u Splitu.

Mentor: prof.dr.sc. Gojmir Radica

SADRŽAJ

1. UVOD	1
2. MODELIRANJE HES	4
3. DIMENZIONIRANJE HES.....	7
3.1. Izravna metoda dimenzioniranja	7
3.2. Dimenzioniranje pretraživanjem zadanog polja	7
3.3. Dimenzioniranje programskim alatima	8
3.4. Dimenzioniranje algoritmima umjetne inteligencije	9
3.5. Pregled istraživanja.....	11
4. STRATEGIJE UPRAVLJANJA ENERGIJOM UNUTAR HES.....	17
4.1. Pregled istraživanja.....	19
5. ZAKLJUČAK	27
LITERATURA.....	28
POPIS OZNAKA I KRATICA	33
Kratice	33
Oznake	34
SAŽETAK.....	38

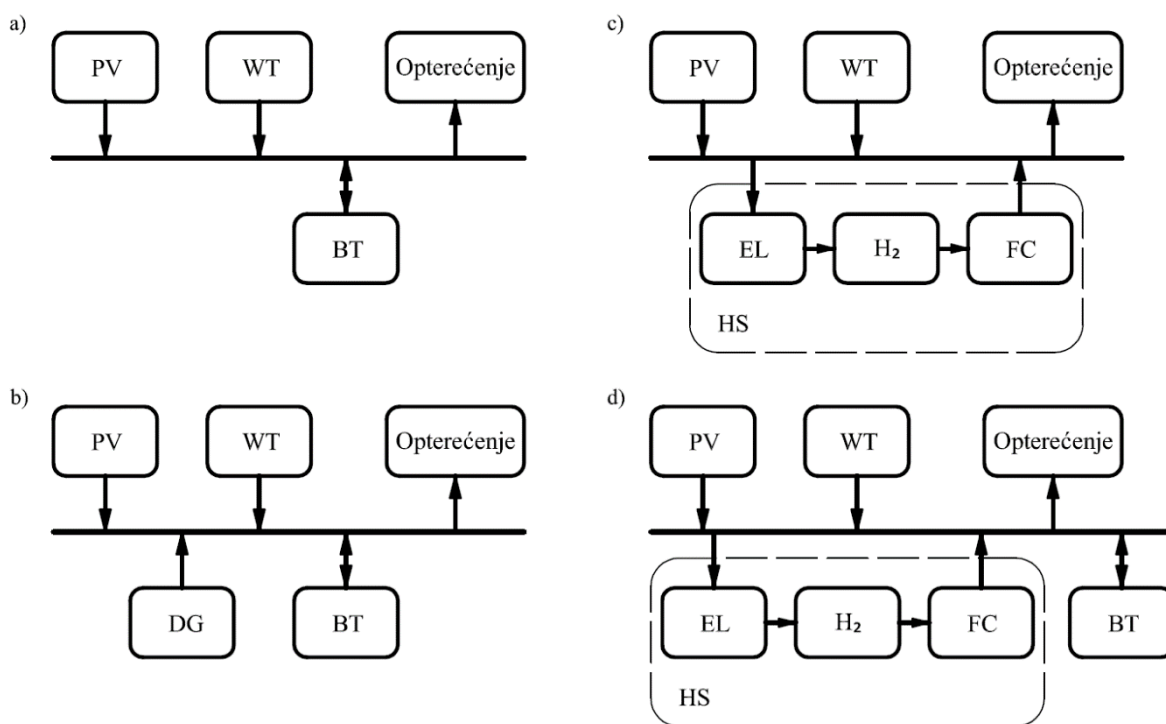
1. UVOD

Energetski sustavi se mogu dijeliti prema konfiguracijama sastavnih elemenata sustava, te prema tome da li je sustav spojen na energetska mrežu. Energetski sustavi koji se koriste jednim oblikom obnovljivih izvora energije, najčešće solarna energija, bez sustava za skladištenje energije su najčešće korištena konfiguracija od strane malih proizvođača energije i to u svrhu prodaje proizvedene električne energije za ostvarivanje profita. Postepena komercijalizacija obnovljivih izvora energije, s naglaskom na solarnu energiju, dovela je do pada tržišnih cijena fotonaponskih modula (*engl. Photovoltaic module, PV*) od 75% u posljednjih deset godina [1]. Pristupačne cijene i jednostavna ugradnja rezultirala je porastom broja ugrađenih PV sustava spojenih na mrežu, isključivo u svrhu proizvodnje električne energije. S druge strane, cijene malih i srednjih vjetroturbina (*engl. Wind Turbine, WT*) su još uvijek visoke [1], te uz visoke cijene transporta i ugradnje [2] nisu se pokazale isplative za isključivo prodaju proizvedene električne energije.

Hibridni energetski sustav u sprezi s obnovljivim izvorima energije, koji osim proizvodnog kapaciteta imaju ugrađen i skladišta energije, te su spojeni na energetska mrežu su također predmet istraživanja [3–5]. Takvim sustavima su glavni ciljevi opskrba energijom krajnjeg korisnika, te smanjenje cijene korištene električne energije. Energetska mreža se u takvim slučajevima koristi kao skladište ili izvor električne energije u nuždi.

Samoodrživi hibridni energetski sustavi u sprezi s obnovljivim izvorima energije (HES) se najčešće koriste u ruralnim sredinama, gdje nema pristupa energetska mreži, ili u slučajevima kad je dovođenje energetske mreže ekonomski ne isplativo, kao na primjer u svrhu napajanja telekomunikacijske stanice. Pošto je HES odvojen od energetske mreže, kao takav je u potpunosti odgovoran za uspješno zadovoljavanje potreba krajnjeg opterećenja. Osnovni problemi HES su vezani za samu pouzdanost sustava, s aspekta dostupnosti energije kada je potrebna. Energija vjetra može biti dostupna u svako doba dana i noći, ali je također nepredvidljiva, te može imati velike oscilacije u kratkom vremenskom periodu [6]. S druge strane, solarna energija je lakša za predvidjeti, ali nedostatak solarne energije tokom noći, te u ranim jutarnjim i kasnim popodnevnim satima, može uzrokovati nedostatak energije u sustavu. Zbog tako visoke isprekidanosti proizvodnje energije iz PV i WT, skladište energije je neophodno unutar HES kako bi se postigla bolja pouzdanost opskrbe energije krajnjeg opterećenja. Olovno-kiselinske baterije (BT) su tradicionalno najčešće korištena skladišta energije unutar HES, te su još uvijek najučinkovitiji način kratkoročnog skladištenja energije,

slika 1.1a. Neki od glavnih razloga za korištenje BT su visoka sveukupna učinkovitost, jednostavna ugradnja, te niska razina održavanja [7]. Međutim, niska gustoća skladištenja energije kod BT može predstavljati problem, na način da se tražena pouzdanost sustava može postići samo s visokim vrijednostima kapaciteta BT. Diesel generatori (DG) su često korišteni uz BT kao dodatan izvor energije unutar HES [8–10], slika 1.1b. Osnovni problemi korištenja DG su emisije ugljikovog dioksida, održavanje, te potreba za nadopunjavanjem goriva, ali relativno niske cijene goriva ih čine ekonomski opravdanim za korištenje unutar HES.



Slika 1.1. Različite konfiguracije HES

Osim BT, za skladištenje energije unutar HES se također koristi i vodikov podsustav (*engl. Hydrogen System*, HS) sastavljen od elektrolizatora (EL) za proizvodnju vodika, skladišta vodika, te gorivnih članaka (*engl. Fuel Cell*, FC) za dobivanje električne energije iz vodika. Posljednjih godina se najčešće, kao sastavni dijelovi HS, razmatraju i koriste EL i FC s polimernim membranama (*engl. Polymer Electrolyte Membrane* ili *Proton Exchange Membrane*, PEM) [11–15]. PEM EL i FC imaju dobar odaziv na brze promjene opterećenja, što ih čini izuzetno pogodnima za rad u kombinaciji s isprekidanim i promjenjivim obnovljivim izvorima energije [16, 17]. Za razliku od BT, HS postiže visoku gustoću skladištenja energije, a povećanjem tlaka skladištenja moguće je izvršiti skladištenje jako visoke količine vodika, te je kao takav odličan za dugoročno ili sezonsko skladištenje energije. Glavni nedostatak HS je,

u odnosu na BT, niska sveukupna učinkovitost. Autori [11–15] su istraživali korištenje HS kao jedini oblik skladištenja energije unutar HES, slika 1.1c.

Bilal i ostali [18] su pokazali kako problem promjenjive i isprekidane prirode energije vjetra i sunca može biti ublažen kombinacijom istih. HES koji koriste PV/WT kombinaciju mogu značajno smanjiti potrebe za skladištenjem energije. PV/WT kombinaciju za HES istražuju Koutroulis i ostali [19], a rezultati istraživanja su pokazali da su HES, koji koriste PV/WT kombinaciju za proizvodnju električne energije, ekonomski isplativiji u odnosu na sustave koji koriste samo jedan izvor energije. Autori u [20] su prikazali kako se kombinacijom PV i WT za proizvodnju energije, te kombinacijom BT i HS skladišta energije uspijeva smanjiti djelovanje intenziteta promjenjivosti i isprekidanosti proizvedene energije na HES. Li i ostali [21] uspoređuju tri različite konfiguracije HES: PV/BT; PV/HS; PV/BT/HS. Rezultati su pokazali da se korištenjem kombinacije BT/HS skladištenja energije postiže bolja energetska učinkovitost sustava i niži kapitalni troškovi, u usporedbi sa HES koji koriste samo BT ili HS kao skladište energije.

Ovisno o potrebama krajnjeg korisnika, opterećenje HES ne mora nužno biti električna energija, pa je jedan takav HES, korišten isključivo za proizvodnju vodika, istraživani u [22].

2. MODELIRANJE HES

Svaka kvalitetna analiza HES kreće od dobro postavljenih matematičkih modela, kojima se nastoje što bolje opisati radne karakteristike svih komponenata razmatrane konfiguracije sustava. U literaturi su za različite konfiguracije korištene i predlagane različite kombinacije matematičkih modela razmatranih komponenata sustava, tablica 2.1.

Mnogi autori koriste programski paket MATLAB za implementaciju matematičkih modela istraživanih konfiguracija HES, kako bi proveli simulacije rada istih [11, 15, 23–30]. U literaturi se također koriste komercijalni programski alati za simuliranje rada HES, koji u svojim bibliotekama sadrže modele spremne na korištenje. Jedan od takvih programskih alata je TRNSYS. TRNSYS (*engl. Transient System Simulation Tool*) je fleksibilno grafičko sučelje modularne strukture, primarno korišteno u području obnovljivih izvora energije u svrhu simuliranja energetske sustava [31, 32]. Iako je TRNSYS uglavnom usmjeren na procjene izvedbi energetske sustava, sučelje se također može koristiti i za modeliranje drugih dinamičkih procesa. Standardna biblioteka sadržava približno 150 matematičkih modela različitih komponenata [31, 32], koji su otvorenog tipa, pa su tako korisniku omogućene izmjene ili nadogradnja postojećih modela ili dodavanje potpuno novih modela. TRNSYS-ova baza podataka također uključuje ulazne podatke o Sunčevu zračenju i brzinama vjetrova za lokacije širom svijeta. TRNSYS je korišten u svrhu simulacije HES u [6, 33, 34].

Za simuliranje rada HES se također koriste i druga komercijalna sučelja, kako što su HOMER [1, 35, 36] i HOGA, o kojima će biti više rečeno u nastavku.

U literaturi su razmatrani različiti vremenski periodi za simuliranje rada HES, a najčešće je razmatran vremenski period od jedne godine i jednosatnu rezoluciju [13, 21, 24, 34, 37–40]. U [6] simulacije su izvršene za vremenski period od jedne godine i korak od 15 sekunda. Dash i Bajpai [25] simuliraju rad sustava na vremenski period od 24 i 48 sati u ljetnoj sezoni. Dvadeset i četiri satne simulacije su izvršene u [15, 28], s korakom od jednog sata u [15] i jedne minute u [28]. Autori u [41, 42] su izvršili simulacije za vremenski period od četiri tjedna, rezolucija jedan sat, gdje svaki simulirani tjedan predstavlja jedno godišnje doba. U [43, 44] su izvršene simulacije na vremenski period od četiri mjeseca, a u [26, 27, 29, 30] je razmatrano 25 godina, uz korak od jednog sata.

