

**9. savjetovanje HRO CIGRÉ**  
**Cavtat, 8. - 12. studenoga 2009.**

mr. sc. Krešimir Tačković, dipl. ing.  
HEP-Operator distribucijskog sustava d.o.o.  
kresimir.tackovic@hep.hr

mr. sc. Ivica Petrović, dipl. ing.  
HEP-Operator prijenosnog sustava d.o.o.  
ivica.petrovic@hep.hr

Hrvoje Glavaš, dipl. ing.  
Elektrotehnički fakultet Osijek  
hrvoje.glavas@etfos.hr

doc. dr. sc. Damir Šljivac dipl.ing.  
Elektrotehnički fakultet u Osijeku  
damir.sljivac@etfos.hr

## MODELIRANJE DISTRIBUIRANIH HIBRIDNIH IZVORA ELEKTRIČNE ENERGIJE

### SAŽETAK

Rad predstavlja optimizacijski model za dizajniranje optimalne strukture sustava obnovljivih izvora energije uzevši u obzir troškove životnog vijeka sustava, dostupnost izvora, ekološke troškove i uvjete pouzdanosti.

Opisan je matematički model za svaku proizvodnu tehnologiju, sa rješenjima promjenjivosti i odgovarajućim ograničenjima.

Modelirani sustav uvelike ovisi o dostupnosti sunčeve energije i energije vjetra na lokalnoj razini. Skup podataka predstavlja tipične vremenske uvjete, a praktična simulacija izvršena je u programskom paketu Homer koji obuhvaća sve aspekte pri traženju optimalnog sustava.

**Ključne riječi:** modeliranje obnovljivih izvora energije, fotonaponska mreža, vjetrena turbina, dizel agregat

### SUMMARY

This work represents optimization model for design renewal energy model with respect of life time costs, availability sources, ecological costs and reliability conditions.

Illustrate mathematical model includes manufacture technology and solutions of applicability.

Renewal energy model depends of availability sun emission and wind energy. Simulation is performing using Homer software which includes all aspect for search system optimization.

**Key words:** renewal energy modelling, PV photovoltaic, WT, IC

### 1. UVOD

Rad prikazuje modeliranje hibridnih obnovljivi energetske sustava. Pokazano je programsko okruženje u kojima je isti modeliran. Blokovski prikaz modela opisan je naponskim jednadžbama uz objašnjenje pojedinih veličina. Načelno je opisan problem optimizacije kroz minimiziranje funkcije cilja. Za pojedine blokove (dizel agregat, fotonaponske ćelije, vjetroelektrane i baterije) dani su analitički izrazi i grafički prikazi utjecaja na model. Analiza modela zahtjeva poznavanje satne karakteristike potrošača, raspoloživih izvora energije na lokaciji izdvojenog potrošača, tehničko-ekonomske osobine proizvedenih resursa, ekstremne troškove i koeficijente emisije te zahtjev pouzdanosti.

Za modeliranje fotonaponske ćelije uzeta je proporcionalnost između sunčevog zračenja i izlazne snage, a temperaturni koeficijent ćelije je prikazan kao koeficijent snage. Ograničenja fotonaponskih ćelija uzimaju u obzir intenzitet zračenja, temperaturu, kao i stupanj korisnog djelovanja pretvarača.

Modelirana svojstva vjetroturbine uspoređena su matematičkim modelom analitički i grafički, kod vjetroelektrana glavnina ograničenja je vezana za broj instaliranih jedinica.

Modeliranje dizel agregata izvršeno je kroz linearnu funkciju potrošnje u odnosu na generiranu električnu energiju, prikazana je i njegova krivulja učinkovitosti. Navedena su ograničenja dizel agregata i njegovog angažmana u godini, pojedinom periodu uporabe kao i satnom režimu.

Glavna ograničenja skladišta energije očituju se kroz dopuštenu struju punjenja i pražnjenja pa i uz kontrolu napunjenosti. Navedena su i opća ograničenja pojedinih blokova kao: problem balansiranja energije, ograničenja u godišnjoj proizvodnji, ograničenja pojedinih izvora, kao i ograničenja u pogledu pouzdanosti. Navedeni model uzima u obzir dvadeset godišnji vijek, dostupne resurse i zahtjeve pouzdanosti. Praktična realizacija modela izvršena je u programskom paketu HOMER.

