

NA PUTU RAZVOJA ALKALNO METALNOG TERMoeLEKTRIČNOG PRETVARANJA

*Todorović M. S., Ećim O., Simić Lj.**

Ključne reči: *alkalno-metalno-termoelektrično pretvaranje, hibridizacija, kogeneracija, koncentrisano sunčevo zračenje, termodinamička analiza*

SAŽETAK:

U radu je opisan proces alkalno-metalno-termoelektričnog pretvaranja. Dat je koncept i matematički opis modela sprege sistema alkalno-metalnog-termoelektričnog pretvaranja (AMTEP-a) i sistema toplotnog pretvaranja visokokcentrisanog sunčevog zračenja (KSZ). Sprovedeno je analitičko određivanje i parametarska analiza termodinamičke efikasnosti KSZ-AMTEP-a uzimajući u obzir merodavne gubitke energije zračenja i toplote. Pored toga u radu se razmatra hibridizacija i kogeneracija kombinovanog ciklusa KSZ-AMTEP i ciklusa parnog postrojenja (CPP). Na kraju su definisani zadaci istraživačko-razvojnog rada ključni za dalji razvoj novih sistema i početak njihove efikasne primene za proizvodnju električne energije u decentralizovanim autonomnim sistemima industrijske termotehnike i termoenergetike.

1. UVOD

Na čelu razvoja novih tehnologija korišćenja sunčeve energije (SE) danas se nalaze tehnologije koncentrisanog sunčevog zračenja (KSZ). Tehnologije koncentrisanog zračenja kombinuju jeftinije optičke komponente - koncentratore sa visokoeffikasnim i zato znatno skupljim elementima odnosno komponentama za samo

* Prof. dr Marija Todorović, dipl.maš.ing, Olivera Ećim, dipl.maš.ing, Simić Ljiljana, dipl.maš.ing,

Odeljenje za energetska efikasnost, Poljoprivredni fakultet Univerziteta u Beogradu, Nemanjina 6, 11080 Zemun.

energetsko pretvaranje da bi se tako zbirno postiglo sniženje cene u odnosu na cene tehnologija korišćenja nekoncentrisanog sunčevog zračenja ([2],[3]).

Najpoznatija su tri sistema sa koncentracijom zračenja: sa paraboličnim koncentradorima za srednje temperaturno-toplotno pretvaranje, sistemi sa heliostatima i centralnim prijemnikom za visokotemperaturno pretvaranje i sistemi tanjirastih koncentratora koji se obično sprežu sa Stirlingovim ili Brajtonovim motorima za dalje pretvaranje u mehaničku odnosno električnu energiju uz realizaciju vrlo visokih temperatura radnih fluida i odgovarajuće visokih vrednosti stepena korisnosti. Pretvaranje toplotne energije u električnu može se ostvariti pomoću parne ili gasne turbine i neposredno alkalno-metalno-termoelektričnim pretvaranjem (AMTEP) ([1],[5],[6]). Alkalno-metalno-termoelektrično pretvaranje se danas smatra veoma izglednim sistemom za decentralizovane sisteme energetike.

2. PRINCIP RADA AMTEP SISTEMA

Pojava neposrednog pretvaranja sunčeve energije u električnu koju izaziva ekvivalent apsorbovane energije fotona se malazi u osnovi termodinamičkog kružnog procesa Webera [4] sa realnim fluidom natrijumom koji se pumpom potiskuje kroz visoko-temperaturnu zonu u kojoj se zagreva do temperatura između 500-800C. Zagrejani natrijum se zatim u jonskom obliku sprovodi kroz čvrsti elektrolit beta-aluminu. Pritom se rad ekspanzije natrijuma od ravnotežnog pritiska ili napona pare za temperaturu T_2 do napona pare za temperaturu T_1 transformiše u električni rad. Sa obe strane beta-alumina se nalaze porozne metalne elektrode između kojih se uspostavlja napon, zahvaljujući razlici slobodnih energija usled pada napona pare, odnosno pri zatvorenom kolu se dobija električna struja. Pare natrijuma se u hladjenom delu kondenzuju, a tečnost se pumpom ponovo vraća do isparivačkog dela. Weberov proces prema tome predstavlja klasičan desnokretni termodinamički kružni proces a odgovarajući tehnički sistem je bez pokretnih delova, izuzev pumpe za natrijum i to ga čini veoma atraktivnim za razvoj. Termodinamička efikasnost može da bude visoka. Kao i u mnogim drugim oblastima OIE tehnički problemi leže u domenu osobina materijala, i to pre svega u odnosu na tehnologiju proizvodnje i trajnost beta-alumina elektrolita. Pritisak radnog fluida na strani toplotnog izvora je jednak ili malo viši od ravnotežnog pritiska pare natrijuma na temperaturi T_2 . Tipičan pritisak je oko 0,6 bar pri 800C. Pritisak hladne strane je jednak pritisku pare, ili 5×10^{-5} bar pri 200C. Za prve laboratorijske rezultate razvoja sistema se saznaje godine 1968. kada istraživači Fordovih naučnih laboratorija iz Dearborna-a, Michigan, patentiraju natrijum-toplotni motor koji radi na AMTEP konceptu. O tehničkim realizacijama i razvoju tehnologije AMTEP-a se međutim tek počinje više da se piše i ozbiljnije radi devedesetih i to pre svega u odnosu na svemirsku primenu a od skoro i u odnosu na terestrijalnu ([5],[6]).

