

REVERZIBILNE HIDROELEKTRANE U USLOVIMA POVEĆANJA UDELA ELEKTRANA SA IZRAZITOM PROMENLJIVOŠĆU RASPOLOŽIVOSTI

Branislav ĐORĐEVIĆ¹ i Tina DAŠIĆ²

¹ Akademija inženjerskih nauka Srbije

² Univezitet u Beogradu, Građevinski fakultet

Najlakše se nameću, a najteže priznaju strateške zablude. Sada je čovečanstvo u jednoj od takvih zabluda zbog nekritičkog pristupa strategiji tzv. 'nulte emisije GSB'

REZIME

Uvođenje u elektroenergetske sisteme (EES) velikih snaga intermitentnih, naglo promenljivih izvora energije, solarnih i vetroelektrana, bez odgovarajućih energetske, ali i ekoloških analiza, stvara sve veće probleme u tim sistemima. Bez dubljih analiza se zatvaraju elektrane sa visokom pouzdanošću proizvodnje (velike TE i NE), da bi se zamenili sa navodno obnovljivim izvorima energije, koji su vrlo nepouzdati sa gledišta obezbeđivanja stabilnosti rada EES. U radu se kritički razmatraju posledice izgradnje solarnih elektrana i vetroelektrana. U nizu država to postaje ozbiljan problem, koji će se sve više zaoštavati. Mogućnosti da se problemi reše skladištenjem energije u baterijama su vrlo ograničenog dometa. Veoma često se pri planiranju solarnih i vetroelektrana ne vodi računa o činjenici da se sa takvim uređajima, čija izrada zahteva potrošnju velikih količina primarne energije, a koji se nakon nekog ograničenog vremena moraju potpuno zameniti, dovodi u pitanje atribut obnovljivosti tih intermitentnih izvora energije. U takvim okolnostima naglo raste potreba za uvođenjem u sisteme reverzibilnih hidroelektrana (RHE) i pumpno akumulacionih postrojenja (PAP), koji su neophodni da prime na sebe zadatke bilansiranja energije u sistemu i obezbeđivanje njegove stabilnosti u novim uslovima.

Podaci o prihvatanju članka

Primljen: 12.4.2023.

Ispravljen: 25.5.2023.

Prihvaćen: 3.6.2023.

Kontakt: branko@grf.bg.ac.rs

Ključne reči: intermitentni izvori energije, vetar, Sunce, skladištanje energije, reverzibilne hidroelektrane, akumulacije

1. UVOD

Logika razvoja mešovitih elektroenergetskih sistema. Elektroenergetski sistemi (EES) svih država duže od jednog veka razvijali su se kao mešoviti sistemi, izgradnjom elektrana čije su glavne odlike bile:

- (a) stabilnost i potpuna predvidivost obima proizvodnje,
- (b) fleksibilna upravljivost u pogledu podizanja i spuštanja opterećenja u skladu sa potrebama EES,
- (c) pouzdanost u pogledu upravljanja hladnom rezervom, rezervom u pripravnosti ('stand by') i rotirajućom rezervom,
- (d) stabilnost i predvidivost tokova i opterećenja na prenosnoj mreži, koja je bila realizovana u skladu sa lokacijama velikih elektrana i najvećih potrošačkih regiona.

Navedene odlike pouzdanosti, predvidivosti i upravljivosti omogućavale su skladno uklopljene u mešovite EES elektrane sledećih tipova:

- hidroelektrane raznih stepena regulisanja protoka, pri čemu je njihova pouzdanost rasla sa stepenom regulisanja protoka (najveću vrednost imaju akumulacione HE sa mogućnostima godišnjeg regulisanja);
- termoelektrane, čija je ključna vrednost stabilnost i potpuna predvidivost proizvodnje i pouzdanost planiranja isporuke određenih snaga, dok je

nedostatak sporost u prelasku iz hladne rezerve u rad, i postupnost u podizanju opterećenja;

- gasne elektrane, koje odlikuje značajna manevarska sposobnost, koja se jedino može meriti sa hidroelektranama;
- nuklearne elektrane (NE), sa odlikama sličnim termoelektranama, ali sa većom inercijom u radu, jer kod NE nije racionalno podizanje i skidanje opterećenja, zbog čega se pri planiranju proizvodnje smeštaju u donji, bazni deo dnevnog dijagrama opterećenja.

Osobine navedenih elektrana omogućavale su optimalno planiranje njihovog angažovanja tokom dana, nedelje, pa i na nivou izrade okvirnih godišnjih planova rada EES.

U drugoj polovini XX veka u EES se sve intenzivnije uvode i reverzibilne HE (RHE), sve većih snaga. Njihov glavni zadatak je bio da u takvim stabilnim i pouzdanim sistemima izbalansiraju viškove i manjkove energije, koji nastaju iz brojnih razloga, od kojih su najvažniji:

- vrlo neravnomerni vodni režimi koji dovode do kriznih malovodnih perioda, kada se smanjuje raspoloživost protočnih hidroelektrana;
- neravnomernost u potrošnji energije,
- havarijske situacije na elektranama, kada se odjednom pojave disbalansi na relaciji ‘proizvodnja – potražnja’ električne energije.

 U takvim uslovima su RHE postajale sve dragocenije, zahvaljujući svojim visokim manevarskim osobinama, posebno sposobnošću vrlo brzog ulaska u pogon i mogućnosti razvijanja celokupne instalisane snage.

Opasne strateške zablude sa obnovljivim izvorima energije. U poslednjoj deceniji XX veka svet je i organizaciono počeo da se bavi problemima koje izaziva sve veća emisija tzv. gasova staklene bašte (GSB) i potreba obuzdavanja porasta te emisije. Prva organizaciona akcija na planu smanjenja GSB bila je 1997. donošenje tzv. Kyoto protokola. Protokol nije ostvario očekivane efekte, a doveo je i do jedne opasne domišljatosti: pojedini veliki zagađivači su se dosetili da bukvalno trguju sa emisijama GSB, ne preduzimajući stvarne mere na smanjenju emisije i na zamenu prljavih tehnologija novijim, čistijim, sa manjim količinama čvrstog i tečnog otpada, i manjom emisijom GSB. Godine 2016. usvojen je tzv. Pariski sporazum, koga je prihvatilo 190 zemalja, sa kvantifikovanom dinamikom ‘dobrih želja’ o smanjivanju emisije GSB, supstitucijom energetske izvora koji emituju GSB drugim, navodno obnovljivim i ekološkim čistim izvorima energije (OIE). Sročena je i krilatica - ‘zelena agenda’, koja

podrazumeva, pored ostalog, tvrdnju o proizvodnji energije sa ‘nultim oslobađanjem ugljendioksida’! Prema tvrdnjama entuzijasta ‘zelene agende’, to će se postići gradnjom vetroelektrana i solarnih elektrana, uz zatvaranje termo u nuklearnih elektrana. Međutim, postavlja se pitanje kako to postići u uslovima kada proizvodnja u vertoparkovima pada naglo na manje od 10%, pa čak i nulu u odnosu na instalisanu snagu, a u solarnim elektranama se bukvalno menja trenutno i spada ispod 50% tokom oblačnog dana, a noću – na nulu.

Pariski sporazum je prikazivan kao spasonosni za planetu, međutim postoje određeni nedostaci, od kojih se dva uveliko iskazuju.