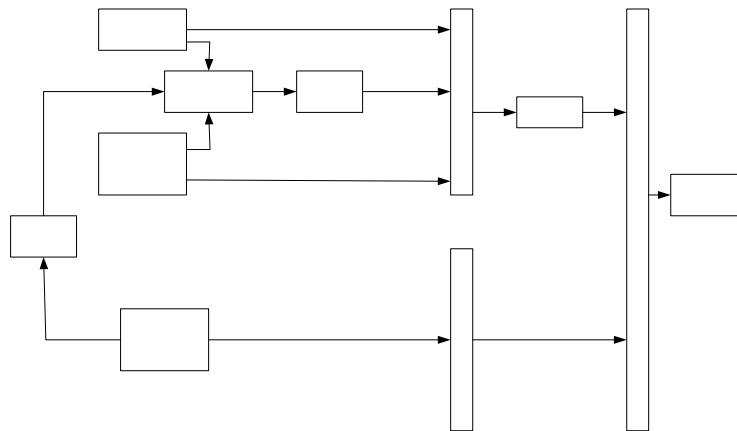
## 2. MODEL OBNOVLJIVIH IZVORA ELEKTRIČNE ENERGIJE

### 2.1. Struktura modela

Optimizacijski model je definiran kao kombinacija linearnog programiranja. Izlazno rješenje modela je optimalna konfiguracija za obnovljivi energetska sustav koji uzima u konačni izračun tehnička rješenja opskrbe, cijenu opreme za dvadeset godišnji životni vijek, trenutnu dostupnost energetskih izvora, potrebne karakteristike, cijena zaštite okoliša i pouzdanost sustava.. Struktura ovog modela je prezentirana na slici 2.1.

Dobivena nazivna snaga je definirana kao međusobno povezivanje nekoliko raspoređenih generatora (fotonaponske ćelije, vjetroelektrana i dizel agregati) i seta akumulatora. Obnovljivi energetska sustav se temelji na generalnoj konfiguraciji tri sabirnice, kako je prikazano na slici 2.1.

Te tri sabirnice su DC sabirnica, AC sabirnica, i pojna sabirnica. Izvori DC(istosmjerne) struje su fotonaponske ćelije, akumulatori, vjetroelektrane, i one su sve spojene na DC sabirnicu. Izvori AC(izmjenične) struje npr. dizelski agregat koji je spojen na AC sabirnicu. Za pretpostaviti je, da se samo koriste uređaji na izmjeničnu struju i oni su spojeni na sabirnicu za napajanje. To je stoga što su uređaji izmjenične struje izgrađeni za električnu mrežu i koriste se u naseljima gdje je mreža u funkciji.



Slika 2.1. Struktura obnovljivog energetskog sustava

Kako je prikazano na slici 2.1. energija proizvedena iz svih izvora se može direktno isporučiti potrošaču ili punjenju akumulatora. Ova veza se može izraziti i formulama od 2-1 do 2-3 za fotonaponski panel, vjetro turbinu i IC motore (dizel agregat).

$$U_{PV} = U_{PV,load} + U_{PV,batt} \quad (2-1)$$

$$U_{WT} = U_{WT,load} + U_{WT,batt} \quad (2-2)$$

$$U_{IC} = U_{IC,load} + U_{IC,batt} \quad (2-3)$$

Za svaki sat, dostupna energija za punjenje baterije je prikazana formulom 2-4, a dostupna energija iz baterije za napajanje potrošača je prikazana formulom 2-5.

$$U_{batt,in} = U_{PV,batt} + U_{WT,batt} + \eta_{inv} \times U_{IC,batt} \quad (2-4)$$

$$U_{batt,load} = \eta_{batt} \times (U_{PV,batt} + U_{WT,batt} + \eta_{inv} \times U_{IC,batt}) \quad (2-5)$$

Ukupna energija za napajanje potrošača može se napisati pomoću formule 2-6.

$$U_{load} = \eta_{inv} \times (U_{PV,load} + U_{batt,load} + U_{WT,load}) + U_{IC,load} \quad (2-6)$$

Gdje je:

- $U_x$  : Proizvedena izlazna energija  $x$  (kW u jednom satu).
- $U_{x,load}$  : Proizvedena izlazna energija  $x$  na potrošaču.
- $U_{x,batt}$  : Proizvedena izlazna energija  $x$  spojena na akumulator (bateriju).
- $X$  : Stoji za PV(fotonapon), WT(vjetrena turb.), IC( dizel agregat).
- $U_{batt,in}$  : Ulazna energija u akumulator.
- $U_{batt,load}$  : Predana energija iz akumulatora potrošaču koja uzima u obzir kružni učinak
- $\eta_{inv}$  : Učinkovitost AC-DC ili DC-AC pretvarača.
- $\eta_{batt}$  : Učinak kružnog puta akumulatora.

## 2.2 Komponente sustava i modeliranje

### 2.2.1. Solarne ćelije

Fotonaponske karakteristike u radnim uvjetima odlikuju se standardnim stanjem (1000 W/m<sup>2</sup>, 25 °C temperatura ćelije), dok utjecaj sunčevog zračenja i temperatura okoline na fotonaponske karakteristike se modelira. Utjecaj sunčevog zračenja se modelira tako da je snaga fotonaponskog modula proporcionalna zračenju. Nadalje utjecaj temperature se prezentira kao temperaturni koeficijent snage (%/°C). Konačno učinak pretvarača je predstavljen kao DC izlaz, koji se pretvara u AC izlaz, kako je prikazano u jednadžbi 2-7.