Tablica 2.1. Pregled korištenih matematičkih modela

Komponenta	Model	Literatura
PV modul	$I_{PV} = I_L - I_0 \left[\exp\left(\frac{U_{PV} + I_{PV}R_S}{a}\right) - 1 \right] - \frac{U_{PV} + I_{PV}R_S}{R_{Sh}}$	(2.1) [21, 24, 29, 30, 43, 45–50]
	$U_{PV} = a \cdot \ln \left[\frac{(I_L - I_{PV})R_{Sh} - U_{PV} - I_{PV}R_S}{I_0 R_{Sh}} + 1 \right] - I_{PV}R_S$	
	$P_{PV} = P_{PV,n} \cdot f_{PV} \cdot \frac{E_\beta}{E_{st}} \cdot [1 + \mu_{Psc}(T_c - T_{c,st})]$	(2.2) [12, 37, 39, 40]
	$P_{PV} = P_{PV,n} \cdot f_{PV} \cdot \frac{E_\beta}{E_{st}}$	(2.3) [6, 11]
	$P_{PV} = E_\beta \cdot A_{PV} \cdot \eta_{PV}$	(2.4) [13, 26, 51]
Vjetroturbina	$P_{WT} = \frac{1}{2} \rho_a A_{WT} v_i^3 C_p(\lambda, \theta)$	(2.5) [13, 14, 29, 37, 40, 43, 45, 46, 49–53]
	$P_{WT} = \begin{cases} 0 & , v_i < v_{ul} \\ \frac{1}{2} \rho_a A_{WT} v_i^3 C_p & , v_{ul} < v_i < v_n \\ P_{WT,n} & , v_n < v_i < v_{iz} \\ 0 & , v_{iz} < v_i \end{cases}$	
Gorivni članak	$P_{FC} = \dot{m}_{H_2} \cdot HHV \cdot \eta_{FC} \quad ; \quad \eta_{FC} = \text{konstanta}$	(2.6) [45, 11]
	$U_{FC} = U_t - b \log\left(\frac{i}{i_0}\right) - \frac{RT}{nF} \ln\left(\frac{i_L}{i_L - i}\right) - iR_i$	(2.7) [12, 14, 21, 24, 29, 39, 41, 43, 47]
Elektrolizator	$P_{EL} = \frac{\dot{m}_{H_2} \cdot HHV}{\eta_{EL}} \quad ; \quad \eta_{EL} = \text{konstanta}$	(2.8) [11, 12, 45]
	$\dot{n}_{H_2} = \frac{\eta_{FC} n_c I_{EL}}{2F}$	(2.9) [21, 24, 29, 41, 43, 48]
	$U_{EL} = U_{oc} + \frac{RT}{nF} \ln\left(\frac{i}{i_0}\right) + iR_i$	(2.10) [14, 39]
H ₂ skladište	$m_{H_2}(t) = m_{H_2}(t_0) \pm m_{H_2}(\Delta t)$	(2.11) [6, 11, 13, 26, 45, 51, 52, 54, 55]
	$p_{H_2} = \frac{m_{H_2} \bar{R} T}{V_n}$	(2.12) [21, 24]
	$p_{H_2} = \frac{m_{H_2} \bar{R} T}{V_n} \cdot z(p, T)$	(2.13) [56]
	$p_{H_2} = \frac{m_{H_2} \bar{R} T}{V_n - m_{H_2} b_{vdw}} - a_{vdw} \frac{m_{H_2}}{V_n^2}$	(2.14) [41, 43]
	$p_{H_2} = \frac{\bar{n}_{H_2}^2 \bar{R} T}{V_n^2} \left(1 - \frac{\bar{n}_{H_2} c_{BB}}{V_n T^3}\right) \left[\frac{V_n}{\bar{n}_{H_2}} + B_{BB}\right] - \frac{A_{BB}}{V_n^2}$	(2.15) [48]
	$A_{BB} = A_{0, BB} \left(1 - \frac{\bar{n}_{H_2} a_{BB}}{V_n}\right)$	
	$B_{BB} = B_{0, BB} \left(1 - \frac{\bar{n}_{H_2} b_{BB}}{V_n}\right)$	
Baterija	$SOC(t) = \left[1 - \frac{\int_0^t I_{BT}(t) dt}{C_{BT,n}}\right] \cdot 100\%$	(2.16) [24, 26, 29, 37, 48, 49]
	$SOC(t) = (1 - \gamma_{BT}) \cdot SOC(t_0) - \left(\frac{\int_{t_0}^t I_{BT}(t) dt}{C_{BT,n}}\right) \cdot 100\%$	(2.17) [41, 43, 47]

Mnogi autori postavljaju rubne uvjete dubine pražnjenja BT ili granicu do koje se može izvršiti punjenje u svrhu zaštite BT od ubrzane degradacije [24, 25, 28, 33, 34, 43, 44]. Za FC i EL se postavljaju uvjeti raspona radnih točaka, za koje se smatra da se postiže siguran rad EL i FC [33, 43, 44]. Međutim, osim što postavljaju rubne uvjete rada komponenata sustava, u literaturi se rijetko pronalaze istraživanja gdje se koriste modeli degradacije elemenata sustava, te se ne provode analize utjecaja degradacije elemenata na rad HES.

Garcia i ostali [26] proces degradacije BT prate brojanjem ciklusa punjenja i pražnjenja. Međutim, ovom metodom uspijevaju samo odrediti trenutak zamjene BT, ali ne i pad kapaciteta uslijed degradacije. Na sličan način se prati degradacija FC, gdje se prati broj radnih sati i cikluse uključivanja i isključivanja, pa se degradacija računa kao pad napona radne karakteristike od 0.54 mV po radnom satu FC. Degradacija EL se prati preko učinkovitosti EL, pa se tako za svaki radni sat EL smanjuje njegova učinkovitost, u ovisnosti o koeficijentu pada učinkovitosti EL za jedan radni sat. Autori ne navode korištenu vrijednost koeficijenta.

3. DIMENZIONIRANJE HES

Dimenzioniranje HES je složen problem, jer ovisi o poznavanju vremenskih uvjeta, profilu opterećenja, tehničkim specifikacijama i uvjetima okoline za koju se vrši dimenzioniranje sustava. Ako se na sve to još dodaju i parametri strategije upravljanja energijom unutar sustava, problem dizajniranja, dimenzioniranja i analize HES postaje još složeniji [50]. Pravilno dimenzioniranje HES je neophodno za pravilan rad sustava. Predimenzionirane komponente sustava će nepotrebno povećati troškove sustava, te se mogu dogoditi nepotrebni viškovi ne iskorištene energije, dok će poddimenzioniran sustav uzrokovati nedostatak energije i prekid rada sustava. Istraživanja na temu dimenzioniranja i optimiranja različitih konfiguracija HES su izvršena za razne lokacije i rubne uvjete [50, 57–60].

Metode dimenzioniranja HES se mogu podijeliti u četiri grupe: izravno dimenzioniranje; dimenzioniranje pretraživanjem zadanog polja; dimenzioniranje korištenjem programskih alata; dimenzioniranje optimizacijom algoritmima umjetne inteligencije (*engl. Artificial Intelligence, AI*).

3.1. Izravna metoda dimenzioniranja

Izravnom metodom dimenzioniranja se jednostavno, uz poznavanje opterećenja i resursa obnovljivih izvora energije, može doći do brzog rješenja kapaciteta svih komponenata sustava, kako što je prezentirano u [14]. Neki autori imaju pristup rješavanja problema preko koeficijenta iskorištenja kapaciteta [6, 23], dok neki autori, uz opterećenje i radne karakteristike komponenata, uzimaju u obzir i parametre logike upravljanja HES [33]. Prednost izravnih metoda dimenzioniranja su jednostavnost i brzo dobivanje rješenja traženih kapaciteta. Glavni nedostatak ove metode je što se ne može u potpunosti obuhvatiti problem povezivanja parametara nepredvidljivosti obnovljivih izvora energije, profila opterećenja i radnih karakteristika svih komponenata.

3.2. Dimenzioniranje pretraživanjem zadanog polja

Dimenzioniranje pretraživanjem zadanog polja (PP) je jednostavna metoda koja se postavlja tako da se zada područje pretraživanja kapaciteta svake komponente HES, te se prema zadanom koraku promjene pojedinog kapaciteta vrše simulacije za sve moguće kombinacije, pa se prema postavljenom kriteriju bira najbolje rješenje [12, 53]. Nedostaci ove metode dimenzioniranja su

što najbolje dobiveno rješenje nije nužno i optimalno rješenje sustava, te što ovisno o broju kombinacija proces pretraživanja može bit jako dugotrajan.

3.3. Dimenzioniranje programskim alatima

Trenutno je dostupno nekoliko komercijalnih programskih alata za dimenzioniranje i simuliranje HES, od kojih su najčešće korišteni HOMER i HOGA [50, 57, 59, 61].

HOMER (*engl. Hybrid Optimization of Multiple Electric Renewables*) je sučelje koje omogućava dimenzioniranje i simuliranje rada HES [50, 59, 62]. U osnovi, HOMER je softver za simuliranje rada HES, pa tako može izvršiti simulaciju rada stotine ili tisuće HES, u ovisnosti o načinu postavljenja problema. Simulacije se vrše na razmatrani vremenski period od jedne godine, u vremenskim koracima od jedne minute do jednog sata [62]. Baza podataka sadrži široki spektar komercijalnih proizvoda sa svim pripadajućim radnim karakteristikama, te ulazne podatke Sunčevog zračenja i brzina vjetra za lokacije širom svijeta. HOMER je jedan od najkorištenijih komercijalnih simulatora, a razlog tome su jednostavnost korištenja i mogućnost usporedbe niza različitih rješenja [50, 59]. Funkcija cilja optimizacije je ekonomskog tipa, minimalizacija neto troška sustava [61].

HOMER je korišten za simulaciju i optimizaciju raznih konfiguracija HES u [1, 35], a u [6, 23] je uspoređivan s drugim metodama dimenzioniranja sustava. Lacko i ostali [36] korištenjem Homera traži izvedivo rješenje HES, za kućanstvo na udaljenoj lokaciji bez pristupa energetske mreže u Sloveniji.

Nedostatak HOMER-a je što se optimizacija sustava vrši samo za funkciju cilja minimalnog neto troška sustava, kao i nedostatak preciznijih modela degradacije, prvenstveno BT. Isto tako, sučelje nije dovoljno intuitivno, te ne dopušta korisniku da vrši izmjene na postojećim modelima.

HOGA (*engl. Hybrid Optimization by Genetic Algorithms*) je sučelje za simulaciju i optimizaciju HES. Sučelje uključuje simulator na vremenski korak do jedne minute, s bibliotekom modela radnih karakteristika i mehanizama degradacije raznih elemenata, te višeciljnu GA optimizaciju [59, 61, 63]. Posebno se ističe model degradacije kapaciteta BT. HOGA također omogućava provođenje analize osjetljivosti, analizu vjerojatnosti, te mogućnost primjene različitih strategija upravljanja energijom [61, 63]. HOGA je pogodna za simuliranje sustava visokih i niskih nazivnih snaga, te može simulirati i optimizirati HES i sustave spojene na energetska mrežu.

U literaturi se u svrhu dimenzioniranja HES navodi korištenje SDO [23, 24, 26, 27, 29, 30]. SDO (*engl. Simulink Design Optimization*) je dio MATLAB programskog paketa, kojim se vrši simuliranje i optimizacija sustava. SDO pruža razne funkcije, interaktivne alate, blokove za provođenje analiza i podešavanje parametara, te može vršiti analizu osjetljivosti [64]. Moguće je korištenje stohastičkih metoda, kao što je Monte Carlo, ili evolucijskih algoritama, kao što je GA [23, 64]. Optimizacija kojom se vrši dimenzioniranje je s tehničkom funkcijom cilja, pa se stoga ekonomski aspekt HES ne uzima u obzir, što je ujedno i najveći nedostatak korištenja SDO [23].

Osim HOMER i HOGA, postoje i druga komercijalna sučelja za dimenzioniranje i simulaciju HES, kao što su HYBRID2, HYBRIDS, INSEL, SOLSIM, ARES itd. [50, 59, 61]. TRNSYS sučelje se također može koristiti u svrhu ekonomske optimizacije HES, dodavanjem serije HYDROGEMS biblioteka [50].

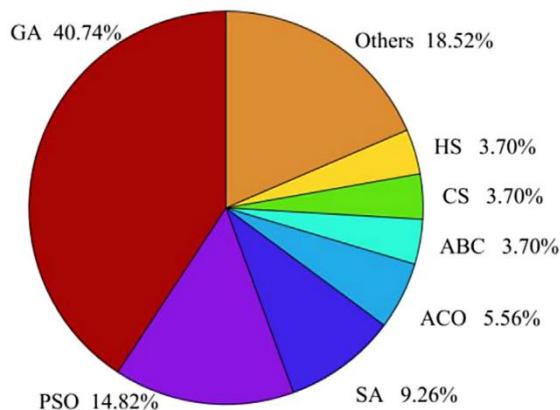
3.4. Dimenzioniranje algoritmima umjetne inteligencije

U usporedbi s izravnim metodama dimenzioniranja, AI algoritmi mogu riješiti ne linearne probleme, te nije potreban pristup vremenskim podacima [50, 59]. U literaturi su korišteni razni AI algoritmi s jednim ciljem [13, 15, 39, 40, 45, 65] ili više ciljeva optimizacije [11, 22, 38], korištenjem jednog algoritma [11, 13, 15, 38–40, 45] ili više algoritama u kombinaciji [22, 65], kako bi se nadišla ograničenja pojedinog algoritma. Neki od tih algoritama su genetski algoritam (*engl. Genetic Algorithm, GA*), optimizacija rojem čestica (*engl. Particle Swarm Optimization, PSO*), simulirano žarenje (*engl. Simulated Annealing, SA*) [50, 57–59].

GA je evolucijski algoritam pretraživanja kojim se oponaša proces prirodne selekcije, kako bi se došlo do optimalnog rješenja. GA također oponaša i prirodne procese mutacije i križanja. Prednosti korištenja GA su mogućnost rješavanja problema s višestrukim rješenjima, jednostavna implementacija na postojeće simulatore, mogućnost kombiniranja s drugim AI algoritmima [50, 57, 59], zbog čega je postao najkorišteniji AI algoritam za dimenzioniranje HES, slika 3.1. Neki od nedostataka GA su sklonost konvergencije lokalnom optimumu i vrijeme potrebno za postizanje optimalnog rješenja.

U [45] autori uspoređuju GA s sučeljem HOMER, dok se u [13] GA uspoređuje s PSO, BSA (*engl. Backtracking Search Algorithm*) i Jaya algoritmom. BSA je evolucijski algoritam vođen memorijom koji, kao i GA, koristi selekciju, križanje i mutaciju za pronalaženje optimalnog rješenja [13]. Jaya je populacijski algoritam za optimizaciju bez gradijenta, koji nekoliko puta

modificira populaciju pojedinačnih rješenja, kako bi postigao optimalno rješenje [66]. Human i ostali [22] GA kombiniraju s SPEA (*engl. Strength Pareto Evolutionary Algorithm*) u svrhu optimalnog upravljanja i dimenzioniranja sustava, dok se u [65] GA kombinira s SA.