(a) Predviđena je mogućnost trgovine sa ‘kreditima’ za emisiju CO₂, što je stvorilo mogućnost za organizaciju prevara od strane najvećih emitera (detaljnije u [23]), čija je poenta iskazana i na popularan način: ‘Kada krene zlatna groznica, prvi se obogate prodavci lopata, a kada zavlada panika zbog globalnog zagrevanja planete onda prve milijarde zarade prodavci kredita za CO₂’. [Samo kao ilustracija. Neki vlasnik velikog kompleksa tropske šume u Amazoniji, koji je to neprocenjivo bogatstvo nekada kupio za samo 1 USD po hektaru, pismeno u vidu ugovora izjavi da odustaje od seče džungle. Za to svoje ‘žrtvovanje’ od posebne NVO koja je namenski i perfidno ugrađena u tu igru prevare dobije sertifikat o količini ‘uštedi’ CO₂ koja će se tim ugovorom ostvariti. Taj ‘altruista zaštite Amazonije’ taj sertifikat kao ‘kredit’ proda nekom velikom zagađivaču, a on za toliko smanji svoju ‘količnu’ zagađenja. Zapaziti: niko ništa nije uradio, svi su dobro zaradili, a ceh plaća planete Zemlja].

(b) Nije jasno definisano koji su to izvori zaista OIE, oni koji doprinose smanjenju emisije GSB, već je usvojena da su to sve solarne elektrane, vetrogeneratori, elektrane na biomasu, male hidroelektrane. To je dovelo do ekonomskog podsticaja razvoj tih OIE, uz obavezu elektroprivrednih preduzeća da tu energiju moraju da prihvataju, ma kada im se isporuči, u bilo kojoj količini, čak i onda kada u elektroenergetskom sistemu (EES) postoje viškovi mnogo jeftinije energije, od kojih su neke – na protočnim hidroelektranama – praktično besplatne. To je dovelo na stranputicu raniji veoma logičan razvoj EES, koji je sistematizovan u prvom stavu Uvoda ovog razmatranja. I dovelo je do velikih teškoća u upravljanju EES, jer se tim sistemima sada praktično ne može da upravlja po ranijim logičnim kriterijuma minimizacije troškova sistema i maksimizaciji njihove pouzdanosti.

Nepobitna je činjenica da su Sunce, vetar, biomasa i vodeni tokovi obnovljivi izvori energije, međutim neophodno je sagledati da li je i konkretan uređaj za iskorišćenje te energije zaista u klasi OIE. To je detaljno razmatrano u više radova [7, 9, 11], a ovde se samo navode ključne stavke koje je neophodno uzeti u razmatranje. Za građenje i izradu energetskih proizvodnih postrojenja troše se velike količine primarne energije: ▫ za proizvodnju potrebnih materijala, ▫ za građenje građevinskih delova objekata i hidromašinskih delova postrojenja, ▫ za izradu mašinskih i elektromašinskih proizvodnih tehnoloških uređaja, ▫ za održavanje tokom eksploatacije. Zbog toga je neophodno da se sve količine utrošene energije za materijale, građenje, izradu uređaja i njihovo održavanje, sa jedna strane, uporede sa energijom koja će se dobiti tokom čitavog radnog veka takvog uređaja, sa druge strane. Taj odnos se iskazuje preko pokazatelja EROI (Energy Return on Energy Invested) koji je detaljno opisan u više radova [18, 21, 5] u kojima su dati i rezultati analiza tog pokazatelja za različite energetske sisteme. Samo kao primer: za proizvodnju 1 kg aluminijuma potrebnog za građenje elektrane nepovratno se utroši oko 211 MJ primarne energije raznih vidova [19], sa tendencijom povećanja tog specifičnog utroška, jer se do rude dolazi u sve težim uslovima i na sve većim rastojanjima za transport.

Neophodno je analizirati i druge pokazatelje ([4, 7, 9, 11]) kao što su: vreme potrebno za vraćanje energije koja je već utrošena za građenje i održavanje uređaja, indeks 'strateškog prioriteta', kojima se egzaktno određuje da li se neki konkretan proizvodni uređaj zaista nalazi u klasi OIE. Kriterijum 'obnovljivosti' analitički je veoma jasan i logičan: status OIE ima smo onaj uređaj koji će tokom veka eksploatacije proizvesti više električne energije (mereno u J) od količine energije (takođe mereno u J) koja je utrošena za njegovu proizvodnju i održavanje tokom čitavog vremena korišćenja [22]. Međutim, strateška ekološka nevolja je mnogo veća i zbog toga što svi ti uređaji nisu ni ekološki 'čisti' ni poželjni. Naime, za neke od njih se tokom proizvodnje materijala, građenja i održavanja emituje veća količina GSB od količine koja će biti supstituisana / uštedena tokom čitavog veka korišćenja (primera radi, za proizvodnju 1kg aluminijuma emituje se oko 22,4 kg CO₂ [19]). Znači, takav uređaj, mada je na vetar, Sunce, vodu ili biomasu, u suštini je potrošač energije i zagađivač sa gledišta emisije GSB, i kao takav ne sme da ima tretman OIE, ne sme da uživa bilo kakve ekonomske podsticaje niti sme da bude favorizovan na način da ga EES mora prihvatiti čak i u uslovima kada takvi OIE remete optimalno upravljanje EES.

Međutim, taj logičan i jasan princip kvantifikacije energetskih postrojenja na OIE i one koji to nisu - nije unet u Pariski sporazum. Na sličan način se mogu analizirati i električni automobili, koji su, navodno, spas za planetu Zemlju. Tačno je da su oni veliki boljitak za gradove u kojima se kreću, ali se za njihovu proizvodnju (počevši od dobijanja neophodnih materijala, od kojih su mnogi energetski gledano veoma 'skupi') troši oko 30% više energije od one koja se troši za klasične automobile, i emituje preko 30% više GSB. Za planetu Zemlju je svejedno da li se ti gasovi emituju u rudnicima, koksarama, topionicama u Boru, Smederevu, Kini, Brazilu ili Mozambiku.

2. PROBLEMI KOJE STVARA UVOĐENJE U EES VEĆIH SNAGA OIE

Zbog navedenog neselektivnog i nekritičkog tretmana OIE, koji ne razgraničava elektrane / uređaje koji zaista jesu u klasi OIE i onih koji to nisu, nastalo je neselektivno nadmetanje u uvođenju u EES vetrogeneratora, solarnih elektrana, proizvodnji biogoriva, izgradnji MHE, najčešće onih čiji su energetski učinci zanemarljivi, a koje imaju brojne vrlo nepovoljne ekološke uticaje, jer razaraju najfinije hidrografsko-ekološke kapilare rečnih slivova, upravo one ekološke kapilare koji su najvitalniji za održavanje biološke raznovrsnosti širih prostornih celina. Sva ta neselektivna gradnja navodno OIE ima vrlo veliki uticaj na dosadašnje mešovite EES, pri čemu su bitne sledeće činjenice.