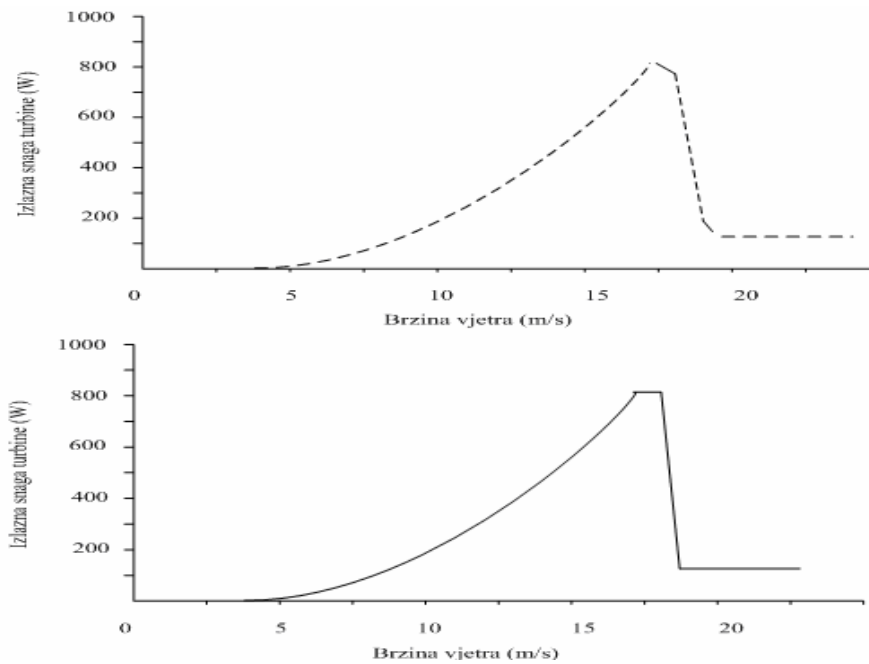
$$U_{jysi} = P_{j=Pv} \times \eta_{inv} \times \left( \frac{E_{ysi}}{E_0} \right) \times (1 - T_C \times (T_{ysi} - 25 \text{ } ^\circ\text{C})) \quad (2-7)$$

U jednadžbi vidimo da je  $U_{jysi,j=Pv}$  izlazna energija iz fotonaponskog sustava u godini  $y$ , sezoni  $s$ ,  $i$  satu  $i$ ;  $P_{j=Pv}$  je maksimalna snaga fotonaponskog panela u jednom satu  $i$ ;  $\eta_{inv}$  je učinkovitost pretvarača;  $E_{ysi}$  je sunčevo zračenje u godini  $y$ , sezoni  $s$ ,  $i$  sati  $i$ ;  $E_0$  je sunčevo zračenje u normalnim uvjetima;  $T_C$  je temperaturni koeficijent;  $T$  je temperatura okoline u °C.

### 2.2.2. Vjetroelektrane

Da bi se modeliralo izvođenje vjetroelektrane, krivulja snage vjetrene turbine mora biti takva da se može iskazati pomoću matematičkih jednadžbi. Npr. na slici 3 je prikazana aktualna krivulja snage za AIR403 turbinu, dobivena od proizvođača i modelirana krivulja snage dobivena prema jednadžbi 2-8 ( $a = 3.2009$ ;  $b = -6.8011$ ;  $c = -14.474$ ;  $i$   $W_{ysi}$  je brzina vjetra u satu  $i$ , sezoni  $s$ , godini  $y$ .)

$$U_{jyst} = U_{jyst,load} + U_{jyst,batt} = \eta_{inv} \times \begin{cases} 0 & : WS_{ysi} < 3.5 \\ a \times WS_{ysi}^2 + b \times WS_{ysi} + c & : 3.5 \leq WS_{ysi} < 17.5 \\ a \times WS_{ysi}^2 + b \times WS_{ysi} + c \Big|_{WS_{ysi}=17.5} & : 17.5 \leq WS_{ysi} < 18 \\ 130 & : WS_{ysi} > 18 \end{cases} \quad (2-8)$$



Slika 2.3. Krivulja snage turbine proizvođača i modelirana krivulja snage

Treba još napomenuti da tipična vjetrena turbina ne proizvodi energiju nakon što joj opadne brzina; nadalje AIR403 model, koristi unikatne rotorske lopatice koje nastavljaju rotirati rotor nakon što brzina vjetra opadne. Prema tehničkim podacima proizvođača izlazna snaga turbine je oko 130 W ako je brzina vjetra veća od otprilike 18 m/s.

### 2.2.3. Motori sa unutarnjim sagorijevanjem

Općenito, karakteristika potrošnje dizel goriva na IC motoru (dizel agregat) je linearna funkcija njegove električne proizvodnje, kako je prikazano u jednadžbi 2-9.  $F_0$  i  $F_1$  su parametri koji su nužni kao ulazi u model.