Slika 3.1. Omjer korištenja optimizacijskih AI algoritama u svrhu dimenzioniranja HES [59]

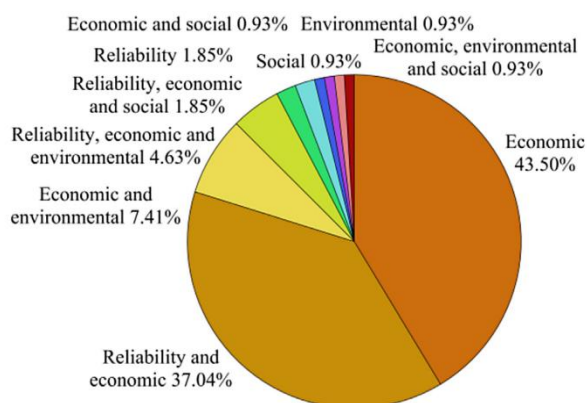
PSO algoritam je evolucijski algoritam koji je nastao iz proučavanja predatorskog ponašanja jata ptica i riba [59]. PSO se ne koristi mehanizmima mutacije i križanja, kao GA, pa je stoga rad algoritma jednostavniji, zbog čega je konvergencija optimalnog rješenja brža [50, 59]. Jednostavnost korištenja, brza konvergencija i visoka preciznost su razlozi zašto je PSO jedan od najkorištenijih AI algoritama za optimizaciju HES [50, 57, 59], slika 3.1. Nedostatak PSO algoritma je što ne može riješiti probleme nekoordiniranih sustava, te je podložan rješenjima lokalnog optimuma [50, 59].

Marocco i ostali [39] korištenjem PSO algoritma vrše dimenzioniranje HES, prema ekonomskoj funkciji cilja, minimum cijene korisne energije. U [11, 38] je prezentirana višeciljna optimizacija HES korištenjem samo PSO algoritma. Usporedba PSO i DE algoritma (*engl. Differential Evolution*) je prezentirana u [15]. DE je populacijski algoritam koji se koristi vektorima kao jedinkama populacije, te primjenjuje mehanizme selekcije, križanja i mutacije [15].

SA je robustan algoritam nasumičnog pretraživanja koji može riješiti ne linearne i kaotične probleme s mnogo ograničenja, oponašanjem procesa žarenja metala [50, 59]. Najveća prednost SA algoritma je što može izbjeći lokalne optimume, dok je nedostatak što kvaliteta konačnog rješenja može biti loša [50, 59]. SA je korišten u [67] za dimenzioniranje HES preko tehničke funkcije cilja.

Osim poviše navedenih AI algoritama, u literaturi se također može pronaći primjere korištenja ACO (*engl. Ant Colony Optimization*), CS (*engl. Cuckoo Search*), ABC (*engl. Artificial Bee Colony*), HSA (*engl. Harmony Search Algorithm*) algoritama, u svrhu dimenzioniranja HES [50, 57–60].

Svaka konfiguracija HES za razmatrani profil opterećenja može imati više od jednog prihvatljivog rješenja dimenzija kapaciteta sustava. Za postizanje najboljeg rješenja, prema potrebama korisnika, potrebno je postaviti adekvatnu funkciju ili funkcije cilja, prema kojima će se vršiti usporedba svih mogućih rješenja optimizacije. Korištene funkcije cilja su tehničkog, ekonomskog, ekološkog i socijalno-političkog tipa, od kojih je ekonomski tip funkcije cilja najčešće korišten pri optimizaciji s jednom funkcijom cilja, a tehno-ekonomski cilj za višeciljnu optimizaciju [59], slika 3.2. Najčešće se koriste funkcije cilja minimuma cijene energije, minimuma korisne energije i minimuma neto troška sustava za ekonomski tip, dok pouzdanost sustava definirana preko mogućnosti zadovoljavanja opterećenja najčešće korišteni tehnički tip funkcije cilja [59].



Slika 3.2. Omjer korištenih funkcija cilja u svrhu dimenzioniranja HES [59]

3.5. Pregled istraživanja

Zhou i ostali [33] predlažu izravnu metodu dimenzioniranja za PV/BT/HS konfiguraciju sustava, u svrhu brze procjene kapaciteta svih sastavnih komponenata sustava. Za svaku od sastavnih komponenata sustava je predložena jednadžba za dimenzioniranje kapaciteta, površine ili snage. Jednadžbe obuhvaćaju parametre opterećenja, sunčevog zračenja, učinkovitosti, parametre upravljanja i marginalne koeficijente. Marginalnim koeficijentima se kompenzira ne poklapanje proizvodnje energije i profila opterećenja. Metoda dimenzioniranja je demonstrirana za dva razmatrana slučaja.

Cano i ostali [23] uspoređuju četiri metode dimenzioniranja za PV/WT/BT/HS konfiguraciju sustava. Izvršene su simulacije na vremenski period od jedne godine. Prva metoda je izravna metoda dimenzioniranja. PV i WT su dimenzionirani prema potrebama opterećenja i faktora iskorištenja kapaciteta, dok je FC dimenzioniran prema najvećem mogućem opterećenju uz sigurnosni faktor od 20%, a EL za najveći mogući višak energije. Kapacitet BT je dimenzioniran tako da se iz BT može zadovoljiti opterećenja na vremenski period od 24 sata, bez proizvedene energije iz PV i WT ili rada FC. Preostale tri metode su korištenjem programskih alata SDO, gdje je izvršena tehnička optimizacija bez ekonomskog cilja, HOMER, gdje je dimenzioniranje izvršeno prema ekonomskoj funkciji cilja i HOGA, gdje je izvršena GA optimizacija s ekonomskom funkcijom cilja. Rezultati su pokazali da se svakom od metoda dimenzioniranja dobivaju kapaciteti sustava za postizanje pouzdanog i neprekinutog rada sustava, dok se SDO metodom postižu najbolja rješenja.

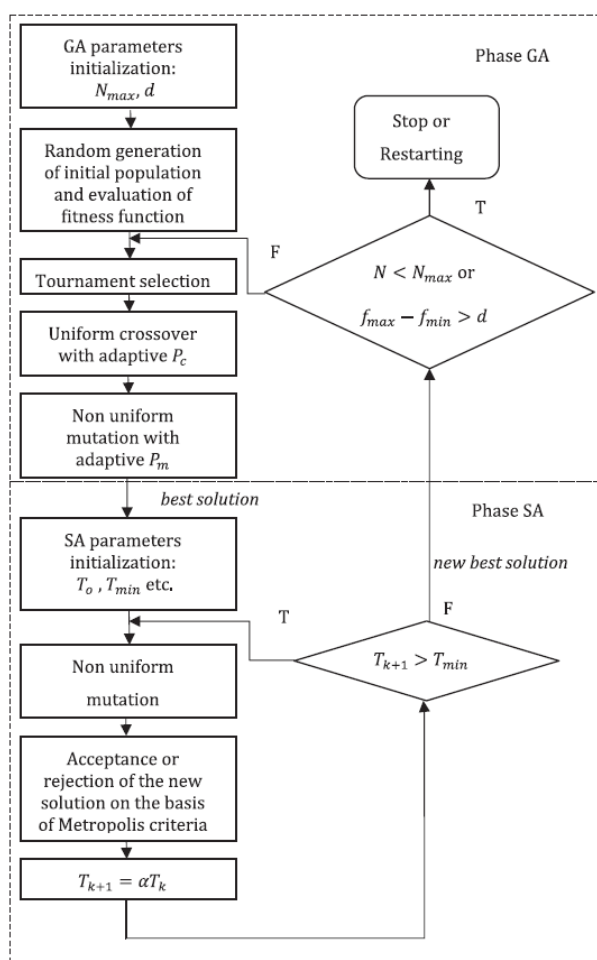
Tri metode dimenzioniranja sustava su uspoređene u [6], za PV/BT/HS konfiguraciju sustava. Simulacije rada sustava su izvršene preko TRNSYS sučelja, za vremenski period od jedne godine, korak 15 sekunda. Prva metoda dimenzioniranja je izravna metoda, postavljena kao i u [23], druga metoda je korištenjem HOMER sučelja, a treća korištenjem HOGA sučelja. Rezultati istraživanja su pokazali da je prva metoda nepouzdana, te da se prilikom rada sustava SOC i razina vodika u spremniku često nalaze u području minimuma, što je izazvalo energetske gubitke i prekide rada sustava.

Rahimi i ostali [14] su primijenili izravnu metodu dimenzioniranja za WT/HS konfiguraciju sustava. Dimenzioniranje sustava je izvršeno za pet različitih lokacija, prema maksimalnim energetske potrebama opterećenja za svaku od promatranih lokacija. Za dimenzioniranje duljine lopatice rotora WT su korištene srednje mjesečne brzine vjetra uz faktor sigurnosti od 30%, pa je iz podataka proizvedene energije i energije opterećenja određen energetski višak, prema kojem je određen nazivni kapacitet EL. Skladište vodika je dimenzionirano prema nazivnom proizvodnom kapacitetu EL, a FC je dimenzioniran za najveće moguće opterećenje. Rezultati su pokazali da je WT predimenzionirana, što rezultiralo porastom sveukupnih troškova sustava.

GA i GA-PP kombinacija su uspoređene u [40] za dimenzioniranje PV/WT/BT konfiguracije sustava, za šest različitih profila opterećenja, preko kojih se razmatra socijalno-demografski aspekt problema dimenzioniranja sustava. Postavljena je ekonomska funkcija cilja, minimalan neto trošak sustava. Za GA-PP kombinaciju, GA je najprije korišten za dobivanje brze procjene optimalnog rješenja, te se prema toj procjeni određuje polje pretraživanja za PP metodu. PP

metodom se zatim pretražuju sva postojeća rješenja, unutar zadanog polja, koja su u stanju zadovoljiti potrebe opterećenja. U konačnici su postignuta jednaka rješenja korištenje obje metode dimenzioniranja.

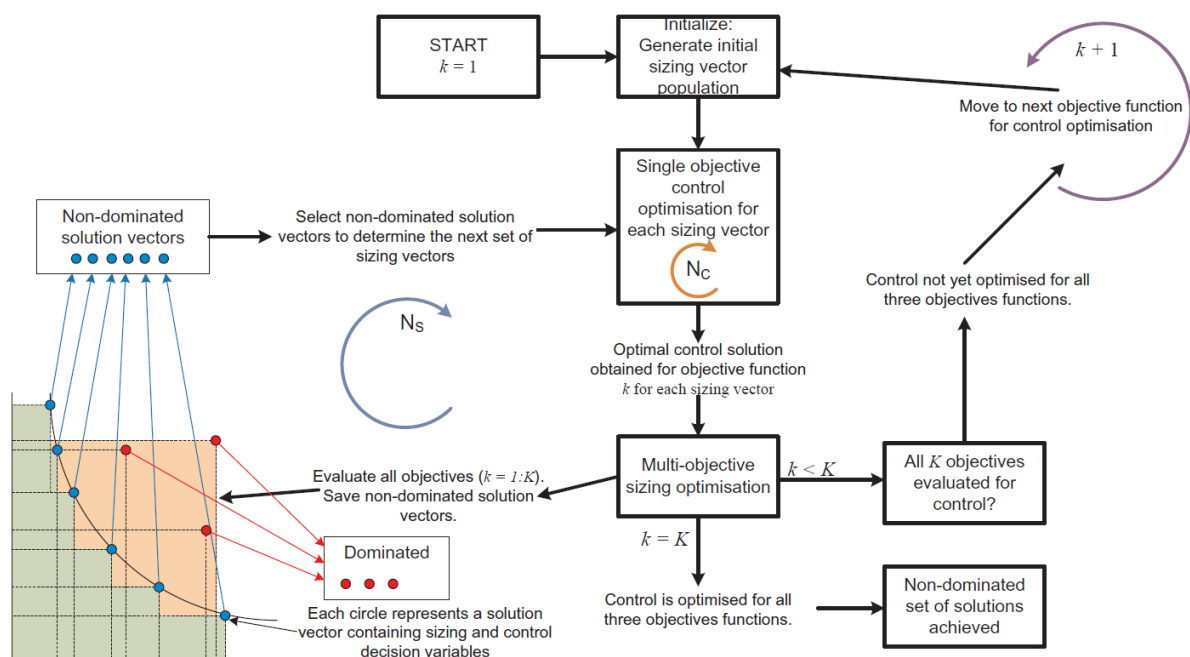
Carapellucci i ostali [65] vrše dimenzioniranje PV/WT/BT/HS konfiguracije sustava, u kombinaciji s malom hidroturbinom (*engl. Hydro Power Plant, HP*), korištenjem kombinacije GA-SA algoritma. Postavljena je ekonomska funkcija cilja, minimum cijene energije. Optimizacija se vrši u dvije faze, gdje je GA prva faza, a SA druga faza optimizacije. U prvoj fazi se stvara populacija, za koju se zatim vrše procesi selekcije, križanja i mutacije, dok se u drugoj fazi optimalno rješenje dobiveno GA optimizacijom podliježe SA procesu, kako bi se postiglo još bolje rješenje, slika 3.3. Konačno rješenje je proslijeđeno GA za dobivanje nove populacije.