- Ukidaju se stabilni, pouzdani, predvidivi i upravljivi izvori energije (termoelektrane i nuklearne elektrane), znači, izvori koji su obezbeđivali punu bilansnu sigurnost EES. U nekim zemljama su kao rezultat političkih nagodbi, koje su isključivale bilo kakve energetske, ali i ekološke analize, već naprečac ugašene velike termoelektrane i nuklearne elektrane. Međutim, te iste zemlje energiju koja im je neophodna za popunjavanje manjkova kada otkazu elektrane na vetar i Sunce, kupuju upravo od zemalja koje nisu ugasile svoje TE, pa su zbog toga izložene sve većim pritiscima i kritikama upravo od tih svojih 'kupaca'.
- Stabilni i bilansno upravljivi i proizvodno predvidivi izvori energije zamenjuju se intermitentnim izvorima (*Lat. intermittens: onaj koji se prekida iznenada i nepredvidivo*) – Sunce i vetar – koji su izrazito nepredvidivi u pogledu raspoloživosti. Ta nestacionarnost, nepredvidivost, nagla promenljivost i neupravljivost dešava se u raznim intervalima vremena, kraćim i dužim, i upravo je to najnepovoljnija odlika tih

izvora energije. Neraspoloživost energije vetra može da traje i dugo i da bude upravo u vreme najvećih potreba za energijom. Npr. pri dugotrajnoj pojavi anticiklona, posebno u zimskim periodima, može da nastane dug, čak i nedeljama dugačak ‘period tišine’, bez vetra. A tada su, opet po meteorološkim i geofizičkim zakonitostima najniže temperature, jer dolazi do tzv. temperaturne inverzije, kada su temperature najniže upravo u dolinama (fenomen poznat na Pešteru, u Negotinskoj niziji, Vojvodini, Sarajevskom polju, Pelagoniji, itd.). Nažalost, taj fenomen anticiklona često je praćen i pojavom magle, tako da su tada oba OIE, vetar i Sunce, praktično dugoročno izbačeni iz funkcije.

- Međutim, još je nepovoljnija veoma brza i učestala promenljivost raspoloživosti energija vetra i Sunca. U kontinentalnom delu Balkana vetrovi nisu postojani, nisu predvidivi, kao što je to slučaj u zonama uz obale Severnog i Baltičkog mora, već se radi o vetrovima brze, nagle i nepredvidive promene brzina. Zato u slučaju da u EES na takvim područjima postoje velike instalisane snage u VE dolazi do naglih promena snaga vetrogeneratora, što je izuzetno nepovoljno sa gledišta upravljanja stabilnošću i pouzdanošću rada EES. Veoma je teško, najčešće i nemoguće naći odgovarajuće snage regulacionih hidroelektrana i/ili gasnih elektrana koje mogu da pouzdano prate takve nagle promene snage intermitentnih izvora.

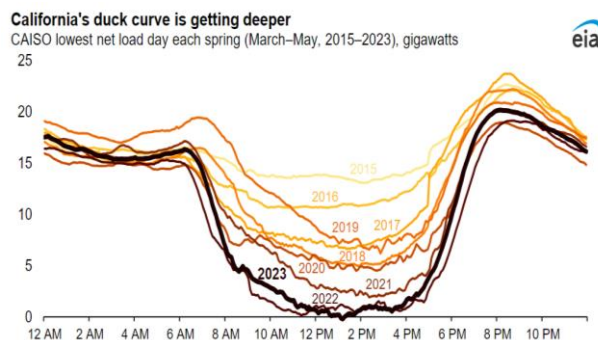
- Prenosna mreža u EES koja je decenijama građena i upotpunjavana, planirana je za konfiguracije elektrana sa klasičnim izvorima (lokacije TE velikih snaga, NE). Pošto se novi OIE nalaze i razvijaju na sasvim drugim lokacijama (veliki ‘vetroparkovi’ u dolinama i na planinskim grebenima, solarne elektrane na mestima na kojima ranije nije bilo elektrana, već samo potrošača), čitava mreža ne odgovara novoj situaciji, te će se javiti ‘uska grla’ u prenosnom sistemu, tako da treba postojećju mrežu vrlo radikalno dopunjavati, a negde i potpuno menjati. Ta pojava je uočena u EES sistemima niza zemalja, čak i pri instalacijama ne tako velikih snaga solarnih elektrana i vetroparkova.

- U ranijim okolnostima prenosni tokovi u mreži bili su potpuno predvidivi, upravljivi, postojanog smera prenosa – od velikih elektrana prema velikim konzumnim područjima. U novim okolnostima, kada će glavni izvori energije biti intermitentni (vetar, Sunce), veoma promenljivi, sa raspoloživošću koja se vrlo brzo menja, i što je najgore, što se menja naglo i nepredvidivo praktično u čitavom opsegu instalisanosti – od pune instalisane snage pa praktično do nule - i

prenosni sistemi postaje krajnje nestabilna, jer se stalo menjaju i smerovi tokova u njima, a i opterećenja.

U slučaju OIE pokazala se, kao mnogo puta ranije, ispravnost jednog od logističkih pravila: ‘Dobru ideju ne pratvaraj u dogmu i ne koristi je neselektivno, jer će se, kada postane dogma, izvrnuti u svoju suprotnost, koja može da nanosi više štete od koristi.’ Upravo to se sada sve više dešava sa gradnjom tih postrojenja. Gradnje navodno OIE sada se odvija dosta stihijski, u senci dve veoma ozbiljne krupne strateške greške: (a) nije jasno, egzaktno razgraničeno koji uređaji imaju zaista karakter OIE, odnosno uređaja koji smanjuju emisiju GSB, pa se podstiču i oni uređaji koji su i potrošači i zagađivači sa gledišta emisije GSB; (b) prilikom gradnje tih postrojenja ne rade se ozbiljnije analize kakve će posledice po EES, posebno po njegovu stabilnost, pouzdanost i upravljivost imati izgradnja tako velikih kapaciteta intermitentnih izvora.

Loši rezultati se već uočavaju na nizu mesta, ali su posebno pogodna za ilustriranje događanja na primeru Kalifornije [3], koji pokazuju da se ne mogu neselektivno i nekontrolisano dograđivati novi kapaciteti intermitentnih izvora energije (u ovom slučaju solarne elektrane), jer će posledice biti vrlo nepovoljne. Na slici 1 prikazana je sada već dobro poznata ‘Duck Curve’ za sistem u Kaliforniji, koja na najočitiji način pokazuje izazove sa kojima se susreću EES u kojima se nekontrolisano mnogo instališu kapaciteti izrazito intermitentnih elektrana, posebno solarnih elektrana (SE).



Slika 1. Kriva u obliku patke (Duck Curve), koja predstavlja neto potrebe za električnom energijom iz EES (potrebe umanjene za proizvodnju iz solarnih elektrana) tokom 24h (preuzeto iz [3])

Kriva neto potreba za električnom energijom je nazvana - 'Duck Curve' - jer asocira na patku, čiji prednji i zadnji delovi (glava i repni deo 'patke') predstavljaju noćnu potrebnu snagu (energiju) koja se ne menja značajnije, dok središnji, dnevni period pokazuje značajno smanjenje potrebne snage u period kada su solarne elektrane potpuno raspoložive. Taj fenomen je veliki izazov, jer dovodi do viškova energije tokom dana, sa brzim porastom debalansa, brzim porastom snage koju treba pokriti iz drugih elektrana, kako se spušta veće. Upravljanje EES u uslovima takvih debalansa je zadatak koji postaje eksponencijalno sve složeniji u uslovima nastavka prakse neselektivnog dograđivanja novih kapaciteta SE. Na slici 1 treba zapaziti koliko se povećao gradijent promene zahtevane snage u period pre zalaska sunca i koliko se smanjila potreba za električnom energijom iz drugih energetske izvora (osim solarnih elektrana) samo u poslednjih 6 godina (period 2017-2023).