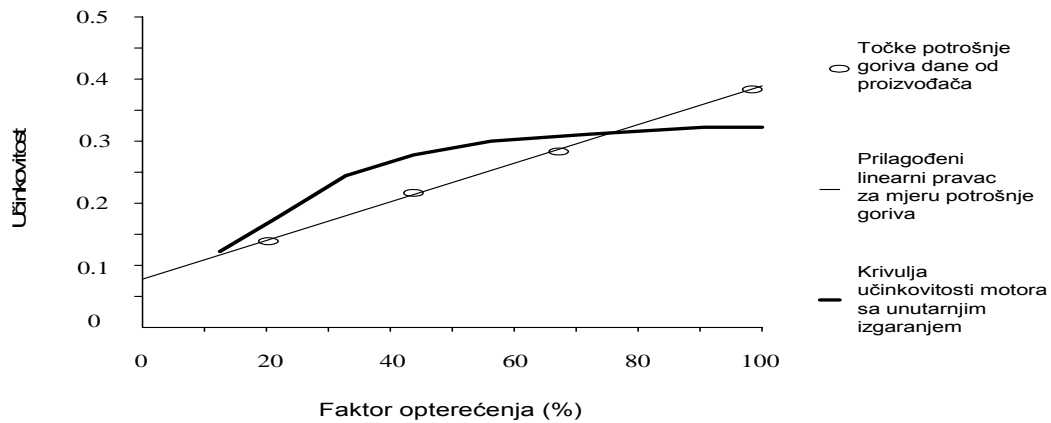
$$F = F_0 + F_1 \times U_{IC} \quad (2-9)$$

Gdje je:

- F : Potrošnja dizel goriva (litra/h).
- $F_0$  : Potrošnja dizel goriva kad nema potrošača (litra/kWh).
- $F_1$  : Povećanje potrošnje dizel goriva (litra/kWh).
- $U_{IC}$  : Proizvedena električna energija u jednom satu (kWh).

U pravilu, konstante  $F_0$  i  $F_1$  su dane od proizvođača. Npr. tehnička karakteristika potrošnje dizel goriva za 6 kW agregat model DNAC 50 Hz je dana u l/h. Ta karakteristika potrošnje je postavljena nasuprot karakteristici proizvodnje električne energije u kWh kako je prikazano na slici 2.4. sa svojim prilagođenim linearnim pravcem, a pokazuje učinkovitost motora na različitim stupnjevima opterećenja. Učinkovitost za specifični faktor opterećenja je određena sa razdvajanjem ukupne energije izlaza iz agregata (BTU/h) na dijelove energija od ukupne vrijednosti potrošenog diesela (BTU/h).

Kako je vidljivo iz sl. 2.4. učinkovitost agregata je najveća na najvećoj točki proizvodnje a najmanja na najmanjoj točki. U pravilu niska proizvodnja vodi velikoj potrošnji goriva, velikim troškovima održavanja i uzrokuje habanje i kidanje motora. Ovo istraživanje pokazuje da je minimalna proizvodnja dizel agregata pri faktoru opterećenja 30%.



Slika 2.4. Karakteristika potrošnje goriva za motore sa unutarnjim izgaranjem te njihova učinkovitost bazirana na motoru DNAC 50 Hz

## 2.2.4 Akumulatori

Akumulatori su elektrokemijski uređaji koji skladište energiju od nekog drugog AC ili DC izvora za kasniju uporabu. Sljedeće pretpostavke se koriste za modeliranje akumulatora: struja punjenja i pražnjenja je limitirana na 10% akumulatorskog AH (amper sat) kapaciteta; efikasnost punog toka je 95%; maksimalno stanje nabijenosti ( $SOC_{max}$ ) i minimalno stanje nabijenosti ( $SOC_{min}$ ) za pojedinu bateriju je 100% i 20% od njezinog AH kapaciteta.

## 2.3. Optimizacijski problem

### 2.3.1. Objektna funkcija

Samostalni energetske sustavi u ovom istraživanju služe potrebama osamljenih i izoliranih sela. Plan izvedbe uzima u obračun dvadeset godišnji vijek korištenja, cijena zagađenja prirode ( $NO_x$ ,  $SO_x$  i  $CO_2$  emisije plinova), kao i pouzdanost sustava. Rezultati su optimalni prijedlozi za optimalne postavke bazirane na domaćim dostupnim energetskim izvorima. Problem je formuliran kao mješovita integracija linearnog programiranja. Funkcija cilja određivanja optimalne strukture hibridne energije sustava prikazana je u jednadžbi 2-10.

$$\sum_j (C_j - S_j) \cdot X_j + \sum_j \sum_y \sum_s \sum_i ((\delta_j \cdot F_{jyst} + OM_{jyst} \cdot U_{jyst}) \times \Theta_{yssi}) + \sum_m \sum_j \sum_y \sum_s \sum_i \alpha_m \times (EF_{jm} \times U_{jyst} \cdot \Theta_{yssi}) \quad (2.10)$$