Slika 3.3. Dijagram toka hibridnog GA-SA algoritma [65]

Human i ostali [22] istražuju metodu za optimalno dimenzioniranje i upravljanje sustava za proizvodnju vodika, za tri različite lokacije, kombinacijom GA-SPEA algoritma. Izvršena je

tehno-ekonomska optimizacija s tri funkcije cilja: energetska učinkovitost sustava; minimum godišnjeg troška životnog ciklusa sustava; pouzdanost sustava, definirana preko degradacije komponenata. U prvoj fazi se korištenjem GA optimiranju parametri upravljanja sustava, prema jednoj funkciji cilja, a zatim se u drugoj fazi vrši višeciljna optimizacija korištenjem SPEA, slika 3.4. rezultati su pokazali da se kombiniranjem optimizacije upravljanja i dimenzioniranja sustava za postavljene tri funkcije cilja postižu bolji rezultati, uslijed uzajamne povezanosti.



Slika 3.4. Dijagram toka procesa optimizacije [22]

Usporedba HOMER sučelja i GA, za dimenzioniranje više konfiguracija HES (tablica 3.1) u kombinaciji s bio masom (BM), je istražena u [45]. Autori su razmatrali ekonomsku funkciju cilja, minimalan neto trošak sustava. Rezultati su pokazali da se GA optimizacijom postižu bolja rješenja, nego korištenjem HOMER sučelja.

Sanchez i ostali [15] uspoređuju SPO i DE algoritme za dimenzioniranje PV/WT/HS konfiguracije sustava, preko ekonomske funkcije cilja, minimum cijene energije. Rezultati su pokazali da se korištenjem PSO algoritma postiže brža konvergencija rješenja, nego DE algoritmom. Također, PSO algoritmom se postilo bolje rješenje konfiguracije HES.

Tehno-ekonomska optimizacija, korištenjem PSO algoritma, s dvije funkcije cilja je prezentirana u [11], za PV/WT/HS konfiguraciju sustava. Prva funkcija cilja je minimalan neto trošak sustava, a druga pouzdanost sustava, definirana preko mogućnosti zadovoljavanja potreba opterećenja. Set dobivenih optimalnih rješenja je prikazan Pareto granicom.

Eriksson i Gray [38] korištenjem PSO algoritma vrše višeciljnu optimizaciju PV/WT/BT/HS konfiguracije sustava. Ciljevi optimizacije su tehno-ekonomskog, ekološkog i socijalno-političkog tipa: pouzdanost sustava, definirana preko mogućnosti zadovoljavanja potreba opterećenja; minimum cijene korisne energije; minimum emisije CO₂; socijalno-politički indeks, definirana kao omjer očekivanog zadovoljstva šire javnosti s prihvaćanjem HES. Socijalno-politički cilj je uveden kao bi se pokazao određeni stav javnosti prema korištenju određenih komponenata sustava. Rezultati su pokazali kako se ovisno o socijalno-političkom indeksu može izbjeći korištenje društveno manje prihvatljivih komponenti.

U [13] su uspoređivani GA, PSO, BSA i Jaya algoritmi u svrhu optimizacije PV/WT/HS konfiguracije sustava. Optimizacija je izvršena za ekonomsku funkciju cilja, minimum godišnjeg troška životnog ciklusa. Rezultati su pokazali da se sa svim ispitanim metodama postiže jednako optimalno rješenje. Međutim, brzina konvergencije optimalnog rješenja je postignuta najbrže s Jaya algoritmom.

Tablica 3.1. Pregled metoda dimenzioniranja i funkcija cilja

Literatura	Konfiguracija	Metoda	Funkcija cilja	
[33]	PV/BT/HS	Izravna	Tehnička	Pouzdanost sustava, definirana preko mogućnosti zadovoljavanja potreba opterećenja
[14]	WT/HS	Izravna	Tehnička	Pouzdanost sustava, definirana preko mogućnosti zadovoljavanja potreba opterećenja
[23]	PV/WT/BT/HS	Izravna SDO	Tehnička	Pouzdanost sustava, definirana preko mogućnosti zadovoljavanja potreba opterećenja
		HOMER HOGA	Ekonomska	Minimalan neto trošak sustava
[6]	PV/BT/HS	Izravna	Tehnička	Pouzdanost sustava, definirana preko mogućnosti zadovoljavanja potreba opterećenja
		HOMER HOGA	Ekonomska	Minimalan neto trošak sustava
[53]	PV/WT/BT/HS	PP	Ekonomska	Minimum cijene energije
[12]	PV/HS	PP	Ekonomska	Minimum cijene energije
[35]	PV/BT PV/BT/DG PV/BT/FC PV/BT/HS	HOMER	Ekonomska	Minimalna cijena korisne energije
[36]	PV/WT/HS	HOMER	Ekonomska	Minimalan neto trošak sustava
[1]	PV/BT WT/BT PV/WT/BT PV/BT/DG WT/BT/DG PV/WT/BT/DG PV/HS WT/HS	HOMER	Ekonomska	Minimalna cijena energije

	PV/WT/HS PV/HS/DG WT/HS/DG PV/WT/HS/DG			
[24]	PV/BT/HS	SDO	Tehnička	Pouzdanost sustava, definirana preko mogućnosti zadovoljavanja potreba opterećenja
[26, 27, 29, 30]	PV/WT/BT/HS	SDO	Tehnička	Pouzdanost sustava, definirana preko mogućnosti zadovoljavanja potreba opterećenja
[65]	PV/WT/BT/HS/HP	GA-SA	Ekonomska	Minimum cijene energije
[15]	PV/WT/HS	SPO DE	Ekonomska	Minimum cijene energije
[40]	PV/WT/BT	GA GA-PP	Ekonomska	Minimalan neto trošak sustava
[11]	PV/WT/HS	PSO	Tehno- ekonomska	Dvije funkcije cilja: 1. Minimalan neto trošak sustava 2. Pouzdanost sustava, definirana preko mogućnosti zadovoljavanja potreba opterećenja
[22]	PV/WT/BT/EL	GA-SPEA	Tehno- ekonomska	Tri funkcije cilja: 1. Energetska učinkovitost HES 2. Minimum godišnjeg troška životnog ciklusa sustava 3. Pouzdanost sustava definirana degradacijom komponenata
[38]	PV/WT/BT/HS	PSO	Tehno- ekonomska Socijalno- politička Ekološka	Četiri funkcije cilja: 1. Pouzdanost sustava, definirana preko mogućnosti zadovoljavanja potreba opterećenja 2. Minimum cijene korisne energije 3. Minimum emisije CO ₂ , definirana iz proizvodnje, dostave i održavanja sustava 4. Socijalno-politički indeks, definiran kao omjer očekivanog zadovoljstava šire javnosti s prihvaćanjem HES
[13]	PV/WT/HS	GA PSO BSA Jaya	Ekonomska	Minimum godišnjeg troška životnog ciklusa sustava
[45]	PV/WT/BT/HS/BM PV/WT/HS/BM PV/WT/BT/BM PV/WT/BM	HOMER GA	Ekonomska	Minimalan neto trošak sustava
[39]	PV/BT/HS	PSO	Ekonomska	Minimum cijene korisne energije
[67]	PV/WT/BT	SA	Tehnička	Pouzdanost sustava, definirana preko mogućnosti zadovoljavanja potreba opterećenja

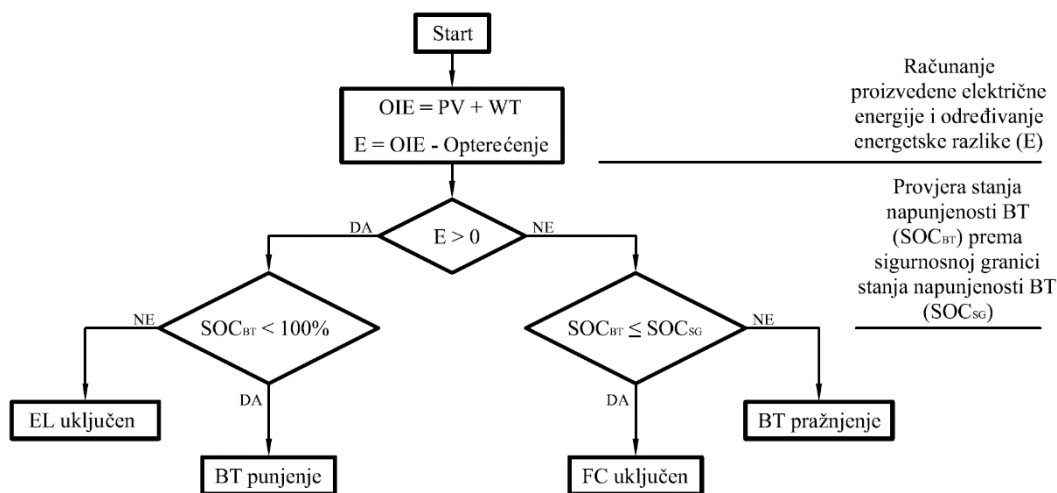
4. STRATEGIJE UPRAVLJANJA ENERGIJOM UNUTAR HES

Kako bi se postigao pravilan rad HES, koji sadrži više od jednog oblika skladištenja energije, za postizanje svih postavljenih ciljeva sustava, strategija upravljanja energijom (*engl. Energy Management Strategy*, EMS) je neophodna. Pravilno postavljena EMS za pripadajuću konfiguraciju HES omogućava sustavu postizanja visoke razine pouzdanosti, te utječe na životni vijek sastavnih komponenti sustava. Prikladna EMS je potrebna kod svih samoodrživih sustava, kako bi se uspjele zadovoljiti sve energetske potrebe opterećenja, kada proizvodni kapacitet HES to nije u stanju isporučiti [26]. Glavni ciljevi postavljenih strategija mogu biti osiguravanje energetske potreba krajnjeg korisnika, ispunjavanje ekonomskih kriterija ili rješavanje problema koje nameće realni sustav, kao što je degradacija i životni vijek sastavnih komponenti [68].

Strategije, kojima je jedini cilj zadovoljavanje potreba krajnjeg opterećenja, svoj algoritam uglavnom temelje na bilanci energije sustava, stanja napunjenosti baterije (*engl. Battery State of Charge*, SOC) i razini vodika skladištenog vodika u spremniku. Prednost ovakvih EMS je jednostavnost algoritama upravljanja, koji se uglavnom temelje na dijagramima toka energije. Jedna takva osnovna EMS (EMS1), kojoj je centralna komponenta sustava BT, te se upravljanje vrši preko SOC, je prezentirana u [6, 21, 24, 25, 39, 42, 43], slika 4.1. Prvo se provjerava energetska razlika između proizvedene energije i potreba opterećenja. Ako je energetska razlika pozitivna, provjerava se dali je SOC manje od 100%. Ako je SOC manje od 100%, energija se koristi za punjenje BT, dok u slučajevima kad je SOC 100%, energija se usmjerava u elektrolizator za proizvodnju vodika. U slučajevima kad je energetska razlika negativna, SOC se uspoređuje s postavljenom razinom sigurnosne granice SOC. Ako je SOC poviše postavljene sigurnosne granice, opterećenje preuzima energiju iz BT, a ako je SOC niže ili jednako SOC sigurnosne granice, uključuje se FC.

Li i ostali [21] primjenom EMS1 na PV/BT/HS konfiguraciji sustava, prikazuju prednosti korištenja dva tipa skladištenja energije u usporedbi s PV/BT i PV/HS konfiguracijama sustava.

Osim algoritama na osnovi dijagrama toka energije, koriste se i optimizacijski algoritmi za izražavanje energetske bilance HES i postizanje cilja zadovoljavanja krajnjeg opterećenja, kao što su model prediktivne kontrole (*engl. Model Predictive Control*, MPC) [30] i fuzzy logika [69]. Međutim, nedostatak ovakvih algoritama je potreba za preciznim matematičkim modelima HES i ulaznim podacima.



Slika 4.1. EMS1 dijagram toka

Strategije s tehničkim faktorom pri upravljanju, osim glavnog cilja za zadovoljavanje krajnjeg opterećenja, najčešće postavljaju ciljeve smanjenja degradacije sastavnih komponenata ili postizanje boljih performansi pojedinih komponenata sustava. Kao i prethodni tip strategija, ovakve strategije također najčešće postavljaju BT kako osnovnu komponentu sustava s postavljenom prednošću za punjenjem i pražnjenjem u slučajevima kad postoji višak, odnosno manjak energije. Korištenje HS će izravno ovisiti o SOC. Korištenje ovog tipa strategije je prezentirano u [25, 28, 33, 34, 43, 44, 65]. Neka istraživanja definiraju prioritete prema nazivnim snagama komponenata sustava, na osnovi rješenja korištenih algoritama [27, 37, 41]. Osnovna razlika ovakvih strategija i strategija samo s ciljem zadovoljavanja potreba opterećenja, je u postavljenim ograničenjima radnih točaka BT i HS za postizanje ciljeva poboljšanja performansi i/ili produljenje životnog vijeka komponenata.

U radovima [28, 33, 34, 65] se koriste petlje histereze za upravljanje ciklusa uključivanja i isključivanja FC i EL, u svrhu produljenja životnog vijeka HS. Histereze su definirane SOC. Nedostatak ovakvih strategija je fiksno postavljene vrijednosti SOC kojima se definiraju petlje histereze.

Cano i ostali [41] se koristi predviđanjem vremenski uvjeta i opterećenja, u svrhu određivanja potrebe korištenja HS, te na taj način nastoji smanjiti broj ciklusa uključivanja i isključivanja FC i EL. EMS koristi fuzzy logiku za algoritam upravljanja. Nedostatak strategije na osnovi predviđanja vremenskih uvjeta i opterećenja je potreba za visoko preciznim ulaznim podacima vremenske prognoze, te preciznim matematičkim modelima komponenata HES.

Osim produljenja životnog vijeka komponenata HES, kao cilj strategija s tehničkim faktorom upravljanja se također postavlja i uvjet visoke performanse sustava. Uvjet visoke performanse se uglavnom odnose na rad EL, pa tako u [43, 44] autori koriste EMS s jednostavnim algoritam na osnovi dijagrama toka u svrhu postizanja proizvodnje vodika veće čistoće, dok [37] postavlja uvjet a postizanje što veće proizvodnje vodika.