3. MERE KOJE MORA DA PRATE UVOĐENJE INTERMITENTNIH IZVORA U SISTEM

Postalo je potpuno jasno da uvođenje većih kapaciteta intermitentnih izvora u EES mora da bude praćeno sa primenom dve grupe mera:

- (1) organizaciono-ekonomske mere, kojima će se regulisati koliko i pod kojim uslovima novi kapaciteti SE i VE mogu da se priključe u jedinstveni elektroenergetski sistem (EES);
- (2) stvaranje tehničkih uslova za skladištenje energije intermitentnih izvora, raznim vidovima konverzije, kako bi se viškovi energije iz perioda kada je ima više nego što je potrebno mogli iskoristiti u periodima manjkova. Slikovito, ti uređaji treba da obezbede izvesno bilansno 'peglanje' energetske učinaka takvih izvora.

3.1. Organizaciono-ekonomske mere

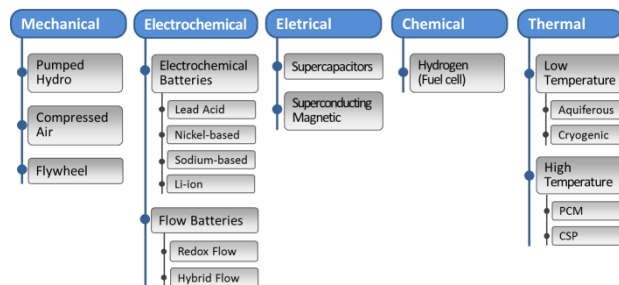
Proces sve većeg pritiska od strane investitora da im se dozvoli instalisanje novih kapaciteta SE i VE mora se energično i planski obuzdavati. Od više mera, svakako treba primenjivati bar sledeće dve:

- (a) Izdavanje dozvole za priključenje na EES samo nakon detaljne analize kako se ti novi kapaciteti uklapaju u EES, sa stanovišta pouzdanosti, upravljanja, regulacije.
- (b) Uvođenje adekvatne naknade / depozita po MW nove instalisane snage intermitentnih energetske izvora (SE, VE i ostalih), kako bi se pokrili povećani troškovi

koje EES ima zbog obezbeđivanja bilansne stabilnosti sistema, regulacije i održavanja pouzdanosti sistema na zahtevanom visokom nivou i nakon ugradnje novih kapaciteta takvih energetske izvora – koji, uvođenjem u EES narušavaju njegovu bilansnu stabilnost. U Sloveniji je već uočeno da obim zahteva za priključenje na mrežu proizvodnih SE uređaja počinje da prevazilazi opseg kapaciteta u mreži, da dolazi do prezasićenosti koja počinje da ometa normalan rad sistema, zbog čega su počeli da odbijaju zahteve za priključenje [13].

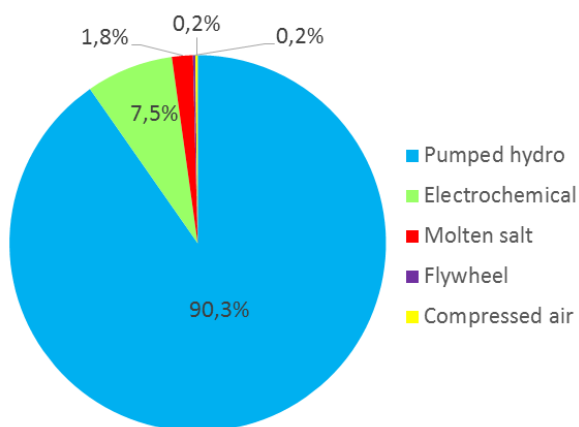
3.2. Mere skladištenja energije

Analize su pokazale da uključivanje u EES više od 20% intermitentnih energetske izvora može dovesti do značajne destabilizacije sistema [17]. Zbog toga je neophodno sprovesti planske i dugoročno strateški osmišljene mere pripremanja uređaja za skladištenje viškova energije koje je moguće koristiti u periodima deficita. S obzirom da je električna energija prelazni oblik energije, koji se ne može skladištiti, neophodno je transformisati je u neki drugi oblike, kao što je kinetička, potencijalna, elektromagnetna ili elektrohemijaska energija. Tehnologije skladištenja mogu se podeliti na više načina, ali se najčešće koristi podela prema obliku energije koji se skladišti na [27]: mehanička, elektrohemijaska, električna, hemijska i termalna (slika 2). Druga, za EES posebno značajna, podela je podela prema snazi, na sisteme male snage, namenjene uglavnom za kućnu upotrebu (koriste se najčešće u kombinaciji sa solarnim panelima) i sisteme velike snage koji se koriste u EES-ima (od 2020. godine veoma često se koriste kapaciteti snage 100 MW). Podela prema vremenu skladištenja energije, na: kratkoročno skladištenje, ograničenog trajanja (kao što je npr. skladištenje u obliku kinetičke energije u zamajcima velikih masa) i dugoročna skladišta, koja mogu da sačuvaju energiju više sati, pa i dana [26].



Slika 2. Klasifikacija tehnologija skladištenja energije prema obliku energije koja se skladišti [27]

S obzirom da uključivanje OIE u EES-e u velikoj meri zavisi od mogućnosti skladištenja energije, poslednjih godina ova oblast se ubrzano razvija. Veliki broj tehnologija skladištenja energije još uvek je u fazi istraživanja i razvoja (superkondenzatori, skladištenje magnetne energije, skladištenje komprimovanog vazduha adijabatskim postupkom, skladištenje vodonika i dr.), dok su određene tehnologije razvijene i koriste se dugi niz godina (reverzibilne HE, olovne baterije, kondenzatori, skladištenje komprimovanim vazduhom i dr.) [1]. Ukupni instalisani kapaciteti za skladištenje energije, na globalnom nivou, krajem 2020. godine iznosili su oko 191 GW [17], sa daleko najvećim udelom kapaciteta reverzibilnih hidroelektrana, koji je iznosio 172,5 GW, odnosno oko 90% (slika 3). Udeo elektrohemijskih tehnologija (baterije različitih tipova) iznosio je 14,1 GW, od čega su kapaciteti samo litijum-jonskih baterija iznosili 13,1 GW (6,8%).



Slika 3. Učešće pojedinih tipova skladištenja energije prema instalisanom kapacitetu 2020. godine [17]

Iako postoji veliki broj različitih tehnologija za skladištenje energije, u okviru ovog rada analiziraće se sledeće: (a) skladištenje u baterijama, (b) proizvodnja 'zelenog' vodonika i njegovo skladištenje, za korišćenje za pogon elektrana u periodima deficita; (c) izgradnja reverzibilnih hidroelektrana, koje bi bile u režimu pumpanja u periodima viškova, a tubiniranja i periodima manjkova energije.

(a) Skladištenje u baterijama / akumulatorima. Imajući u vidu tradiciju skladištenja manjih količina energije u akumulatorima (automobili, mali korisnici koji se snabdevaju iz vlastitih vetro ili solarnih uređaja, pa koriste akumulatora za stabilnost potrošnje), prvi argument kada se pomenu veliki problemi sa naglom

promenljivošću raspoloživosti VE i SE je da će se problem rešiti skladištenjem energije u baterijama / akumulatorima. Lak zaključak, ali izuzetno težak i energetski 'skup' zadatak za realizaciju. Sagledavajući taj problem detaljnije, otvara se niz problema, i u energetskom i u novčanom smislu, ali i sa gledišta brojnih vrlo ozbiljnih ekoloških posledica.