Gdje je:

- $C_j$  : Suma diskontinuiranih kapitalnih troškova za proizvodnu jedinicu  $j$  (\$).
- $S_j$  : Diskontinuirana vrijednost popravaka za proizvodnu jedinicu  $j$  (\$).
- $\Delta_j$  : Diskontinuirani troškovi goriva za proizvodnu jedinicu  $j$ . (\$/litri za IC agregate na diesel i \$/BTU za vodikove gorive ćelije na prirodni plin)
- $F_{jysi}$  : Cijena potrošnje goriva za proizvodnu jedinicu  $j$ , u godini  $y$ , sezoni  $s$ , i satu  $i$ .
- $OM_{jysi}$  : Trošak rada i održavanja za proizvodnu jedinicu  $j$  (\$/kWh).
- $\Theta_{yssi}$  : Broj radnih sati u godini  $y$ , sezoni  $s$  i satu  $i$ .
- $\alpha_m$  : Trošak za zagađenje okoliša, emisijskog tipa  $m$  (\$/lb).
- $EF_{jm}$  : Faktor zračenja tehnologije  $j$ , emisijskog tipa  $m$  (lb/kWh).
- $X_j$  : Promjenjivo rješenje koje predstavlja broj proizvodnih jedinica  $j$ .
- $U_{jysi}$  : Promjenjivo rješenje koje predstavlja izlaznu energiju iz jedinice  $j$ , u godini  $y$ , sezoni  $s$  i satu  $i$  (kW/1h).

Parametar  $F_{jysi}$  u jednadžbi 2-10 je linearna funkcija izlazne snage, što je rješenje promjenjivosti ( $U_{jysi}$ ). Ovaj odnos se može napisati kao u jednadžbi 2-11 da pokaže karakteristiku potrošnje goriva dizel agregata.

$$F_{jysi} = F_{j0} \times E_{ji} + F_{j1} \times U_{jysi} \quad (2-11)$$

Gdje je:

- $F_{j0}$  : Potrošnja goriva za proizvodnu jedinicu  $j$ , kada nema proizvodnje (l/kWh).
- $F_{j1}$  : Povećanje potrošnje goriva za proizvodnu jedinicu  $j$  (l/kWh).
- $U_{jysi}$  : Proizvedena energija u jednom satu iz proizvodne jedinice  $j$ , u godini  $y$ , sezoni  $s$ , satu  $i$ .
- $E_{ji}$  : Odluka o postavljanju proizvodne jedinice  $j$  u upaljen ili ugašen položaj (0 = off, 1 = on) u satu  $i$ .

Iz jednadžbe 2-10 i 2-11 mogu se vidjeti tri namjere promjene vrijednosti funkcije: broj proizvodnih jedinica svih vrsta ( $X_j$ ); proizvedena snaga od pojedine jedinice u pojedinom satu  $i$  ( $U_{jysi}$ ); odluka kada pokrenuti ili isključiti fosilno zapaljivi motor ( $E_{ji}$ ).  $E_{ji}$  je 0 kada je proizvodna jedinica  $j$  ugašena; i  $E_{ji}$  je 1 kada je proizvodna jedinica u pogonu.

### 2.3.2. Opća ograničenja

A. *Energetska bilanca ograničenja*: satna potreba za energijom mora biti zadovoljena sa količinom proizvedene energije iz svih raspoređenih proizvodnih cjelina. Parametar  $S$  slijedi vrijednost neisporučene energije za svaki sat. Ovo ograničenje se prikazuje pomoću slijedeće jednadžbe za sve godine  $y$ , sezone  $s$ , i sate  $i$ .

$$\sum_{j=ACsources} U_{jyst,load} + \eta_{inv} \times \sum_{j=DCsources} U_{jyst,load} + S' \geq load_{y,si} \quad (2-12)$$

B. *Godišnja proizvodna ograničenja*: za sve proizvodne cjeline, njihova godišnja proizvodnja ne smije premašiti njihove mogućnosti. za sve tehnologije tipa  $j$ .

$$\sum_{y=1}^S \sum_{i=1}^I U_{jyst} \times \theta_{y,si} \leq avail_j \times 8760 \times P_j \times X_j \quad (2-13)$$

C. *Ograničenja individualnog kapaciteta*: za sve proizvodne jedinice, njihova satna proizvodnja je ograničena na njihov proizvodni kapacitet. Za sve sate  $i$ .

$$U_{jysi} = U_{jysi,load} + U_{jysi,batt} \leq P_j \times X_j \quad (2-14)$$

D. *Pouzdanost ograničenja*: cjelokupna pouzdanost dizajniranog sustava mora biti veća od određene dizajnirane veličine ( $R$ ).