Danas AMTEP izlazi iz laboratorija i razvija se u primenljive sisteme male težine, dugotrajnog bezbednog rada za efikasno energetsko pretvaranje i proizvodnju

električne snage. AMTEP sistem je danas dimenzija i konfiguracije baterija koje proizvode jednosmernu električnu struju ako im je jedna strana u dodiru sa izvorom toplote od 600-850°C a druga strana u dodiru sa ponorom toplote temperature od 150 - 450°C, uz maksimalnu efikasnost oko 40%.

3. TERMODINAMIČKE OSOBINE KSZ - AMTEP SISTEMA

Predmet našeg razmatranja je spregnuti KSZ - AMTEP sistem za pretvaranje energije sunčevog zračenja u električnu energiju. Ukupna termička efikasnost KSZ - AMTEP pretvaranja se jednostavno može izraziti kao proizvod termičke efikasnosti prijemnika energije koncentrisanog sunčevog zračenja (PKSZ) i termičke efikasnosti AMTEP-a. U prijemniku energije koncentrisanog sunčevog zračenja se odvija visokotemperaturni deo procesa AMTEP-a te se trenutna termička efikasnost PKSZ-a u ovom slučaju može definisati kao količnik toplote primljene radnim fluidom i korisno upotrebijene za isparavanje natrijuma, odnosno rad izotermnog širenja q_{kf} i ukupnog energetskog protoka upadne energije koncentrisanog sunčevog zračenja q :

$$\eta = \frac{q_{kf}}{q} = 1 - \sum_{k=1}^m q_g / q, \quad (1)$$

U datom izrazu su sa q_g označeni ukupni gubici reflektovane energije zračenja i toplotni gubici PKSZ-a. Faktor koncentracije prijemnika je funkcija površine prijemnika koncentrisanog sunčevog zračenja PKSZ i površine polja koncentratara $CR = A_g / A_p$. Ukupna energija koncentrisanog sunčevog zračenja upadna na površinu A_p prijemnika koncentrisanog zračenja PKSZ je određena kao funkcija dela polja koncentratara pokrivenih reflektorima $\phi A_g = \phi \cdot CR \cdot A_p$, efikasnosti reflektora $\rho = 0,78 + 1,8 \times 10^{-4} \times (90 - h_s)^2$ i odgovarajućeg koeficijenta refleksije reflektora r i jednaka je $q = I_b \cdot \phi \cdot CR_e \cdot A_p \cdot \rho \cdot r$, pri čemu je sa CR_e označen efektivni faktor koncentracije pretvarača. Intenzitet direktnog zračenja u ravni koncentratara je određen kao funkcija direktnog normalnog zračenja B , ugla azimuta sunca a_s , časovnog ugla sunca h_s kao i ugla nagiba β sledećom jednačinom:

$$I_b = B \cdot \sin a (\cos \beta \cdot \sin a + \cos a \cdot \cos a_s \cdot \cos \beta) \quad (W/m^2) \quad (2)$$

U termodinamičkoj analizi koja sledi posmatramo inovativni prijemnik energije visokokcentrisanog sunčevog zračenja. Sunčevo zračenje propušteno transparentnom prekrivkom risivera i slojem tečnog fluida biva apsorbovano neselektivnom površinom apsorbera. Apsorbovana toplotna energija se prenosi na struju istog fluida koji prolazi kroz kanale integrisane u zid apsorbera. Visoko refleksivne površine unutrašnje strane zida risivera umanjuju spregu toplotnih gubitaka zračenjem konvekcijom i kondukcijom, a specifične osobina spektralnog ponašanja apsorbcione sposobnosti tečnog fluida u odnosu na infracrveno i sunčevo zračenje dodatno umanjuju gubitke.