Svi tipovi baterija / akumulatora prave se od energetski (a time i novčano) veoma 'skupih', a ekološki zahtevnih materijala. Njihova energetska 'skupoća' posledica je činjenice da se radi o retkim metalima (npr. litijum) koji se u prirodi nalaze u vrlo rasutom stanju, pa je za njihovu proizvodnju potreban iskop velikih količina materijala, za čiji se iskop, transport koristi nafta. Ogromne količine raznih vidova primarna energije se troše i u procesu prerade i ekstrakcije tih materijala, bilo neposredno, u samom tehnološkom procesu, ili tokom dobijanja i izrade neophodnih materijala (hemikalije itd.) koje su ogromni 'gutači' energije. Te ogromne količine primarne energije koja se mora utrošiti za dobijanje materijala za baterije moraju se uračunati prilikom energetskog vrednovanja OIE, jer se tek tako može sagledati stvarna priroda 'obnovljivosti' SE i VE.

Ekološka 'zahtevnost' tih materijala posledica je niza veoma ozbiljnih ekoloških problema koji nastaju u procesu dobijanja materijala za akumulatora / baterije. Samo neki od njih: problem iskopa i deponovanja ogromnih količina jalovine i sanacija tih deponija da ne bi pogibeljno uticale na okruženje (erozija deponija i dospevanje tih opasnih supstanci u hidrografsku mrežu i izvorišta), uticaj na površinske i podzemne vode, korišćenje opasnih hemikalija u tehnološkom procesu prerade i njihov uticaj na okruženje, razarajući trajni uticaj na pejzažne vrednosti, koje su veoma bitan resurs, uticaj na floru i faunu, itd.

Kapaciteti baterija potrebnih za skladištenje energije intermitentnih izvora (SE i VE) su različiti, jer zavise od konkretnog podneblja na kome se postrojenje nalazi. Procenjuje se [16] da je u uslovima Kalifornije kapacitet akumulatora za skladištenje treba da iznosi oko 200 MWh za svaki instalisani MW u SE ili VE, dok bi u Nemečkoj to iznosilo oko 150 MWh po MW instalisane snage. Trenutna okvirna cena skladištenja u akumulatorima je oko 600.000 USD/MWh. Do tako velikih količina retkih metala, neophodnih za proizvodnju potrebnih (veoma velikih) kapaciteta akumulatora, ne može se doći čak i po cenu ekološke destrukcije ogromnih sada očuvanih područja. Ako se ima u vidu svima znana činjenica, da se akumulatori

nakon relativno kratkog vremena korišćenja moraju da promene, to postaje nerešiv problem.

Sve češće se govori i o činjenicama koje daju drugu sliku o ostvarivosti 'net zero' strategije sa SE i VE bez ikakve podrške elektrana koje su neophodne za obezbeđivanje pune bilansne sigurnost. U nastavku se navode samo neke od njih [2, 16, 23].

- Poznati britanski energetski stručnjak Brajan Lejland, koji kategorički tvrdi da ne postoje mogućnosti za energetski, ekonomski, ali i ekološki održivo rešenje skladištenja planiranih kapaciteta SE i VE, ima i duhovit komentar na usvojenju 'net zero' strategiju samo sa SE i VE, u uslovima nerešenog problema skladištenja, poredeći to sa optimizmom čoveka koji je bez padobrana iskočio iz aviona, uveren da će padobran biti pronađen, napravljen, njemu dostavljen, namešten i otvoren pre no što on stigne na zemlju.
- Skeptična razmatranja skladištenja u akumulatorima kvantifikovana su i nekim ciframa. Imajući u vidu dostignut stepen instalisanosti SE i VE, planove o daljoj gradnji objekata koji su već započeti, kao i veliki problem obaveze periodične zamene akumulatora, sračunato je da bi sa već pomenutim nepohodnim kapacitetima akumulatora po MW instalisane snaga, trebalo svakih 10 godina zamenjivati 2,5 milijarde tona akumulatora, što rečito govori o neopravdanom optimizmu 'net zero' strategija koja se zasniva samo na SE i VE.
- U EU i UK GB instalisana je snaga u VE od oko 236 GW, a samo je jednom razvijena snaga od oko 103 GW, a u ostalo vreme znatno manje od toga.
- Suočeni sa nerešivim problemima pouzdanog pokrivanja konzuma, u uslovima kada su jako smanjene mogućnosti da se kupi i uveze od suseda 'prljava', ali bilansno pouzdana energija iz TE i NE, nemački energetski gigant RWE je počeo u Severnoj Rajni – Vestfaliji da demontira vetrogeneratore koji su (optimistički!) postavljeni na jednom ugljenom reviru, kako bi stvorio prostor za proširenje površinskog kopa rudnika lignita. Asistirala je i policija, kako bi uklonila ostrašćene ekološke aktiviste, koji su se protivili toj akciji, jer žive u iluziji 'net zero zelene agende', samo sa SE i VE [25].
- Tek sada počinje da se, još uvek stidljivo, govori o problemu i troškovima nove prenosne mreže u uslovima sasvim novih lokacija i izmenjenih konfiguracija velikih proizvodnih sistema SE i VE. Mreže razvijane u uslovima elektrana (TE i NE) koje se sada zatvaraju ne odgovaraju novim uslovima i moraju da se radikalno dopunjavaju i rekonstruišu. Okvirno je sračunato za UK GB da će promena mreže koštati najmanje oko 1000 milijardi GBP. Ako se to prebaci u energetske jedinice, kojima se jedino i može da ocenjuje da li je postrojenje zaista u klasi OIE (ako se sračuna

energija neophodna za proizvodnju potrebnih količina čelika, bakra, aluminijuma, cementa i agregata za beton, itd., neophodnih za građenje nove mreže, i to dodalo u bilans utrošene primerne energije za te nove sisteme), sigurno bi se dobila drukčija slika stvarne obnovljivosti tih novih navodno obnovljivih elektrana. Ali, dobila bi se i sasvim drukčija slika njihove stvarne ekološke opravdanosti, sa gledišta bilansa GSB, jer se retko govori o činjenici da su tokom proizvodnje tih materijala - čelika, bakra, aluminijuma, cementa, plastike i drugih materijala potrebnih za građenje dodatne mreže - emituju velike količine GSB, negde u svetu, a za planetu nije bitno gde.

(b) Proizvodnja 'zelenog vodonika'. Suočen sa sve većim energetskim izazovima, u svetu se postepeno, još uvek na nivou načelnih razmatranja, formira tzv. 'vodonična strategija' energetskog razvoja. Najpre bitno razgraničenje. Uslovno, razlikuju se tzv. 'plavi vodonik', koji se dobija iz prirodnog gasa, iz koga se izdvaja vodonik, a kao nusprodukt CO₂, koji se izdvaja i skladišti. Za razliku od njega, 'zeleni vodonik' se dobija elektrolizom vode, uz ogromni utrošak električne energije, a atribut 'zeleni' dobija, pored ostalog, jer se pretpostavlja da se potrebna električna energija dobija samo iz OIE. Pošto se u 'zelenoj agendi' i prirodni gas nalazi na listi energeneta koji će biti zabranjeni, ostaje tzv. 'zeleni vodonik' koji se dobija korišćenjem električne energije koja se dobija iz OIE. Ocenjuje se da će tokom nekog sada nedefinisanog vremena proizvodnja, skladištenje i upotrebe 'zelenog vodonika' postati jedan od načina skladištenje energije iz SE i VE, ali se još uvek ne mogu davati preciznije ocene o vremenu i načinu korišćenja, jer se radi o energetski veoma skupoj konverziji. Sve zamlje se postepeno okreću ka 'vodoničnoj strategiji', ali je, za sada, sve na nivou načelnih razmatranja, pa se u okviru ovog rada ne može detaljnije razmatrati. I Srbija radi na formulisanju svoje 'vodonične strategije', ali su to, za sada, samo dosta načelna razmatranja na nivou eksperata.