$$1 - \frac{\sum_i^{SP} load_{y,si}}{\sum_i^{load_{y,si}}} \geq R \quad (2-15)$$

### 2.3.3. Promjenjiva rješenja i ograničenja vezana uz fotonaponsko područje

Promjenjiva rješenja za fotonaponsko područje su  $X_j = U_{jysi}$ , i  $U_{jysi,PV}$ . U prošlosti je faktor promjenjivosti predstavljao broj fotonaponskih ćelija, dok je kasnije promjenjivost rješenja predstavljala proizvedena snaga iz fotonaponskog niza u godini  $y$ , sezoni  $s$ , i satu  $i$ . Slijedeća jednadžba predstavlja efekt intenziteta sunčevog zračenja, temperature, i učinkovitost pretvarača na određenom fotonaponskom izlazu.

$$U_{jyst} = U_{jyst,load} + U_{jyst,batt} = P_{j=Pv} \times \eta_{inv} \times \left(\frac{E_{y,si}}{E_0}\right) \times (1 - T_c (T - 25^\circ)) \times X_{j=Pv} \quad (2-16)$$

Gdje je  $P_{j=PV}$  ukupna snaga dostupna iz fotonaponskog panela u satu  $i$ ;  $\eta_{inv}$  je invertna učinkovitost;  $E_{ysi}$  je sunčevo zračenje u svakoj godini  $y$ , sezoni  $s$ , i satu  $i$ ;  $E_0$  je sunčevo zračenje u standardnim uvjetima ( $1000 \text{ W/m}^2$ ); predzadni faktor uzima u obzir utjecaj temperature; i posljednji faktor je integrirani faktor promjenjivosti odluke za broj fotonaponskih modula.

### 3.4.4. Promjenjiva rješenja i ograničenja vezana za vjetroelektrane

Promjenjiva rješenja za vjetroelektrane su  $X_{j=WT}$  (integrirani faktor promjenjivog rješenja se odnosi na broj vjetroturbina), i  $U_{jysi=WT}$  (kontinuirano promjenjivo rješenje predstavlja proizvedenu snagu iz vjetroelektrane u godini  $y$ , sezoni  $s$ , i satu  $i$ ). Veza između izlazne snage vjetrene turbine i ulazne brzine vjetra ( $WS_{ysi}$ ) je prikazana u jednadžbi 2-17.

$$U_{jysi} = U_{jysi,load} + U_{jysi,batt} = \eta_{inv} \times \begin{cases} 0 & : WS_{ysi} < 3.5 \\ a \times WS_{ysi}^2 + b \times WS_{ysi} + c & : 3.5 \leq WS_{ysi} < 17.5 \\ a \times WS_{ysi}^2 + b \times WS_{ysi} + c \Big|_{WS_{ysi}=17.5} & : 17.5 \leq WS_{ysi} < 18 \\ 130 & : WS_{ysi} \geq 18 \end{cases} \quad (2-17)$$

### 2.3.5. Promjenjiva rješenja i ograničenja vezana za motore sa unutarnjim izgaranjem

Promjenjiva rješenja za IC motore (dizel agregate) su  $X_{j=IC}$  i  $U_{jysi,j=IC}$ . Nekada je ukupna promjenjivost rješenja predstavljala odluku odabrati agregat ili ne. Kasnije je kontinuirana promjenjivost rješenja predstavljala izlaznu snagu iz IC motora u godini  $y$ , sezoni  $s$ , i satu  $i$ . Sljedeće jednadžbe predstavljaju proizvodne karakteristike od IC motora. One pokazuju da proizvedena snaga iz IC motora u svakom satu  $i$ , može uzeti vrijednost 0, ili neku drugu vrijednost između minimuma proizvodnje (sto je oko 30% maksimalne snage) i maksimuma proizvodnje (maksimalna snaga), ako je IC motor odabran. Gdje je  $P_{j=IC}$  ukupna snaga iz IC motora.

$$U_{jysi} = U_{jysi,load} + U_{jysi,batt} \leq \eta_{inv} \times P_{j=IC} \times X_{j=IC} \quad (2-18)$$

$$U_{jysi} = U_{jysi,load} + U_{jysi,batt} = 0 \text{ or} \\ = [0.3 \times \eta_{inv} \times P_{j=IC} \times X_{j=IC}, \eta_{inv} \times P_{j=IC} \times X_{j=IC}] \quad (2-19)$$

### 2.3.6. Promjenjiva rješenja i ograničenja akumulatora

U pravilu veličina kapaciteta akumulatora se mjeri u njegovoj amper-satnoj jakosti(AH). Promjenjiva rješenja za akumulatore su  $X_{j=batt}$  (integrirano promjenjivo rješenje koje predstavlja broj akumulatora), i  $U_{jysi,batt}$  (kontinuirano promjenjivo rješenje koje predstavlja izlaznu snagu iz akumulatora ili  $U_{batt,load}$  u godini  $y$ , sezoni  $s$ , i satu  $i$ ).