Generalni nedostatak strategija s tehničkim ciljem (životni vijek i performanse sustava) je nedostatak ekonomskog cilja, pa se ne može postići ekonomski optimalna performansa sustava.

Strategije koje postavljaju ekonomski cilj, uz cilj zadovoljavanja krajnjeg opterećenja, uzimaju u obzir kapitalne i operativne troškove sustava. Ovaj tip strategija ima potencijalnu primjenu pri dimenzioniranju sustava, te je prednost što se korištenjem ekonomskih parametara upravljanja može postići optimalno ekonomsko rješenje rada sustava. Međutim, ekonomsko optimalno rješenje ne znači da se postižu i povoljni radni uvjeti svih komponenata sustava. Autori u [24] koriste algoritam izrađen prema dijagramu toka, dok [42] koristi predviđanje proizvedene energije i potreba opterećenja, ali se za svaku iteraciju koristi pojednostavljeni model sustava.

Posljednji tip strategije postavlja ekonomski cilj, tehnički cilj i cilj zadovoljavanja krajnjeg opterećenje. Kombinacijom svih ciljeva je moguće postići ekonomski optimalno rješenje uz dobre performanse sustava. Međutim, ovakav tip strategija zahtjeva složene algoritme upravljanja i optimizaciju rada sustava. U [26] autori koriste algoritam fuzzy logike, dok [29] koriste EMS hijerarhijske strukture za rješavanje višeciljnog problema, a ekonomski faktor odlučivanja sadrži podatke životnog ciklusa pripadajućih komponenti HES i troškove degradacije istih.

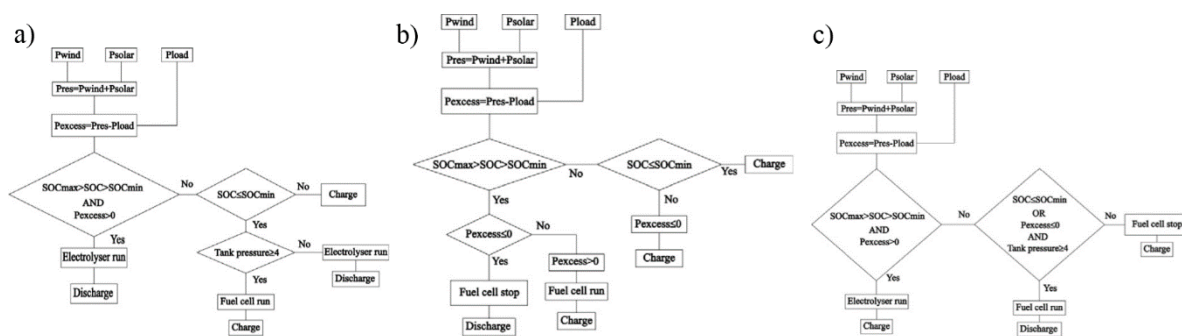
4.1. Pregled istraživanja

Tri strategije upravljanja energijom su uspoređene u [24] za PV/BT/HS konfiguraciju sustava. Strategije se zasnivaju na energetske bilanci sustava, koja se održava preko SOC i razine vodika u spremniku. Ovisno o energetske razlici proizvedene energije i opterećenja, sustav će odlučiti o punjenju ili pražnjenju BT i uključivanju i isključivanju EL i FC, s postavljenim prioritetom na skladište s više pohranjene energije. Treća strategija dodatno uvodi ekonomski faktor BT, FC i EL, koji u slučaju izjednačenosti prethodnog uvjeta odabire element s najnižom cijenom punjenja, tj. pražnjenja unutar HES. ekonomski faktori su definirani preko kapitalnih troškova, troškova održavanja, životnog vijeka i učinkovitosti. Usporedba strategija je izvršena

preko ukupne učinkovitosti HES, gdje je druga strategija upravljanja energijom postigla najvišu učinkovitost.

Bahzadi i Niasati [6] prezentiraju tri različite strategije upravljanja energijom za PV/BT/HS konfiguraciju HES. Prva razmatrana strategija je EMS1. Druga strategija provjerava stanje BT SOC samo kad je energetska razlika proizvedene energije i opterećenja pozitivna, a u slučaju kad je energetska razlika negativna provjerava se stanje vodika u spremniku. Ako je razina vodika u spremniku poviše kritične razine, koristi se FC, a u suprotnom slučaju se koristi BT za opskrbu opterećenja. Kod treće strategije EL i FC su postavljeni da uvijek rade pri nazivnoj snazi. U ovako postavljenoj strategiji BT će preuzimat svaki višak električne energije proizveden od FC, te nadomjestiti svaki manjak za rad elektrolizatora pri nazivnoj snazi.

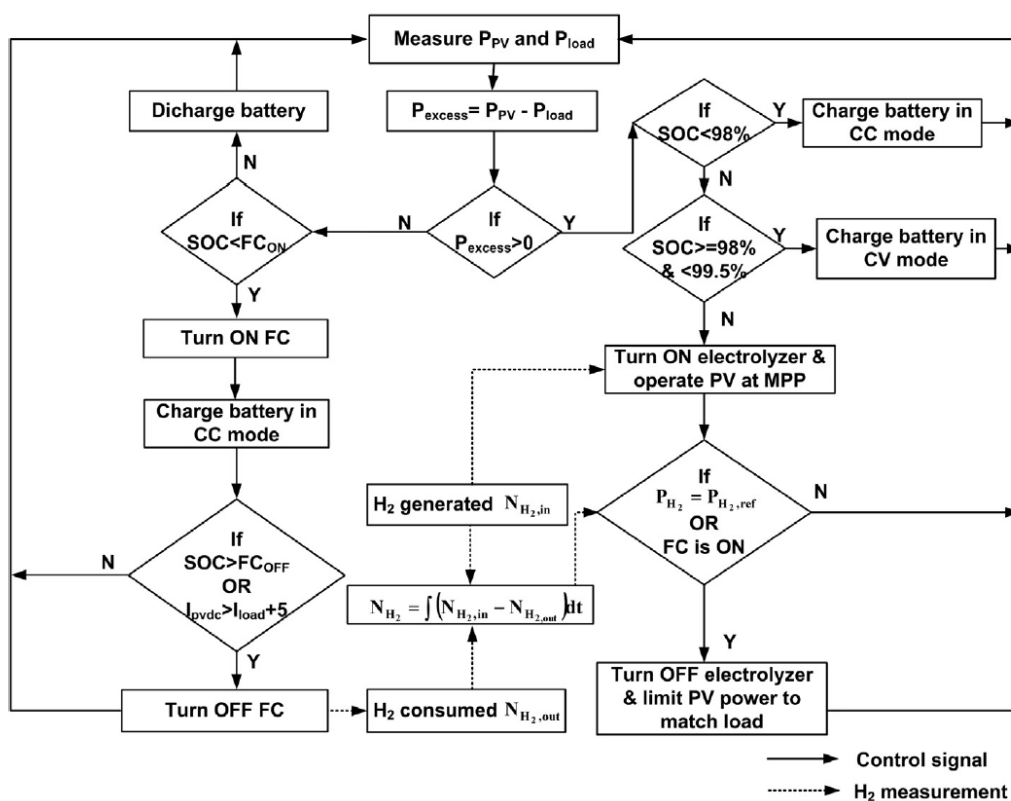
Tri različite EMS su istraživane u [37] za PV/WT/BT/HS konfiguraciju sustava, slika 4.2. Osnovna razlika među strategijama je način korištenja viškova energije, korištenje HS ovisi o SOC. U prvoj EMS, EL ima prednost pred BT u slučajevima pozitivne energetske bilance sustava, te ako višak energije nije dovoljan za rad EL, BT se potpomaže proizvodnja vodika. Cilj ovakve strategije je postići što bolju proizvodnju vodika. Druga strategija je postavljena prema punjenju BT i održavanju što boljeg SOC, dok je treća EMS postavljena da balansira proizvodnju vodika i održavanje SOC. Viškovi energije se koriste za punjenje BT i proizvodnju vodika, a u slučaju nedostatka energije se koriste BT i FC za nadopunu potreba opterećenja. Prioriteti korištenja BT ili HS nisu specificirani. Rezultati su pokazali da se korištenjem treće strategije postiže najviša učinkovitost sustava, od tri predložene strategije.



Slika 4.2. Dijagrami toka EMS: a) prva EMS; b) druga EMS; c) treća EMS [37]

Dash i Bajpai [25] predlaže EMS za PV/BT/HS konfiguraciju sustava, kojom se želi postići neprekidna opskrba krajnjeg korisnika, slika 4.3. BT je glavna komponenta razmatranog HES, te se SOC koristi za uključivanje i isključivanje HS, a intenziteti punjenja i pražnjenja BT su kontrolirana putem MPPT (engl. Maximum Power Point Tracking). Pošto se MPPT kontrolira

izlazna snaga svih izvora, nema potrebe za korištenjem opterećenja za neutralizaciju neiskorištenih viškova (*engl. Dump Load*). Kontrola struje se koristi za brza punjenja BT pri niskim SOC, a kontrola napona za zaštitu baterije pri visokim strujama punjenja. Pri velikim viškovima energije, proizvodnja energije iz PV je ograničena, dok se preostali višak energije se koristi za proizvodnju vodika. FC se koristi pri niskim razinama SOC. Simulacije su izvršene za ljetno vrijeme, na vremenski period od 24 do 48 sati.

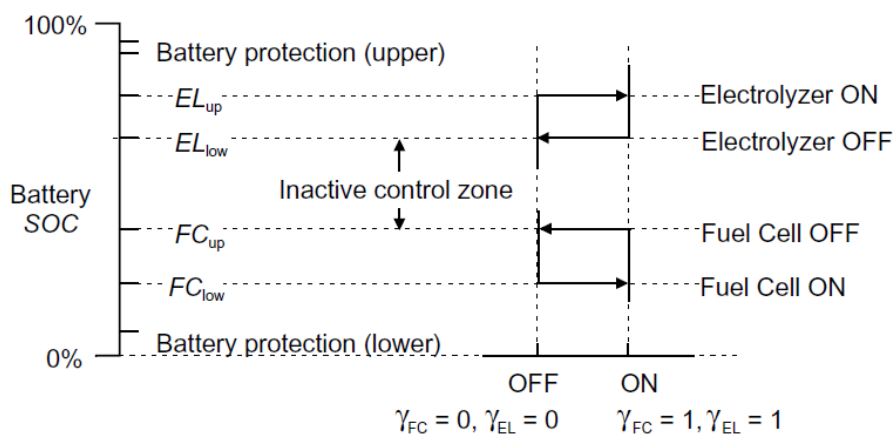


Slika 4.3. Dijagram toka EMS Dash i Bajpai [25]

Ipsakis i ostali [43] također uspoređuju tri EMS za PV/WT/BT/HS konfiguraciju sustava. Simulacije su izvršene za vremenski period od četiri mjeseca. Prva razmatrana strategija je EMS1. U drugoj strategiji BT se koriste za napajanje EL, ukoliko energetska višak nije dovoljan za postizanje minimalne potrebne snage za rad EL. U slučaju negativne energetske bilance HES, tok energije je jednak kao i za EMS1. Logika treće strategije je isključivanje BT za punjenje jednom kad se postigne 100% SOC, kako bi se izbjeglo prepunjivanje BT te je se na taj način zaštitilo. U tom trenutku se BT se koristi za zadovoljavanje opterećenja, a energije proizvedena iz PV/WT se koristi za proizvodnju vodika, umjesto za krajnje opterećenje. Izvršene su dvije analize osjetljivosti, na osnovi postavljanja sigurnosne granice SOC i na osnovi dva različita načina rada FC, fiksna radna točka ili varijabilna. Rezultati su pokazali da

se spuštanjem sigurnosne granice SOC poraste korištenje BT, a opada korištenje FC. Postavljanjem varijabilnog načina rada FC, smanjuje se potrošnja vodika.

Važnost korištenja pravilne EMS za PV/BT/HS konfiguraciju sustava ističe Ulleberg [34]. U radu je prezentirana strategija koja se zasniva na SOC, kojim se kontrolira uključivanje i isključivanje FC i EL na principu petlji dvostrukih histereza, slika 4.4. EL će se uključiti nakon što se postigne viša ili jednaka vrijednost SOC za uključivanje EL (EL_{up}), te će ostati uključen sve dok SOC ne bude niže ili jednako SOC za isključivanje EL (EL_{low}). FC će se uključiti, ako je SOC niže ili jednako SOC za uključivanje FC (FC_{low}), te će ostati uključen sve dok se ne postigne vrijednost SOC viša ili jednaka za isključivanje FC (FC_{up}). Simulacije su izvršene za vremenski period od jedne godine, te je uspoređen rad HES s varijabilnom i fiksnom radnom točkom EL. Rezultati su pokazali da je varijabilni način rada EL bolji, u usporedbi s radom u fiksnoj točki.