(c) Reverzibilne hidroelektrane. Treća mera za skladištenja energije i 'peglanja' bilansa 'proizvodnja - potrošnja' u uslovima povećanih instalisanih kapaciteta SE i VE priključenih na EES su - reverzibilne hidroelektrane [20]. To je ne samo isproban i pouzdan način skladištenja energije, već se na taj način obezbeđuju energetski objekti koji su odlično rešenje za sve vrste neophodnih rezervi u EES, za regulaciju sistema i za obezbeđivanje visoke pouzdanosti funkcionisanja EES i u uslovima kriznih stanja. U uslovima sve većih instalisanih snaga intermitentnih

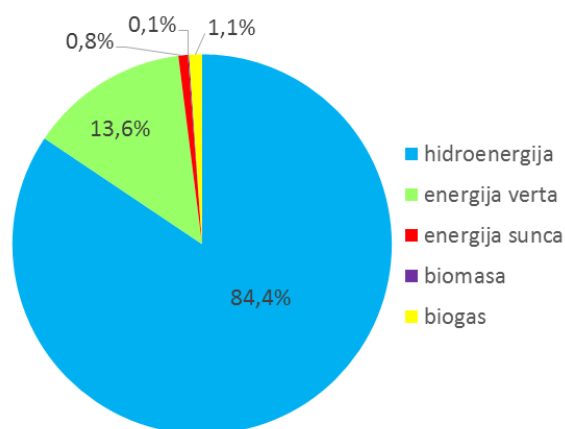
izvora energije (VE i SE) naglo raste 'glad' za uključivanjem u EES novih kapaciteta reverzibilnih elektrana, naročito onih sa većim mogućnostima regulisanja protoka. Dobar primer je RHE Bajina Bašta koja je kao postrojenje sa velikom zapreminom gornje akumulacije i velikom instalisanom snagom (dve reverzibilne mašine snaga $2 \times 307 = 614$ MW) mnogostruko isplatila sebe uključivanjem u turbinski režim rada u brojnim kriznim situacijama u EES Srbije.

4. OBNOVLJIVI IZVORI ENERGIJE U SRBIJI

Elektroenergetski sistem Srbije je mešovitog tipa, sa značajnijim udelom sledećih elektrana:

- termoelektrana - 6 termoelektrana ukupne instalisane snage 4.079 MW
- termoelektrana-toplana – 3 elektrane instalisane snage 297 MW
- hidroelektrana – 15 hidroelektrana instalisane snage 2380 MW, jedna RHE snage 614 MW i 15 malih HE snage 21 MW u sastavu EPS-a i još oko 154 MHE snage 97,61 MW
- vertoelektrana – 6 vetroparkova instalisane snage 398 MW,
- solarnih elektrana – preko 110 elektrana instalisane snage 23 MW, od kojih je najveća SE DELasol snage 9,9 MW, koja je puštena u rad u aprilu 2023. godine
- biogasnih elektrana – kojih ima 28, instalisane snage 27 MW, dok su 73 u izgradnji, snage oko 70 MW.

Obnovljivi izvori energije u Srbiji učestvuju sa oko 37% u instalisanoj snazi i sa oko 30% u energetske proizvodnji. Udeo pojedinih obnovljivih energetske izvora prikazan je na slici 4.



Slika 4. Zastupljenost pojedinih OIE u Srbiji prema instalisanoj snazi i sa oko 30% u energetske proizvodnji. Udeo pojedinih obnovljivih energetske izvora prikazan je na slici 4. <https://oie.rs/oie/>

Sa povećanjem udela intermitentnih energetske izvora (verat i sunce) javlja se potreba za skladištenjem energije. U Srbiji je ocenjeno, sasvim ispravno, da je od ranije navedenih načina skladištenja, sa gledišta strukture njenog EES najpogodnije da se sistem dopunjava sa reverzibilnim hidroelektranama raznih tipova.

Reverzibilne hidroelektrane, zajedno sa akumulacionim hidroelektranama imaju važan zadatak u regulaciji rada EES. Rade samo u vršnim delovima dijagrama opterećenja, obave izuzetno važan zadatak pokrivanja tog vršnog dela dijagrama, koji je i krizan sa gledišta rada sistema, a zatim se isključuju i prelaza u 'rezervu u pripravnosti'. Taj vid rezerve je od izuzetnog značaja za EES, za njegovu regulaciju i pouzdanost funkcionisanja, jer ga čine samo one elektrane koje su u stanju da za najkraće vreme, koje se meri minutima, prime puno opterećenje i izvrše regulaciju sistema u kriznom razdoblju. Pored ove rezerve u pripravnosti, EES mora da ima, za pouzdani rad, još dve rezerve: 'toplu rezervu', koje čine TE čiji su kotlovi zagrejani i koje mogu da prime puno opterećenje za vreme do oko 1 sat, kao i 'hladnu rezervu', koju čine termoagregati koji su raspoloživi, i koji mogu da prime opterećenje u roku od nekoliko sati. Smatra se, da bi jedan EES bio pouzdano obezbeđen, treba da ima 'hladnu rezervu' ne manju od oko 6-8% od maksimalnog godišnjeg opterećenja.

Tipovi reverzibilnih hidroelektrana

Postoji niz sistematizacija tipova RHE, ali sa gledišta ovog razmatranja su bitna samo sledeće dve podele.

(1) *Po povezanosti sa hidrografskim sistemom.* Moguća su tri tipa RHE.

- Recirkulaciona RHE - donja akumulacija nalazi se na vodotoku, gornja je u dolini bez dotoka, ili sa vrlo malim dotokom (površinsko i podzemno slivanje u gornju akumulaciju).
- RHE otvorenog tipa - i gornja i donja akumulacija su na vodotocima, tako da se iskorišćava i vodni potencijal gornjeg vodotoka.
- RHE zatvorenog tipa – ni jedna od akumulacija se ne nalazi na vodotoku, već se u potpuno zatvorenom ciklusu koristi samo vode koja je na neki način dovedena u taj sistem kao 'prvo punjenje'. Radi se o novom tipu RHE, koji tek počinje da se uvodi u EES, a moguće je, pored prirodnih depresija koristiti i napuštene rudnike.