Ograničenja koja predstavljaju maksimalno dopušteno punjenje i pražnjenje struje moraju biti manja od 10% akumulatorskog AH kapaciteta i prikazana su u sljedećim jednadžbama.

$$\sum_{j=DCsources} U_{jysi,batt} + \eta_{inv} \times \sum_{j=ACsources} U_{jysi,batt} \leq (0.1 \times V_{sys} \times P_{j=batt} \times X_{j=batt}) \quad (2-20)$$

$$U_{jysi,load} \leq (0.1 \times V_{sys} \times P_{j=batt} \times X_{j=batt}) \quad (2-21)$$

Gdje je parametar  $V_{sys}$  napon sustava na DC sabirnici a parametar  $P_{j=batt}$  je kapacitet baterije u AH. Stanje punjenja (SOC) akumulatora za svaki sat  $i$  može se dobiti praćenjem punjenja i pražnjenja energije iz akumulatora, kako je prikazano u jednadžbi 2-22.



$$SOC_i = SOC_{max} - \sum_{n=0}^i \left( \sum_{j=batt} U_{jystload} \right) + \sum_{i=0}^i \left( \sum_{n=DCsources} U_{jystbatt} + \eta_{inv} \times \sum_{j=ACsources} U_{jystbatt} \right) \quad (2-22)$$

Važno je da se stanje punjenja akumulatora za svaki sat  $i$  može pratiti da bi se spriječilo previsoko ili prenisko opterećenje. Povezano ograničenje može se formulirati uspoređivanjem stanja punjenja (SOC) akumulatora za svaki sat  $i$  sa  $SOC_{min}$  akumulatora i sa  $SOC_{max}$  akumulatora kao u jed. 2-23. Ovo istraživanje upućuje na to da je  $SOC_{min}$  i  $SOC_{max}$  isto što i 20% i 100% vrijednosti AH kapaciteta akumulatora. Isto je tako zamišljeno da inicijalno stanje punjenja akumulatora je 100% kada se počne sa simulacijom.

$$\begin{aligned} SOC_i &\leq SOC_{max} \\ SOC_i &\geq SOC_{min} \end{aligned} \quad (2-23)$$

Na kraju, da bi sustav sa akumulatorom bio uravnotežen za duži period, stanje kapaciteta akumulatora na kraju simulacije mora biti veće od dobivenog postotka za njegov maksimalni kapacitet. Ovo istraživanje pokazuje 90%, kako je prikazano u jednadžbi 2-24.

$$SOC_{i=n} \geq 0,9 \times SOC_{max} \quad (2-24)$$

### 3. SIMULACIJA U PROGRAMSKOM PAKETU HOMER

Računalnim optimizacijskim programom, koji pojednostavljuje procjenu isplativosti samostalnih sustava i sustava povezanih s elektroenergetskom mrežom u raznim primjenama. Omogućava se definiranje modela s ulaznim podacima, koji opisuju tehnološke izbore, cijene komponenata, i raspoloživost izvora. Podaci se koriste za simulaciju različitih konfiguracija sustava, ili kombinaciju komponenata, i daje rezultate koji se mogu vidjeti kao lista ostvarivih konfiguracija sortiranih prema cijeni. Rezultati simulacija su prikazani i u različitim tablicama i dijagramima koji pomažu pri usporedbi konfiguracija i procjenama prema njihovim ekonomskim i tehničkim vrijednostima.

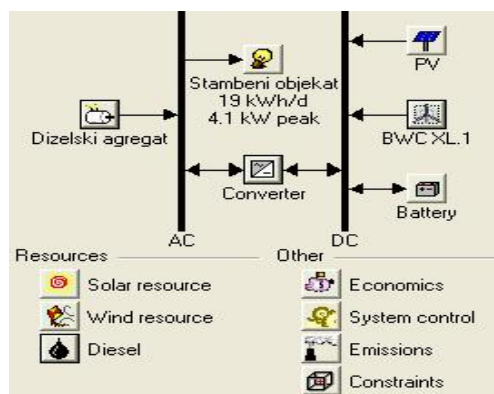
Ako se želi istraživati efekt promjena uzrokovane čimbenicima kao što su raspoloživost resursa i ekonomskih uvjeta sa ekonomičnošću drugačijih konfiguracija sustava, može se provesti analiza osjetljivosti. Pri izvođenju analize, pribavljaju se vrijednosti koje opisuju raspon promjene raspoloživosti sredstava i cijena komponenti. Program simulira svaku konfiguraciju sustava preko raspona vrijednosti. Rezultate analize osjetljivosti se koriste za identifikaciju čimbenika koji imaju najveći učinak na oblikovanje i rad sustava. Na osnovu rezultata proračuna analize osjetljivosti i odgovora o izboru tehnologije može se donijeti odluka o planiranju i upravljanju sustavom.