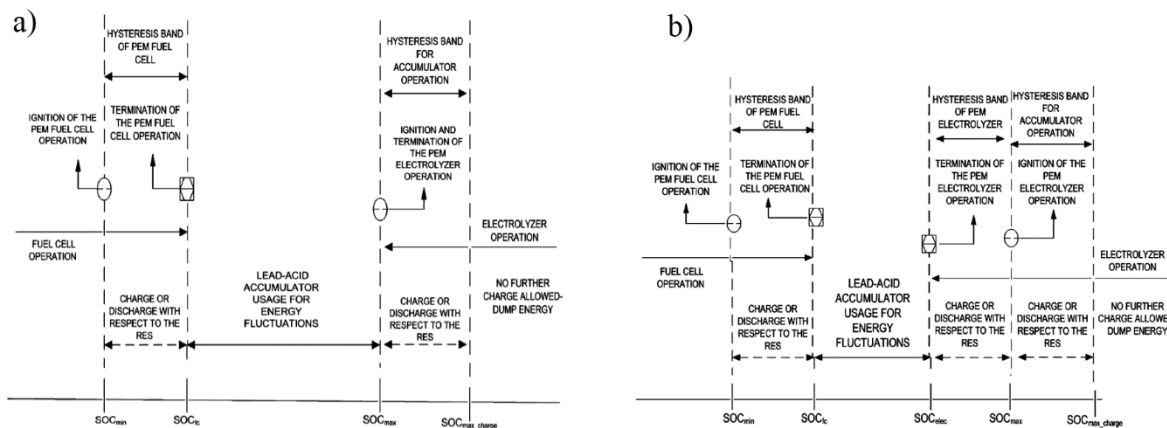


Slika 4.4. Dijagram upravljanja petlji dvostrukih histereza [34]

Zhou i ostali [33] također istražuju EMS dvostrukih histereza za PV/BT/HS konfiguraciju sustava. Simulacije su izvršene za vremenski period od dvije godine, za dvije razmatrane lokacije. EL je postavljen na varijabilan način rada, a FC u fiksnoj točki. Rezultati su pokazali stabilan rad sustava bez prekida za obje razmatrane lokacije.

Ipsakis i ostali [44] uspoređuju dvije EMS s petljama histereze, za PV/WT/BT/HS konfiguraciju sustava, slika 4.5. Simulacije su izvršene za razmatrani vremenski period od četiri mjeseca. Prva strategija se koristi logikom histereze za upravljanje uključivanja i isključivanja FC, dok se režim uključivanja i isključivanja EL ovisi o SOC i dostupnosti obnovljivih izvora energije. EL će biti uključen u slučajevima kad SOC dosegne gornju granicu i kad je energetski višak povoljan za siguran rad EL. Strategija dva je postavljena s logikom upravljanja dvstruke

histereze, kao i kod [33, 34]. Rezultati su pokazali da se korištenjem druge EMS postiže bolja proizvodnja vodika, uz više korištenje BT. Veći raspon SOC histereza za uključivanje i isključivanje EL i FC se pokazalo pogodnije za rad sustava.

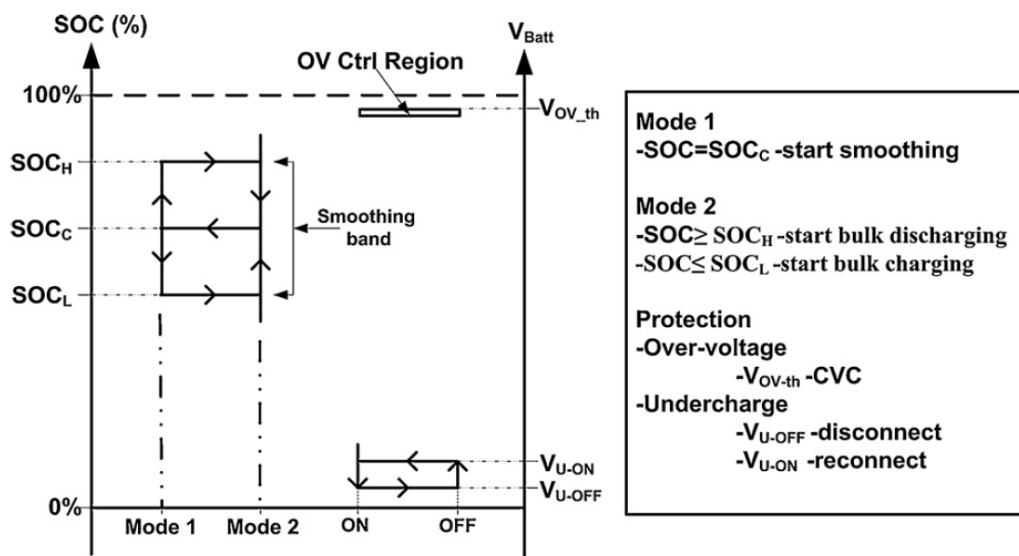


Slika 4.5. Dijagram upravljanja petlji histereza: a) prva EMS; b) druga EMS [44]

Upravljanjem uključivanja i isključivanja EL i FC preko petlje histereze, autori u [28] žele održavati SOC na određenoj razini, slika 4.6. Predložena EMS je primijenjena za PV/BT/HS konfiguraciju sustava, a simulacije su izvršene za vremenski period od 24 sata. Dok se SOC nalazi u željenom rasponu, snaga opterećenja se koristi referenca za upravljanje toka energije od/do FC i EL. Takvo upravljanje toka energijom omogućuje FC i EL rad po glatkim krivuljama snage, pa je stoga ovaj režim rada HES nazvan zaglađivanje. Drugi režim rada se koristi za brzo postizanje željene vrijednosti SOC, putem brzog punjenja ili pražnjenja, ovisno o tome dali se SOC nalazi ispod SOC za uključivanje FC, odnosno SOC za uključivanje EL. U slučajevima prepunjivanja ili prekomjernog pražnjenja BT, postavljene su sigurnosne petlje za očuvanje BT. Rezultati su pokazali da se ovom EMS postiže stabilniji i mirniji rad FC i EL.

Torreglosa i ostali [30] uspoređuju EMS dvostrukih histereza SOC i spremnika vodika s EMS koja se zasniva na MPC. Istraživanje je izvršeno za PV/WT/BT/HS konfiguraciju sustava. Razmatrani vremenski period je 25 godina. Prva strategija određuje tok energije unutar sustava prema postavljenim uvjetima upravljanja rada FC i EL, te punjenja i pražnjenja BT. Kontroliranim radom HS i BT se održava željena razina vodika u spremniku i SOC. Druga strategija koristi MPC za određivanje radne točke svake komponente HES, a ulazni podaci prema kojima se to određuje proizlaze iz upravljanja dvostrukih histereza za spremnik vodika i SOC. MPC osigurava da su ispunjeni uvjeti praćenja krajnjeg opterećenja, te održavanje razine

vodika i SOC na željenoj razini. Rezultati su pokazali da se korištenjem MPC postiže bolja učinkovitost HES, na razmatrani period od 25 godina.

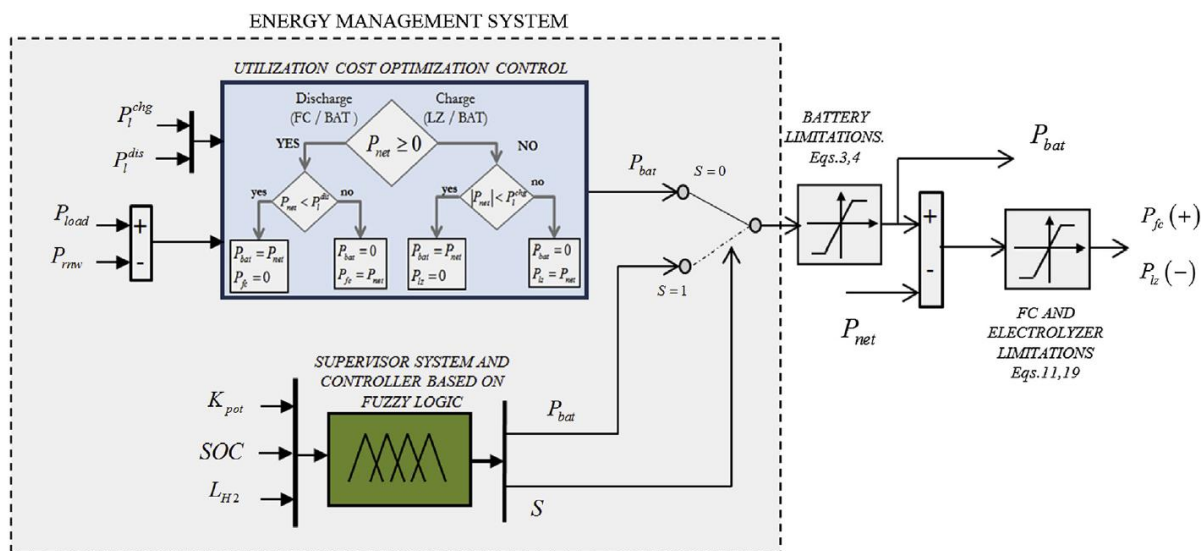


Slika 4.6. Dijagram upravljanja i odabir režima rada [28]

Cano i ostali [41] postavljaju EMS na osnovu predviđanja proizvodnje energije i opterećenja i fuzzy logike za PV/WT/BT/HS konfiguraciju sustava. Simulacije su izvršene za vremenski period od četiri tjedna, gdje svakim tjednom simulirano jedno godišnje doba. Upravljanje ciklusa uključivanja i isključivanja EL i FC se donosi u ovisnosti SOC i prognozi proizvedene energije, dok se fuzzy logikom određuje radna točka svake od pripadajućih komponenata. Dobiveni rezultati simulacije su uspoređeni s rezultatima [42], gdje autori također koriste fuzzy logiku upravljanja uz predviđanje proizvedene energije i opterećenja. U [42] je također izvršena simulacija za razmatrani period od četiri tjedna. Rezultati usporedbe su pokazali da su [41] postigli manji broj uključivanja EL nego [42], ali uz veći broj radnih sati.

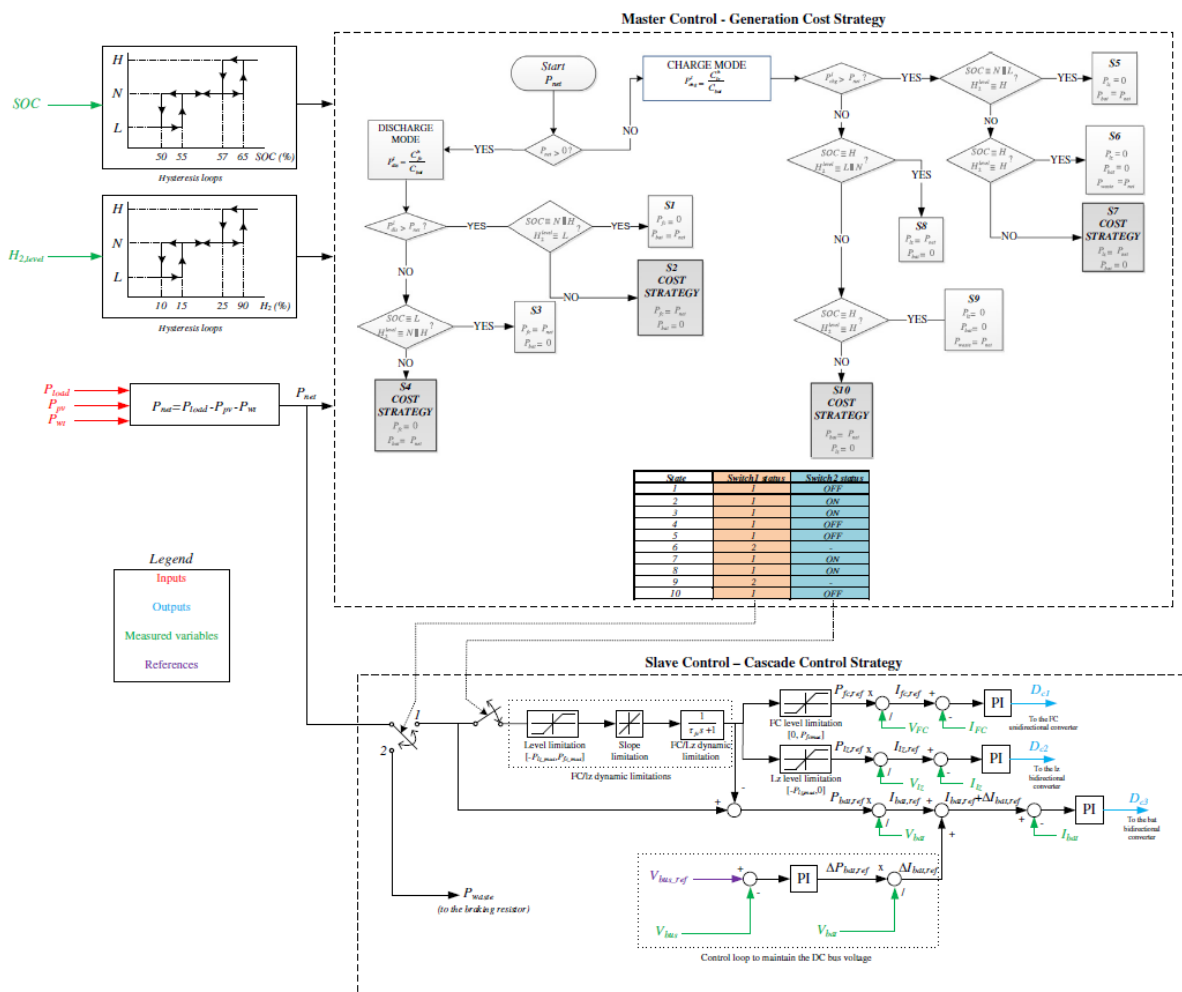
Osnovna EMS1 je uspoređena s strategijom koja se zasniva na algoritmu fuzzy logike u [26], slika 4.7. Istraživanje je izvršeno za PV/WT/BT/HS konfiguraciju sustava, a simulacije su izvršene za vremenski period od 25 godina. Fuzzy logika je odgovorna za određivanje koja će komponenta korištena za primanje ili davanje energije, te pri kojoj snazi. Ekonomski faktori troška korištenja energije, koeficijenti snage, SOC, stanje vodika u spremniku, te trenutno stanje životnog vijeka su parametri na osnovu kojih se donose odluke upravljanja energijom. Rezultati istraživanja su pokazali da se korištenjem strategije s fuzzy logikom postiže sveukupno manji trošak korištenja HES, te je potreban manji broj izmjena BT, EL i FC. Istraživanje, za istu konfiguraciju sustava i vremenski period simulacije, je nastavljeno u [27], gdje su prezentirane

dvije nove fuzzy logike za nadgledanje upravljanja energetskog toka. Prva EMS je postavljena tako da sustav pokušava skladištiti što je više moguće energije, te smanjiti neiskorištene energetske viškove. Druga EMS je postavljena tako da osigura minimalan potreban broj izmjena BT, EL i FC. Korišteni su jednaki parametri za donošenje odluka za upravljanje energijom, osim ekonomskog faktora koji ove dvije strategije nije bio korišten. Rezultati su pokazali da se korištenjem EMS [26] postižu najbolji rezultati rada sustava, uspoređenje tri strategije na osnovu fuzzy logike.