(2) Podela po stepenu mogućeg izravnavanja

- RHE sa dnevnim regulisanjem. To su RHE sa akumulacijama relativno manjih zapremina, koje omogućavaju da se bilans pumpnog punjenja i turbinskog pražnjenja gornje akumulacije zaokružuje u toku jednog dana, tako da se uloga takve RHE svodi na regulisanje na nivou bilansa dnevnog dijagrama opterećenja. Takve RHE bile bi vrlo korisne u blizini većih instaliranih kapaciteta solarnih elektrana, kod kojih je izrazito neravnomerna proizvodnja SE na nivou dana. Tada se u ovakoj RHE dnevni bilansni viškovni energije utroše na pumpanje, da bi se turbiniranjem tokom noći pokrili bilansni manjkovi.
- RHE sa nedeljnim regulisanjem imaju veće zapremine akumulacija (posebno je važno da bude veća gornja akumulacija), što im omogućava da cikluse bilansa pumpanja i turbiniranja zatvaraju približno na nivou sedmice. To im omogućava da pokrivaju neravnomernosti na nivou dana, ali i na nivou sedmice, koja ima radne i neradne dane.
- RHE sa sezonskim regulisanjem su izuzetno vredne i ako postoji prostor na kome se može realizovati takav objekat, uz prihvatljivo uklapanja u socijalno, ekološko i drugo okruženje – taj prostor bi trebalo tretirati kao nacionalni prirodni resurs najvećeg značaja. Takve RHE imaju zapremine akumulacija, koje im omogućavaju da planskom dinamikom pumpanja i turbiniranja ublažavaju i regulišu i sezonske / godišnje neravnomernosti: veće pumpanje u hidrološki povoljnim režimima, kada se puni gornja akumulacija i veće turbiniranje u kriznim periodima dijagrama opterećenja. RHE Bajina Bašta spada u takve RHE i zato je njena uloga i energetska, ali i vodoprivredno izvanredna, jer omogućava interventno turbiniranje u kriznim periodima, tako da pored veoma dragocene rezervne snage predstavlja i rezervu energije sistema.

Reverzibilne hidroelektrane u Srbiji

U svetu su realizovane brojne RHE, kao i pumpno-akumulaciona postrojanja (PAP) - kojima se u visoko locirane akumulacije klasičnih hidroelektrana ubacuju dodatne količine vode iz vodotoka / akumulacija koji se nalaze na nižim horizontima, kako bi se povećala količina vode koja će se hidroenergetski iskoristiti na znatno većem padu. U Srbiji je realizovana samo jedna

recirkulaciona RHE – RHE Bajina Bašta i jedno pumpno-akumulaciono postrojenje PAP Lisina.

RHE Bajina Bašta puštena je u rad 1982. godine. Ideja za izgradnju ovog postrojenja rezultat je nastojanja da se dograde i poboljšaju performanse akumulacione HE Bajina Bašta na reci Drini. Zbog toga je donja akumulacija RHE Bajina Bašta jezero Perućac (HE Bajina Bašta), dok se gornja akumulacija Zaovine nalazi se na planini Tari. Akumulacija je formirana izgradnjom brane Lazići, na reci Beli Rzav, relativno malog protoka (od oko 0,55 m³/s). Korisna zapremina akumulacije iznosi 150×10⁶ m³, a maksimalan neto pad 610 m. Derivacija se sastoji od tunela dužine oko 8 km i cevovoda dužine oko 1750 m. Postrojenje se sastoji od dve jednostepene reverzibilne Francisove mašine snage po 307 MW. Instalirani protok RHE iznosi 126 m³/s, a prosečna godišnja proizvodnja 630 GWh.

PAP Lisina je pumpno postrojenje sa akumulacijom Lisina na spoju Lisinske i Božičke reke, zapremine 9,3×10⁶ m³. Iz akumulacije se pumpa voda pumpama (sa maksimalnim naporom od 350 m) u sliv Vlasinskog jezera, odakle se sistemom kanala dovodi u Vlasinsko jezero. Instalirana snaga PAP Lisina iznosi 28,6 MW, a instalirani protok 2×3,75 m³/s. Godišnje se prepumpa oko 75×10⁶ m³, da bi se ta voda kao dodatni potencijal koristila na 4 stepenice hidroelektrana Vlasinskog sistema (HE Vrla 1-4), na bruto padu od oko 884 m. Energetski i ekonomski efekti su veliki, a posebno je bitna činjenica da se pumpa u vreme povoljnije energetske situacije, korišćenjem jeftinije bazne energije, a proizvedena energija kaskade HE Vrla 1-4 se plasira u vreme vršnih opterećenja i u kriznim energetska stanjima. Po svim pokazateljima to je jedan od najboljih projekata u elektroenergetici Srbije.

RHE Bistrica je planirana elektrana, koja treba da služi i kao skladište potencijalne energije. Ideja o izgradnji ove RHE, u cilju proširenja postojećeg sistema elektrana na Uvcu, dosta je duga. Urađena je i više puta inovirana projektna dokumentacija, ali su se tek sada stekli uslovi za realizaciju tog sistema. Kao donja akumulacija koristi se akumulacija HE Potpeć, dok se gornja akumulacija formira na reci Uvac, izgradnjom brane na profilu Klak (nizvodno od postojeće brane Radoinja). Važno ograničenje za definisanje konfiguracije sistema je da akumulacija Klak ne sme da ugrozi akumulaciju Radoinja, koja se pored proizvodnje hidroenergije (u HE Bistrica) koristi i za vodosnabdevanje (Priboj i okolina), a potencijalno je izvorište i za šire područje. Zbog toga je, najnovijim rešenjem, usvojena kota

normalnog uspora u akumulaciji Klak koja je niža od kote krune preliva brane Radoinja. RHE Bistrica koristi bruto pad od oko 380 m. Sastoji se od 4 reverzibilna agregata, ukupnog instalisanog protoka u turbinskom režimu od 216 m³/s i snage 650 MW.

5. ZAKLJUČAK

Napori da se ublaže posledice klimatskih promena i da se smanji emisija gasova staklene bašte uticali su na ubrzani razvoj i uključivanje u EES-e obnovljivih izvora energije, kao što su vetar i Sunce. Međutim, radi se o neravnomernim i nepredvidivim (intermitentnim) energetskim izvorima. Sa povećavanjem udela takvih elektrana javljaju se problemi sa balansiranjem i bilansiranjem sistema, zbog čega je potrebna veća rezerva, posebno rotirajuća rezerva u sistemu. Pored toga, za izradu pojedinih elementa koriste se tehnologije koje su veliki potrošači primarne energije i veliki zagađivači (emiteri gasova staklene bašte, prvenstveno CO₂). Da bi takve elektrane dobile atribute čistog i obnovljivog izvora energije neophodno sprovesti detaljniju analizu, koja podrazumeva određivanje ukupno utrošene primarne energije i energije koja se može dobiti tokom radnog veka elektrane, kao i sagledavanje količine GSB koji se emituju tokom izrade elemenata sistem i efekata tih postrojenja na smanjenje emisije iz postrojenja koja koriste fosilna goriva. Problem čuvanja (skladištenja) energije, posebno je aktuelan. Iako se razvijaju različite metode skladištenja, RHE su i dalje po mnogim parametrima (snaga, vreme mogućeg čuvanja energije i dr.) najbolji način čuvanja energije.