Merodavni gubici energije q_g predstavljaju zbir gubitaka energije koncentrisanog zračenja usled refleksije površine prijemnika q_r i gubitaka toplote prijemnika q_{tg} :

$$q_g = q_r + q_{tg} \quad (3)$$

Gubici toplote prijemnika u stacionarnom režimu rada se sastoje od konvektivnih gubitaka toplote, gubitaka toplote provođenjem i gubitaka toplote zračenjem površine PKSZ-a. Gubici zračenjem su određeni su kao funkcija temperature površine PKSZ -a T_z , temperature okolnog vazduha T_a , veličine površine PKSZ-a A_p i koeficijenta emisije površine prijemnika ε :

$$q_z = \varepsilon \cdot \sigma \cdot A_p \cdot (T_z^4 - T_a^4) \quad (W) \quad (4)$$

Toplotni gubici usled konvekcije q_{kon} i provođenja toplote q_{pr} su određeni kao funkcija razlike temperature površine zida PKSZ-a i okolnog vazduha $(T_z - T_a)$, koeficijenta prelaza toplote konvekcijom h , koeficijenta provodljivosti toplote - k_z debljine - δ_z i površine zida prijemnika - A_z :

$$q_{kon} + q_{pr} = A_z (h + k_z/\delta_z) (T_z - T_a) \quad (5)$$

Prema tome ukupni toplotni gubici PKSZ-a su određeni izrazom koji sledi:

$$q_g = q_z + q_{kon} + q_{pr} = \varepsilon \cdot \sigma \cdot A_p \cdot (T_z^4 - T_a^4) + A_z (h + k_z/\delta_z) \cdot (T_z - T_a) \quad (6)$$

Trenutna termodinamička efikasnost AMTEP-a u stacionarnom režimu rada bez opterećenja određena je količnikom neto korisnog električnog rada W_k i toplote primljene od toplotnog izvora - PKSZ-a q_{krf} jednačinom:

$$\zeta = \frac{W_k}{q_{krf}} = \frac{W_1 - W_2}{L_2 + Q_2 + Q_3} = \frac{(T_2 - T_1)/T_2}{(T_2 - T_1)/T_2 [1 + C_p T_1/L] + T_1/T_2} \quad (7)$$

Gde je za jediničnu količinu natrijuma W_1 maksimalan rad dobijen izotermskom ekspanzijom radnog fluida (posmatran kao idealan gas) od pritiska P_1 do pritiska P_2 pri temperaturi T_2 , L_2 je toplota isparavanja pri temperaturi T_2 , q_2 i q_3 su respektivno toplota potrebna za izvođenje izotermске ekspanzije i toplota potrebna za povišenje temperature fluida od T_1 na T_2 . Rad W_2 potreban za povišenje pritiska tečnog natrijuma pri temperaturi T_2 od pritiska kondenzacije na pritisak isparavanja smatralo se da je dovoljno mali da se može zanemariti. Treba pomenuti da datom efikasnošću ζ nisu obuhvaćeni toplotni gubici AMTEP-a. Međutim, pri određivanju ukupne efikasnosti sistema KSZ-AMTEP-a najznačajniji je deo gubitaka toplote obuhvaćen datim modelom određivanja efikasnosti prijemnika.

Ukupna trenutna termička efikasnost spregnutog sistema prijemnika koncentrisanog sunčevog zračenja i alkalno-metalno-termoelektričnog pretvaranja

putem spregnutog sistema KSZ - AMTEP-a je jednaka proizvodu odgovarajućih trenutnih efikasnosti KSZ-a i AMTEP-a ($\eta_u = \eta \cdot \zeta$) i može se izraziti sledećom jednačinom:

$$\eta_u = \eta \cdot \zeta = \left(1 - \frac{q_r + q_z + q_{kon} + q_{pr}}{I_b \cdot \phi \cdot CR \cdot A_p \cdot r} \right) \cdot \frac{(T_2 T_1)/T_2}{(T_2 - T_1)/T_2 [1 + C_p T_1/L] + T_1/T_2} \quad (8)$$

Rezultati parametarske analize ukupne trenutne termičke efikasnosti u zavisnosti od faktora koncentracije i temperature isparavanja za različite vrednosti temperature kondenzacije, dati u ([3] i [7]), pokazuju da povećanje faktora koncentracije doprinosi značajnom povećanju ukupne trenutne termičke efikasnosti spregnutog sistema KSZ - AMTEP-a. Tako povećanjem temperature isparavanja uz povećanje faktora koncentracije posebno iznad vrednosti 1000 značajno se povećava efikasnost sistema. Na primer, za vrednost faktora koncentracije od 4000 trenutna termička efikasnost sistema dostiže čak vrednosti i veće od 50%.