Simulira se rad sustava izračunavajući energetska bilancu za svaki od 8760 sati u godini. Za svaki sat, uspoređuje električne i toplinske zahtjeve tereta prema energiji koju taj sustav može opskrbiti i računa tokove energije prema i od svake komponente sustava. Za sustave koji uključuju baterije ili gorivom pokretane generatore, programski paket Homer također odlučuje za svaki sat o upravljanju generatorima i režimu rada baterija (punjenje i pražnjenje). Programski paket Homer proračunava energetske bilance za svaku konfiguraciju sustava koja se želi razmotriti, određuje da li je konfiguracija ostvariva, tj. može li udovoljiti zahtjevima korisnika, procjenjuje cijenu instaliranja, rada i održavanja sustava u životnom vijeku projekta. Sustavne troškovničke računice obuhvaćaju cijene kao na primjer investicije, zamjene, upravljanje i održavanje te cijena goriva i kamata. Nakon simulacija mogućih konfiguracija sustava, daje se lista konfiguracija, sortiranih prema troškovima, koje se mogu iskoristiti za usporedbu izbora dizajniranih sustava.

Zadatak je za proizvoljni model sustava izvršiti simulaciju u programskom paketu Homer. Simuliran je proces napajanja izdvojenog stambenog objekta pomoću vjetroturbine, solarnih ćelija i dizel agregata gdje je uzeta u obzir analiza osjetljivosti srednje brzine vjetrova [m/s] i dnevne sunčeve insolacije [kWh/m/d]. Projekt je zamišljen na životnom vijeku od dvadeset godina uz godišnju kamatu od 6 %.

Na slici 4.1. je prikazan model mreže koji napaja stambeni objekt pomoću tri glavna izvora vjetroturbine, solarnih ćelija i dizelskog agregata.





Slika 4.1. Model mreže

Mreža koristi dizelski agregat >5kW, izmjenjivač >4kW, baterije Trojan T-105 >28 kom., vjetroturbinu BWC XL.1 >4 kom., solarne ćelije (PV) >2 kW te stambeni objekt potrošne snage 19 kWh/d sa vršnom potrošnjom snage 4.1 kW.

### 3. ZAKLJUČAK

U radu je predstavljen optimizacijski model koji se koristi za dizajniranje optimalne strukture sustava obnovljivih izvora energije, uzvši u obzir troškove životnog vijeka sustava, dostupnost izvora, ekoloških troškova i uvjeta pouzdanosti. Opisan je matematički model za svaku proizvodnu tehnologiju, sa rješenjima promjenjivosti i odgovarajućim ograničenjima. Modelirani sustav uvelike ovisi o dostupnosti sunčeve energije i energije vjetra na lokalnoj razini. Istraživanje preporuča korištenje sunčevih izvora i izvora vjetra koji predstavljaju skup klimatskih podataka u jednoj godini. Zbog toga skup podataka predstavlja tipične vremenske uvjete. Praktična simulacija izvršena je u programskom paketu Homer koji obuhvaća sve aspekte pri traženju optimalnog sustava.

Usporedbom optimalnih sustava napajanja za različite vremenske intervale trajanja opterećenja, dolazi se do zaključka da su obnovljivi izvori energije zasad isplativi u slučaju kontinuiranog opterećenja. Razlog tomu je velik investicijski trošak sustava koji koriste obnovljive izvore energije za proizvodnju električne energije (posebice PV modula).

Sva optimalna rješenja zasnivaju se na generatoru kao glavnom izvoru energije, dok obnovljivi izvori energije služe za pokrivanje manjeg dijela opterećenja. U stvarnom samostalnom energetskom sustavu agregat je priključen direktno na sabirnice većih potrošača (pumpa za vodu, električno grijalo vode), dok obnovljivi izvori energije i baterije pokrivaju prosječna opterećenja (rasvjeta, TV, računalo, hladnjak i sl.).

Računalni simulacijski programi, u ovom slučaju Homer, služe kao pomoć pri odabiru najboljeg rješenja napajanja dislociranog objekta. Stvarno ponašanje sustava je moguće predvidjeti i matematički modelirati.

### 4. LITERATURA

- [1] Diplomski rad, Modeliranje obnovljivih izvora električne energije, Mato Lovtrenović, Osijek 2009.
- [2] Diplomski rad: Analiza i optimizacija različitih mogućnosti napajanja nn objekata iz obnovljivih izvora energije, Marijan Marković, Osijek 2007.
- [3] <http://uniled.hr/solarni-kolektori>
- [4] Further information of HOMER is available online at <http://analysis.nrel.gov/homer>, viewed as of 2004.
- [5] Pryor, T.L. and Wilmot, N.A., "The effect of PV array size and battery size on the economics of PV/Diesel/Battery hybrid RAPS systems", Solar '96 ANZSES Annual Conference, Darwin, October 1996.
- [6] Jennings, S. U., "Development and application of a computerized design tool for remote area power supply systems", Ph.D. Thesis, Murdoch University, 1996.
- [7] Schaffrin, C., *et al*, "SolSim and hybrid designer: self optimizing software tools for simulation of solar hybrid applications", in *Proc. at EuroSun'98*, September 1998, Portoroz.