LITERTURA

- [1] Beaudin, M., Hamidreza, Z., Anthony, S., William, R. (2010): Energy storage for mitigating the variability of renewable electricity sources: An updated review, *Energy for Sustainable Development* 14, 302–314, doi:10.1016/j.esd.2010.09.007
- [2] Blackman, D. (2023): There is no green 'transition' to renewable energy. China and India are playing us for fools, *The Telegraph* <https://www.telegraph.co.uk/news/2023/08/16/renewable-energy-green-transition-power/>
- [3] Bowers, R., Fasching, E., Antonio K. (2023): As solar capacity grows, duck curves are getting deeper in California, 21.6.2023. <https://www.eia.gov/todayinenergy/detail.php?id=56880>
- [4] Daaboul, J., Moriarty, P., Palmer, G., Honnery, D. (2022): Making energy green – A method for quantifying the ecosystem maintenance energy and the green energy return on energy invested, *Journal of Cleaner Production* 344 (2022) 131037, doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.131037
- [5] Dašić, T., Đorđević, B., Moskovljević, J. (2022): Hidroenergetski potencijal – najpouzdaniji i sve neophodniji obnovljivi izvor energije, *Vodoprivreda* Vol. 54, No. 319-320 (p. 225-238)
- [6] Đorđević, B., Opricović S. (1995): Metodika za ocenjivanje i rangiranje vodoprivrednih projekata, *Građevinski fakultet, Beograd.*
- [7] Đorđević, B. (2001): Hidroenergetsko koorišćenje voda, *Građevinski fakultet u Beogradu, monografija, 542 st, ISBN 86-7518-017-9*
- [8] Đorđević, B. (2018): Građenje elektrana na Morači je odličan projekat, Objavljeno na sajtu: <http://www.elektroenergetika.info/balkanceli.php?sifra=3912&strana=>
- [9] Đorđević, B. (2018): Istine i zablude o obnovljivim i ekološki 'čistim' energijama, *Balkan magazin* <http://www.balkanmagazin.net/nauka/cid144-195953/istine-i-zablude-o-obnovljivim-i-ekoloskim-cistim-energijama>
- [10] Đorđević, B., Dašić, T. (2019): *Ekologija vodoprivrednih sistema. Monografija. Izdavači: Građevinski fakultet u Beogradu i Akademija inženjerskih nauka Srbije, s. 450, ISBN 978-86-7518-295-4*
- [11] Đorđević, B. (2019): Energetsko, ekološko i razvojno vrednovanje malih elektrana, Naučni skup: Uticaj malih hidroelektrana na životnu sredinu, *Zbornik radova SANU, Beograd, 6. jun 2019.*
- [12] *Energija Balkana* (2023): <https://energijabalkana.net/sve-vise-zemalja-eu-se-okrece-nuklearnoj-energiji-kako-bi-dostigle-ciljeve-dekarbonizacije/>
- [13] *Energija Balkana* (2023): <https://energijabalkana.net/prosle-godine-slovenija-je-odbila-oko-petinu-zahteva-za-solarne-elektrane-za-sopstvenu-potrosnju/>

- [14] Gimeno-Gutiérrez, M., Lacal Arántegui, R. (2013): Assessment of the European potential for pumped hydropower energy storage. A GIS-based assessment of pumped hydropower storage potential, Joint Research Centre, JRC scientific and policy reports
- [15] Lacal Arántegui, R., Fitzgerald, N., Leahy, P. (2012): Pumped-hydro energy storage: potential for transformation from single dams, Joint Research Centre, JRC scientific and policy reports
- [16] Leyland, B. (2023): The wind and solar power need storage, 17.5.2023. <https://www.bassettbrashandhide.com/post/bryan-leyland-the-wind-and-solar-power-need-storage>
- [17] Muhammed Y. Worku (2022): Recent Advances in Energy Storage Systems for Renewable Source Grid Integration: A Comprehensive Review, *Sustainability* 2022, 14, 5985. <https://doi.org/10.3390/su14105985>
- [18] Murphy, D.J., Raugei, M., Carbajales-Dale, M., Rubio Estrada, B. (2022): Energy Return on Investment of Major Energy Carriers: Review and Harmonization. *Sustainability* 2022, 14, 7098. <https://doi.org/10.3390/su14127098>
- [19] Norgate, T. E., Jahanshahi, S., Rankin, W.J. (2006): Assessing the environmental Impact of metal production processes, *Journal of Cleaner Production*, doi:10.1016/j.jclepro.2006.06.018
- [20] Peiquan, L., Ziwen, Z., Jianling, L., Zhengguang, L., Yong, L., Md Apel, M., Yong, S., Diyi, C. (2023): Unlocking potential contribution of seasonal pumped storage to ensure the flexibility of power systems with high proportion of renewable energy sources, *Renewable Energy* 218 (2023) 119280, doi.org/10.1016/j.renene.2023.119280
- [21] Perissi, I.; Lavacchi, A.; Bardi, U. (2021): The Role of Energy Return on Energy Invested (EROEI) in Complex Adaptive Systems. *Energies*, 14, 8411. <https://doi.org/10.3390/en14248411>
- [22] Rankin, J. (2012): Energy Use in Metal Production, High Temperature Processing Symposium, Swinburne University of Technology
- [23] Schendler, A. (2022): The False Promise of Corporate Carbon Neutrality, *Stanford Social Innovation Review*, doi: 10.48558/341v-h591
- [24] Wade Allison (2023): The inadequacy of wind power, Note 40, The Global Warming Policy Foundation
- [25] Wester Van Gaal (2023): Germany begins dismantling wind farm for coal, 29. 8. 2023. <https://euobserver.com/green-economy/157364>
- [26] Zhu, H., Hu, L., Guojing, L., Yi Ge, Jing Shi, Hai Li, Ning Zhang (2020): Energy Storage in High Renewable Penetration Power Systems: Technologies, Applications, Supporting Policies and Suggestions, doi: 10.17775/CSEEJPES.2020.00090
- [27] Zsiborács, H., Hegedusné Baranyai, N., Vincze, A., Zentkó, L., Birkner, Z., Máté, K., Pintér G. (2019): Intermittent renewable energy sources: The role of energy storage in the European Power System of 2040, *Electronics* 2019, 8, 729; doi:10.3390/electronics8070729

REVERSIBLE HYDRO POWER PLANTS UNDER THE CONDITIONS OF INCREASING THE SHARE OF POWER PLANTS WITH HIGH VARIABILITY OF AVAILABILITY

By

Branislav ĐORĐEVIĆ¹ and Tina DAŠIĆ²

¹ Academy of Engineering Sciences of Serbia

² University of Belgrade - Faculty of Civil Engineering,

Summary

Increasing power of intermittent power plants (solar and wind), which have sudden and variable changes in availability, are being introduced into electric power systems without appropriate necessary energy and environmental analyses. It creates more and more problems for these systems. Without in-depth analysis, power plants with high production reliability (large thermal power plants and nuclear power plants) are being closed, in order to replace them with supposedly renewable energy sources, which are very unreliable from the point of view of ensuring the stability of the operation of the EES. The article critically examines those processes of spontaneous construction of solar power plants and wind power plants. In a number of countries, this is becoming a serious problem, which will become more and more acute. Optimism that it will be solved by energy storage in batteries is very limited.

Important facts are not taken into account: (a) the production of batteries for energy storage requires the consumption of large amounts of primary energy, (b) the batteries must be completely replaced after some limited time. This often calls into question the renewable attribute of these intermittent energy sources, and significantly increases the cost of the energy thus obtained. In such circumstances, the need for the introduction of reversible hydropower plants (RHPP) and pumped storage plants (PSP) into the systems is rapidly growing, which are necessary to take on the task of balancing energy in the system and ensuring its stability in new conditions.

Keywords: intermittent energy sources, wind, Sun, energy storage, reversible hydropower plants, water storage