Slika 4.7. Shema logike upravljanja korištenjem fuzzy logike [26]

Torreglosa i ostali [29] istražuju EMS hijerarhijske strukture za PV/WT/BT/HS konfiguraciju sustava, slika 4.8. Simulacije su izvršene za vremenski period od 25 godina. Strategija je postavljena tako da glavni algoritam upravljanja (*engl. Master Control*) donosi odluke raspodijeli energije, a pomoćni algoritam upravljanja (*engl. Slave Control*) usvaja i prilagođava raspodjelu energije dinamičkim ograničenjima. Glavni algoritam upravljanja prati logiku dijagrama toka na osnovi SOC i stanja vodika u spremniku. Pomoćni algoritam upravljanja koristi kaskadne upravljačke petlje za upravljanje izvora energije, slijedeći odluke glavnog algoritma upravljanja. Ciklusi punjenja i pražnjenja skladišnih kapaciteta će ovisiti o razini skladištene energije. U slučaju jednakosti, odluka se donosi prema tehničkom i ekonomskom faktoru, koji obuhvaćaju funkcije troškova u ovisnosti o degradaciji komponenata. Rezultati su pokazali da se korištenjem ove EMS postiže pouzdan rad HES.



Slika 4.8. EMS hijerarhijske strukture upravljanja [29]

5. ZAKLJUČAK

Samoodrživi hibridni energetske sustavi su u literaturi prepoznati kao stabilno rješenje izvora električne energije za potrošače na udaljenim lokacijama, koji nemaju pristup energetske mrežama. U ovom radu je izvršen pregled literature na području dimenzioniranja i strategija upravljanja energijom samoodrživih hibridnih energetskih sustava. Pregledane su različite metode dimenzioniranja HES, sa svim pripadajućim ciljevima, kao i različite strategije upravljanja energijom. Napravljen je kratak pregled korištenih matematičkih modela komponenata HES i korištenih sučelja za simuliranje rada istih.

Mnogi autori navode produljenje životnog vijeka ili usporavanje procesa degradacije komponenata kao jedan od ili jedini cilj strategije upravljanja energijom, ali tek nekolicina, osim postavljanja ograničenja dubine pražnjenja baterije ili ograničenja raspona radne točke snage elektrolizatora i gorivnih članaka, u radu spominje ili koristi neki od modela procesa degradacije pripadajućih elemenata. Preostali životni vijek komponenata sustava je tada najčešće procijenjen prema broju ciklusa uključivanja i isključivanja ili broju ciklusa punjenja i pražnjenja. Isto tako se ne provodi analiza utjecaja degradacije elemenata na rad i pouzdanost sustava, a simulacije su često izvršavane na kratak vremenski period da bi se mogla izvršiti adekvatna analiza.

Većina pregledanih istraživanja fokus postavlja samo na dimenzioniranje, tj. optimizaciju sustava, ili strategiju upravljanja energijom. Istraživanja kojima je glavni cilj optimalno dimenzioniranje sustava, ne uzimaju u obzir važnost strategije upravljanja energijom za postizanje optimalnog rješenja. Isto tako, istraživanja koja istražuju optimalnu strategiju upravljanja sustava, koriste komercijalne alate s predodređenom funkcijom cilja u svrhu dimenzioniranja sustava, pa ciljevi dimenzioniranja sustava i ciljevi strategije upravljanja energijom u većini slučajeva nisu usklađeni.

Iz pregledane literature se da zaključiti, kako dosadašnja istraživanja nisu u potpunosti obuhvatila sve potrebne aspekte za postizanje optimalnog rješenja sustava, koje bi više odgovaralo realnom sustavu.

LITERATURA

- [1] A. C. Duman and Ö. Güler, “Techno-economic analysis of off-grid PV / wind / fuel cell hybrid system combinations with a comparison of regularly and seasonally occupied households,” *Sustain. Cities Soc.*, vol. 42, no. May, pp. 107–126, 2018.
- [2] M. Bortolini, M. Gamberi, A. Graziani, R. Manzini, and F. Pilati, “Performance and viability analysis of small wind turbines in the European Union,” *Renew. Energy*, vol. 62, pp. 629–639, 2014.
- [3] M. H. Athari and M. M. Ardehali, “Operational performance of energy storage as function of electricity prices for on-grid hybrid renewable energy system by optimized fuzzy logic controller,” *Renew. Energy*, vol. 85, pp. 890–902, 2016.
- [4] L. M. Fern, P. Garcı, A. J. Gil-mena, F. Llorens-iborra, and F. Jurado, “Optimized operation combining costs, efficiency and lifetime of a hybrid renewable energy system with energy storage by battery and hydrogen in grid-connected applications,” pp. 1–13, 2016.
- [5] M. Rouholamini and M. Mohammadian, “Heuristic-based power management of a grid-connected hybrid energy system combined with hydrogen storage,” *Renew. Energy*, vol. 96, pp. 354–365, 2016.
- [6] M. S. Behzadi and M. Niasati, “Comparative performance analysis of a hybrid PV / FC / battery stand-alone system using different power management strategies and sizing approaches,” *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 40, no. 1, pp. 538–548, 2014.
- [7] A. Poullikkas, “A comparative overview of large-scale battery systems for electricity storage,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 27, pp. 778–788, 2013.
- [8] M. Hossain, S. Mekhilef, and L. Olatomiwa, “Performance evaluation of a stand-alone PV-wind-diesel-battery hybrid system feasible for a large resort center in South China Sea,” *Sustain. Cities Soc.*, vol. 28, pp. 358–366, 2017.
- [9] M. Junaid, A. Kumar, and L. Mathew, “Techno economic feasibility analysis of different combinations of PV-Wind- Diesel-Battery hybrid system for telecommunication applications in different cities of Punjab, India,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 76, no. December 2015, pp. 577–607, 2017.
- [10] K. Karakoulidis, K. Mavridis, D. V. Bandekas, P. Adoniadis, C. Potolias, and N. Vordos, “Techno-economic analysis of a stand-alone hybrid photovoltaic-diesel e battery-fuel cell power system,” *Renew. Energy*, vol. 36, no. 8, pp. 2238–2244, 2011.
- [11] H. R. Baghaee, M. Mirsalim, G. B. Gharehpetian, and H. A. Talebi, “Reliability/cost-based multi-objective Pareto optimal design of stand-alone wind/PV/FC generation microgrid system,” *Energy*, vol. 115, pp. 1022–1041, 2016.
- [12] C. Ghenai, T. Salameh, and A. Merabet, “Technico-economic analysis of off grid solar PV / Fuel cell energy system for residential community in desert region,” *Int. J. Hydrogen Energy*, pp. 1–11, 2018.
- [13] A. Khan and N. Javaid, “Optimal sizing of a stand-alone photovoltaic, wind turbine and fuel cell systems R,” vol. 85, 2020.
- [14] S. Rahimi, M. Meratizaman, S. Monadzadeh, and M. Amidpour, “Techno-economic

- analysis of wind turbine e PEM (polymer electrolyte membrane) fuel cell hybrid system in standalone area,” *Energy*, vol. 67, pp. 381–396, 2014.
- [15] V. M. Sanchez, A. U. Chavez-ramirez, S. M. Duron-torres, J. Hernandez, L. G. Arriaga, and J. M. Ramirez, “Techno-economical optimization based on swarm intelligence algorithm for a stand-alone wind-photovoltaic-hydrogen power system at south-east region of Mexico,” *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 39, no. 29, pp. 16646–16655, 2014.
- [16] F. Barbir, *PEM Fuel Cells: Theory and Practice*, 2nd ed. Elsevier Academic Press, 2012.
- [17] F. Barbir, “PEM electrolysis for production of hydrogen from renewable energy sources,” *Sol. Energy*, vol. 78, no. 5, pp. 661–669, 2005.
- [18] B. Ould Bilal, V. Sambou, P. A. Ndiaye, C. M. F. Kébé, and M. Ndong, “Optimal design of a hybrid solar-wind-battery system using the minimization of the annualized cost system and the minimization of the loss of power supply probability (LPSP),” *Renew. Energy*, vol. 35, no. 10, pp. 2388–2390, 2010.
- [19] E. Koutroulis, D. Kolokotsa, A. Potirakis, and K. Kalaitzakis, “Methodology for optimal sizing of stand-alone photovoltaic/wind-generator systems using genetic algorithms,” *Sol. Energy*, vol. 80, no. 9, pp. 1072–1088, 2006.
- [20] J. Šimunović, F. Barbir, G. Radica, and B. Klarin, “Techno-economic analysis of PV / wind turbine stand-alone energy system,” *IEEE Split. 2019*, 2019.
- [21] C.-H. Li, X.-J. Zhu, G.-Y. Cao, S. Sui, and M.-R. Hu, “Dynamic modeling and sizing optimization of stand-alone photovoltaic power systems using hybrid energy storage technology,” *Renew. Energy*, vol. 34, no. 3, pp. 815–826, 2009.
- [22] G. Human, G. Van Schoor, and K. R. Uren, “Power management and sizing optimisation of renewable energy hydrogen production systems,” *Sustain. Energy Technol. Assessments*, vol. 31, no. December 2018, pp. 155–166, 2019.
- [23] A. Cano, F. Jurado, H. Sánchez, L. M. Fernández, and M. Castañeda, “Optimal sizing of stand-alone hybrid systems based on PV / WT / FC by using several methodologies,” *J. Energy Inst.*, vol. 87, no. 4, pp. 330–340, 2014.
- [24] M. Castaneda, A. Cano, F. Jurado, H. Sa, and L. M. Ferna, “Sizing optimization , dynamic modeling and energy management strategies of a stand-alone PV / hydrogen / battery-based hybrid system,” pp. 1–16, 2013.
- [25] V. Dash and P. Bajpai, “Power management control strategy for a stand-alone solar photovoltaic-fuel cell – battery hybrid system,” *Sustain. ENERGY Technol. ASSESSMENTS*, vol. 9, pp. 68–80, 2015.
- [26] P. Garcí, J. P. Torreglosa, L. M. Ferna, and F. Jurado, “Optimal energy management system for stand- alone wind turbine / photovoltaic / hydrogen / battery hybrid system with supervisory control based on fuzzy logic,” vol. 8, 2013.
- [27] P. García, J. P. Torreglosa, L. M. Fernández, and F. Jurado, “Improving long-term operation of power sources in off-grid hybrid systems based on renewable energy , hydrogen and battery,” *J. Power Sources*, vol. 265, pp. 149–159, 2014.
- [28] S. G. Tesfahunegn, Ø. Ulleberg, P. J. S. Vie, and T. M. Undeland, “Optimal shifting of Photovoltaic and load fluctuations from fuel cell and electrolyzer to lead acid battery in a Photovoltaic / hydrogen standalone power system for improved performance and life

- time,” *J. Power Sources*, vol. 196, no. 23, pp. 10401–10414, 2011.
- [29] J. P. Torreglosa, P. García, L. M. Fernández, and F. Jurado, “Hierarchical energy management system for stand-alone hybrid system based on generation costs and cascade control,” *ENERGY Convers. Manag.*, vol. 77, pp. 514–526, 2014.
- [30] J. P. Torreglosa, P. García, L. M. Fern, and F. Jurado, “Energy dispatching based on predictive controller of an off-grid wind turbine / photovoltaic / hydrogen / battery hybrid system,” vol. 74, pp. 326–336, 2015.
- [31] Internet, “<http://www.trnsys.com/>.” .
- [32] Internet, “<https://sel.me.wisc.edu/trnsys/features/features.html>.” .
- [33] K. Zhou, J. A. Ferreira, and S. W. H. de Haan, “Optimal energy management strategy and system sizing method for stand-alone photovoltaic-hydrogen systems,” *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 33, no. 2, pp. 477–489, 2008.
- [34] Ø. Ulleberg, “The importance of control strategies in PV-hydrogen systems,” *Sol. Energy*, vol. 76, no. 1–3, pp. 323–329, 2004.
- [35] D. Bezmalinović, F. Barbir, and I. Tolj, “Techno-economic analysis of PEM fuel cells role in photovoltaic-based systems for the remote base stations,” *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 38, no. 1, pp. 417–425, 2013.
- [36] R. Lacko, B. Drobnič, M. Sekavčnik, and M. Mori, “Hydrogen energy system with renewables for isolated households: The optimal system design, numerical analysis and experimental evaluation,” *Energy Build.*, vol. 80, pp. 106–113, 2014.
- [37] E. Dursun and O. Kilic, “Electrical Power and Energy Systems Comparative evaluation of different power management strategies of a stand-alone PV / Wind / PEMFC hybrid power system,” *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 34, no. 1, pp. 81–89, 2012.
- [38] E. L. V Eriksson and E. M. Gray, “Optimization of renewable hybrid energy systems e A multi-objective approach,” *Renew. Energy*, vol. 133, pp. 971–999, 2019.
- [39] P. Marocco, D. Ferrero, A. Lanzini, and M. Santarelli, “Optimal design of stand-alone solutions based on RES + hydrogen storage feeding off-grid communities,” *Energy Convers. Manag.*, vol. 238, p. 114147, 2021.
- [40] S. R. Tito, T. T. Lie, and T. N. Anderson, “Optimal sizing of a wind-photovoltaic-battery hybrid renewable energy system considering socio-demographic factors,” *Sol. Energy*, vol. 136, pp. 525–532, 2016.
- [41] C. Higueta Mauricio, S. Kelouwani, and K. Agbossou, “ScienceDirect Power management system for off-grid hydrogen production based on uncertainty,” vol. 0, 2015.
- [42] G. Cau, D. Cocco, M. Petrollese, S. Knudsen, and C. Milan, “Energy management strategy based on short-term generation scheduling for a renewable microgrid using a hydrogen storage system,” *ENERGY Convers. Manag.*, vol. 87, pp. 820–831, 2014.
- [43] D. Ipsakis, S. Voutetakis, and P. Seferlis, “Power management strategies for a stand-alone power system using renewable energy sources and hydrogen storage,” *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 34, no. 16, pp. 7081–7095, 2009.
- [44] D. Ipsakis, S. Voutetakis, P. Seferlis, F. Stergiopoulos, S. Papadopoulou, and C.