4. ZAKLJUČAK

Iz sprovedene analize se vidi da se povećanje termičke efikasnosti sistema može ostvariti unapređenjem termičke izolacije toplotnog izvora i toplotnog ponora. Inovativna termička rešenja prijemnika koncentrisanog sunčevog zračenja i krajnje efikasna intenzifikacija prenosa toplote između toplotnog izvora i toplotnog ponora, jedne strane i "radnog tela procesa" AMTEP-a, druge, kao i nove tehnike efikasne izolacije odnosno sprečavanja razmene toplote između samog toplotnog izvora i toplotnog ponora, zajedno sa izborom i razvojem novih pogodnih materijala, mogu da budu dobra osnova za razvoj novog sistema sistema KSZ-AMTEP kao i da donesu unapređena rešenja i samog AMTEP-a. Za dostizanje efikasnosti od oko 40%, uz gustinu proizvodnje električne struje od 500 W/kg, potrebno je povećanje radnih temperatura i novi materijali. Ove vrednosti efikasnosti i gustine specifične proizvodnje, po jedinici težine, omogućile bi otvaranje nove primene AMTEP-a za hibridna električna vozila.

Najznačajniju primenu AMTEP sistem je do sada imao u svemirskom programu gde pouzdanost rada i mala specifična težina sistema za jedinicu proizvedene snage imaju posebno veliki značaj. Napori da se razvije AMTEP tehnologija za vasijski program proizveli su pretvarače sa pogodnim osobinama i za terestrijalne energetske sisteme i to posebno za energetske autonomne sisteme. Mada je AMTEP sistem primenljiv i prilagodljiv za različita goriva, odnosno energetske izvore, kao i za nivoe snage, primena sunčeve energije odnosno hibridizacija nesumnjivo dolazi u prvi plan za dalja istraživanja i razvoj. Primenom energije visoko koncentrisanog sunčevog zračenja, u kombinaciji sa nekim od klasičnih izvora, novi hibridni sistem KSZ - AMTEP postaje tehnologija sa potencijalom još nedostignute ukupne termodinamičke efikasnosti procesa proizvodnje električne energije. Pored toga kogeneracijom uz efikasnu

proizvodnju i potrošnju proizvedene električne i toplotne energije se postižu racionalizacija upotrebe i usporavanje iscrpljivanja fosilnih energetske resursa. KSZ - AMTEP sistemi se mogu na razne načine sprežati i sa drugim sistemima u traganju za novim osobinama integrisanih sistema. Tako termoelektrična postrojenja, na osnovi Rankinovog kružnog ciklusa, mogu da koriste toplotu koja se iz AMTEP procesa odvodi na nivou temperatura od oko 400K. Ovako kombinovanim tehnologijama očekuje se da se može postići ukupna termička efikasnost sistema i preko 60%.

LITERATURA

- [1] E. Sasakawa, et others: "Performance of the Terrestrial Power Generation Plant Using the Alkali Metal Thermo-Electric Conversion (AMTEC)", *Proceedings of the 25th Intersociety Conversion Engineering Conference*, vol 3, 1992, pp. 143-149.
- [2] Todorović M., Mentus S., Ećim O., Simić Lj.: "Termodinamička analiza alkalno metalnog termoelektričnog pretvarača sunčevog zračenja", *Peta međunarodna konferencija Tesla III Milenijum*, Beograd, 1996., pp. IV.87 - IV.94.
- [3] Ećim O., Todorović M.: "Uticaj faktora koncentracije sunčevog zračenja na efikasnost toplotnog pretvaranja i proizvodnju električne energije", *Međunarodni kongres KGH, Zbornik radova*, Beograd, 1996., pp.74-85.
- [4] N. Weber: "A Thermoelectric Device Based on Beta-Alumina Solid Electrolyte", *Energy Convers.* 14, no. 1, pp.1-8, 1974.
- [5] T. Cole: "Thermoelectric Energy Conversion with Solid Electrolytes", *Science*, Vol. 221, no. 4614, pp. 915-920, 1983.
- [6] K.R. Sievers, F.J. Ivanenok and K.T. Hunt: "Alkali Metal Thermal to Electric Conversion", *Mech. Engineering*, vol. 117, no.10, 1995, pp.70-76.
- [7] Todorović, M.S., Mentus, S., Ećim, O., Simić Lj.: "Co-generation and Hybridisation with Concentrated Solar Radiation for Decentralized Energy Supply", *The European Congress on Renewable Energy Implementation*, Athens, 1997.

APPROACHING DEVELOPMENT OF ALKALI METAL THERMOELECTRIC CONVERSION

ABSTRACT:

In this paper concentrated solar radiation (CSR) technology and possibility of its junction with alkali metal thermoelectric conversion (AMTEC) has been studied. Thermodynamic model of combined CSR - AMTEC system for the cogeneration of electric and thermal energy using hybridization of solar and fossil fuel is presented. Parametric system analysis has been performed and relevant results including instantaneous thermal efficiency of this innovative system are given. Finally, scientific and technological goals are defined, crucial for new system s further development.