- Elmasides, “The effect of the hysteresis band on power management strategies in a stand-alone power system,” vol. 33, pp. 1537–1550, 2008.
- [45] V. Suresh, M. Muralidhar, and R. Kiranmayi, “Modelling and optimization of an off-grid hybrid renewable energy system for electrification in a rural areas,” *Energy Reports*, vol. 6, pp. 594–604, 2020.
- [46] A. Shaqour, H. Farzaneh, Y. Yoshida, and T. Hinokuma, “Power control and simulation of a building integrated stand-alone hybrid PV-wind-battery system in Kasuga City , Japan,” *Energy Reports*, vol. 6, pp. 1528–1544, 2020.
- [47] W. Wu, V. Indah, S. Chen, and J. Hwang, “Design and techno-economic optimization of a stand-alone PV (photovoltaic)/ FC (fuel cell)/ battery hybrid power system connected to a wastewater-to-hydrogen processor,” *Energy*, 2015.
- [48] V. Dash and P. Bajpai, “Power management control strategy for a stand-alone solar photovoltaic-fuel cell-battery hybrid system,” *Sustain. Energy Technol. Assessments*, vol. 9, no. 1, pp. 68–80, 2015.
- [49] C. Sciences, “Role of energy management in hybrid renewable energy systems : case study-based analysis considering varying seasonal conditions,” pp. 1077–1091, 2013.
- [50] K. Anoune, M. Bouya, A. Astito, and A. Ben, “Sizing methods and optimization techniques for PV-wind based hybrid renewable energy system : A review,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 93, no. April, pp. 652–673, 2018.
- [51] Y. Zhang, Q. S. Hua, L. Sun, and Q. Liu, “Life Cycle Optimization of Renewable Energy Systems Con fi guration with Hybrid Battery / Hydrogen Storage : A Comparative Study,” *J. Energy Storage*, vol. 30, no. February, p. 101470, 2020.
- [52] M. Sarvi and I. N. Avanaki, “An optimized Fuzzy Logic Controller by Water Cycle Algorithm for power management of Stand-alone Hybrid Green Power generation,” *ENERGY Convers. Manag.*, vol. 106, pp. 118–126, 2015.
- [53] R. Hosseinalizadeh, H. S. G, and M. Sadegh, “Economic sizing of a hybrid (PV – WT – FC) renewable energy system (HRES) for stand-alone usages by an optimization-simulation model : Case study of Iran,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 54, pp. 139–150, 2016.
- [54] J. Voisin, M. Darnon, A. Jaouad, M. Volatier, V. Aimez, and J. P. Trovão, “Energy & Buildings Climate impact analysis on the optimal sizing of a stand-alone hybrid building,” *Energy Build.*, vol. 210, p. 109676, 2020.
- [55] W. Zhang, A. Maleki, M. A. Rosen, and J. Liu, “Sizing a stand-alone solar-wind-hydrogen energy system using weather forecasting and a hybrid search optimization algorithm,” *Energy Convers. Manag.*, vol. 180, no. May 2018, pp. 609–621, 2019.
- [56] I. Firtina-ertis, C. Acar, and E. Erturk, “Optimal sizing design of an isolated stand-alone hybrid wind-hydrogen system for a zero-energy house,” *Appl. Energy*, vol. 274, no. February, p. 115244, 2020.
- [57] M. D. A. Al-falahi, S. D. G. Jayasinghe, and H. Enshaei, “A review on recent size optimization methodologies for standalone solar and wind hybrid renewable energy system,” *Energy Convers. Manag.*, vol. 143, pp. 252–274, 2017.
- [58] E. L. V Eriksson and E. M. Gray, “Optimization and integration of hybrid renewable

- energy hydrogen fuel cell energy systems – A critical review,” *Appl. Energy*, vol. 202, pp. 348–364, 2017.
- [59] J. Lian, Y. Zhang, C. Ma, Y. Yang, and E. Chaima, “A review on recent sizing methodologies of hybrid renewable energy systems,” *Energy Convers. Manag.*, vol. 199, no. August, p. 112027, 2019.
- [60] R. Siddaiah and R. P. Saini, “A review on planning , configurations , modeling and optimization techniques of hybrid renewable energy systems for off grid applications,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 58, pp. 376–396, 2016.
- [61] S. Sinha and S. S. Chandel, “Review of software tools for hybrid renewable energy systems,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 32, pp. 192–205, 2014.
- [62] Internet, “<https://www.homerenergy.com/products/pro/index.html>.” .
- [63] Internet, “<https://ihoga.unizar.es/en/>.” .
- [64] Internet, “<https://www.mathworks.com/products/sl-design-optimization.html>.” .
- [65] R. Carapellucci and L. Giordano, “Modeling and optimization of an energy generation island based on renewable technologies and hydrogen storage systems,” *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 37, no. 3, pp. 2081–2093, 2011.
- [66] Internet, “https://cran.r-project.org/web/packages/Jaya/vignettes/A_guide_to_JA.html.” .
- [67] O. Ekren and B. Y. Ekren, “Size optimization of a PV / wind hybrid energy conversion system with battery storage using simulated annealing,” *Appl. Energy*, vol. 87, no. 2, pp. 592–598, 2010.
- [68] F. J. Vivas, A. De Heras, F. Segura, and J. M. Andújar, “A review of energy management strategies for renewable hybrid energy systems with hydrogen backup,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 82, no. August 2017, pp. 126–155, 2018.
- [69] E. M. Stewart *et al.*, “Modeling , analysis and control system development for the Italian hydrogen house,” *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 34, no. 4, pp. 1638–1646, 2009.

POPIS OZNAKA I KRATICA

Kratice

- ABC umjetna kolonija pčela (*engl. Artificial Bee Colony*)
- ACO optimizacija kolonijom mrava (*engl. Ant Colony Optimization*)
- AI umjetna inteligencija (*engl. Artificial Intelligence*)
- BM bio masa
- BSA algoritam strategije povlačenja (*engl. Backtracking Search Algorithm*)
- BT baterija
- CS pretraživanje kukavicom (*engl. Cuckoo Search*)
- DE diferencijalna evolucija (*engl. Differential Evolution*)
- DG diesel generator
- EL elektrolizator
- EMS strategija upravljanja energijom (*engl. Energy Management Strategy*)
- EMS1 osnovna strategija upravljanja energijom
- FC gorivni članak (*engl. Fuel Cell*)
- GA genetski algoritam (*engl. Genetic Algorithm*)
- HES samoodrživi hibridni energetske sustavi u sprezi s obnovljivim izvorima energije
- HP hidroturbina (*engl. Hydro Power Plant, HP*)
- HS vodikov podsustav (*engl. Hydrogen System*)
- HSA algoritam harmonijskog pretraživanja (*engl. Harmony Search Algorithm*)
- MPC model prediktivne kontrole (*engl. Model Predictive Control*)
- MPPT praćenje točke maksimalne snage (*engl. Maximum Power Point Tracking*)
- PEM polimerna membrana (*engl. Polymer Electrolyte Membrane ili Proton Exchange Membrane*)
- PP metoda pretraživanjem zadanog polja (PP)

- PSO optimizacija rojem čestica (*engl. Particle Swarm Optimization*)
- PV Fotonaponski modul (*engl. Photovoltaic module*)
- SA simulirano žarenje (*engl. Simulated Annealing*)
- SOC stanja napunjenosti baterije (*engl. Battery State of Charge*)
- SPEA (*engl. Strength Pareto Evolutionary Algorithm*)
- WT vjetroturbina (*engl. Wind Turbine*)

Oznake

- A_{PV} površina fotonaponskog modula
- A_{WT} površina rotora vjetroturbine
- $A_{0,BB}$ Beattie-Bridgeman-ova konstanta vodika
- a promjenjivi faktor idealnosti
- a_{BB} Beattie-Bridgeman-ova konstanta vodika
- a_{vdW} specifični Van der Waals parametar vodika
- $B_{0,BB}$ Beattie-Bridgeman-ova konstanta vodika
- b Tafel-ov broj
- b_{BB} Beattie-Bridgeman-ova konstanta vodika
- b_{vdW} specifični Van der Waals parametar vodika
- $C_{BT,n}$ nazivni kapacitet baterije
- C_p koeficijent snage vjetroturbine
- c_{BB} Beattie-Bridgeman-ova konstanta vodika
- E_{st} sunčevo zračenje pri standardnim uvjetima, 1000 W/m^2
- E_β sunčevo zračenja na nagnutu plohu
- F Faraday-eva konstanta

f_{PV}	faktor smanjenja
HHV	gornja ogrjevna moć vodika (<i>engl. Hydrogen High Heating Value</i>)
I_{BT}	struja punjenja/pražnjenja baterije
I_{EL}	struja elektrolizatora
I_L	fotostruja
I_{PV}	struja fotonaponskog modula
I_0	struja zasićenja
i	gustoća struje članka
i_L	gustoća struje ograničenja
i_0	gustoća struje izmjene
m_{H_2}	masa vodika
\dot{m}_{H_2}	maseni protok vodika
n	broj uključenih elektrona
n_c	broj članaka u seriji
\dot{n}_{H_2}	količina proizvedenog vodika
\bar{n}_{H_2}	količina vodika u spremniku
P_{EL}	snaga elektrolizatora
P_{FC}	snaga gotivnog članka
P_{PV}	snaga fotonaponskog modula
$P_{PV,n}$	nominalna snaga fotonaponskog modula
P_{WT}	snaga vjetroturbine
$P_{WT,n}$	nazivna snaga vjetroturbine
p	tlak plinova
p_{H_2}	tlak skladištenja vodika

R	plinska konstanta
R_i	unutarnji otpor gorivnog članka
R_S	serijski otpornik
R_{Sh}	otpor paralelnog spoja (shunt)
SOC	stanje napunjenosti baterije
T	temperatura plinova
T_c	temperatura ćelije fotonaponskog modula
$T_{c,st}$	temperatura ćelije fotonaponskog modula pri standardnim uvjetima
t	trenutno vrijeme
t_0	početno vrijeme
U_{EL}	napon članka elektrolizatora
U_{FC}	napon gorivnog članka, potencijal
U_{oc}	napon otvorenog kruga
U_{PV}	napon fotonaponskog modula
U_t	teoretski napon članka
V_n	volumen nazivnog kapaciteta spremnika
v_i	brzina vjetra u trenutku i
v_{iz}	izlazna brzina vjetra vjetroturbine (engl. <i>Cut-out Wind Speed</i>)
v_n	nazivna brzina vjetra vjetroturbine (engl. <i>Rated Wind Speed</i>)
v_{ul}	ulazna brzina vjetra vjetroturbine (engl. <i>Cut-in Wind Speed</i>)
z	koeficijent kompresibilnosti vodika
γ_{BT}	stupanj samopražnjenja baterije
Δ	prirast, inkrement
η_{EL}	učinkovitost elektrolizatora

η_F	Faraday-eva učinkovitost
η_{FC}	učinkovitost gorivnog člana
η_{PV}	učinkovitost fotonaponskog modula
θ	kut zakreta lopatice vjetroturbine
λ	omjer vršnih brzina (<i>engl. Tip Speed Ratio</i>)
μ_{PSC}	temperaturni koeficijent struje kratkog spoja
ρ_a	gustoća zraka

SAŽETAK

Električna energija je visoko kvalitetan oblik energije, te je kako takva jedna od najtraženijih roba ljudskog društva. Posljednjih godina, obnovljivi izvori energije su dokazano dobar način dobivanja čiste električne energije s minimalnim emisijama ugljikovog dioksida. Procjenjuje se da je trenutno oko 24% svjetske proizvedene električne energije dobiveno iz obnovljivih izvora energije. Takav porast korištenja i postepena komercijalizacija obnovljivih izvora energije je dovela do porasta interesa u istraživanje samoodrživih hibridnih energetske sustava, kao potencijalnih stabilnih izvora energije za potrošače na udaljenim lokacija bez pristupa energetske mreži. U ovome radu je izvršen pregled literature na području dimenzioniranja i strategija upravljanja samoodrživih hibridnih energetske sustava u sprezi s obnovljivim izvorima energije. Pregled literature obuhvaća najčešće metode dimenzioniranja sustava, s pripadajućim funkcijama cilja, te razne strategije upravljanja energije unutar razmatranih sustava. Izvršen je i kratak pregled korištenih modela sastavnih komponenata sustava.