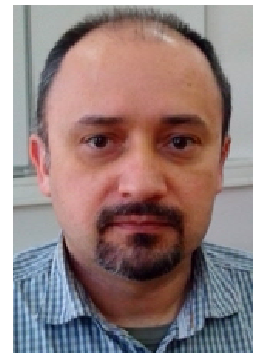


Poboljšanje energetske učinkovitosti bušačega postrojenja kroz primjenu baterijskoga sustava za pohranu energije

Energy efficiency improvement of a drilling facility through utilization of a battery energy storage system

mr. sc. Gordana Barić, viša predavačica
dr. sc. Mihael Cipek, docent
dr. sc. Matija Krznar, poslijedoktorand
Fakultet strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu

dr. sc. Danijel Pavković, izvanredni profesor
Fakultet strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu
Danijel.Pavkovic@fsb.hr



Ključne riječi – mikromreža bušačega postrojenja; dizelska elektrana; uštede goriva; upravljanje energijom; baterijski sustav za pohranu energije; razdoblje povrata ulaganja.

Keywords – drilling facility microgrid; diesel power-plant; fuel savings; energy management; battery energy storage system; return-of-investment period.

Sažetak

U radu su predstavljeni rezultati analize uštede energije (goriva) izolirane dizelske elektrane bušačega postrojenja opremljenoga baterijskim sustavom za pohranu energije za kompenzaciju vršnih opterećenja. Strategija upravljanja tokovima energije uključuje logiku uključivanja i isključivanja generatora i poravnavanje vršnih opterećenja temeljeno na trenutnim zahtjevima za radnom i jalovom snagom mikromreže postrojenja. Analiza se provodi na 30-dnevnim podacima opterećenja mikromreže izolirane kopnene bušaće garniture, koju karakterizira varijabilno radno i jalovo opterećenje. Glavni zaključak je kako se izbjegavanjem rada pri malim snagama pojedinačnih

generatora i osiguravanjem zahtjeva za vršnom snagom iz namjenskog baterijskoga sustava za pohranu energije, može značajno smanjiti potrošnja goriva dizel-agregatne elektrane, otprilike 12 % u usporedbi s dosadašnjom praksom koja se oslanja isključivo na odlučivanju stručnjaka na terenu. Konačno, analiza je, također, pokazala da razdoblje povrata ulaganja u razmatranio baterijski sustav za pohranu energije jest jedna do dvije godine.

Abstract

This paper presents the results of energy (fuel) savings analysis of an isolated diesel power plant on a drilling rig equipped with a battery energy storage system to compensate for peak loads. The proposed energy management strategy includes a generator turn-on and turn-off logic and peak load shaving based on active and reactive power requirements of the drilling rig microgrid. The analysis is performed on 30-day microgrid power consumption data set recorded on an isolated onshore drilling rig, which is characterized by variable active and reactive load. The main conclusion is that by avoiding low-power operation

of individual generators and ensuring peak power requirements from the dedicated battery energy storage system, the diesel power plant fuel consumption can be significantly reduced, by about 12 % compared to the current practice, which relies solely on experts in the field. Finally, the analysis also showed that the return of investment of the considered battery energy storage system can be one to two years.

1. Uvod

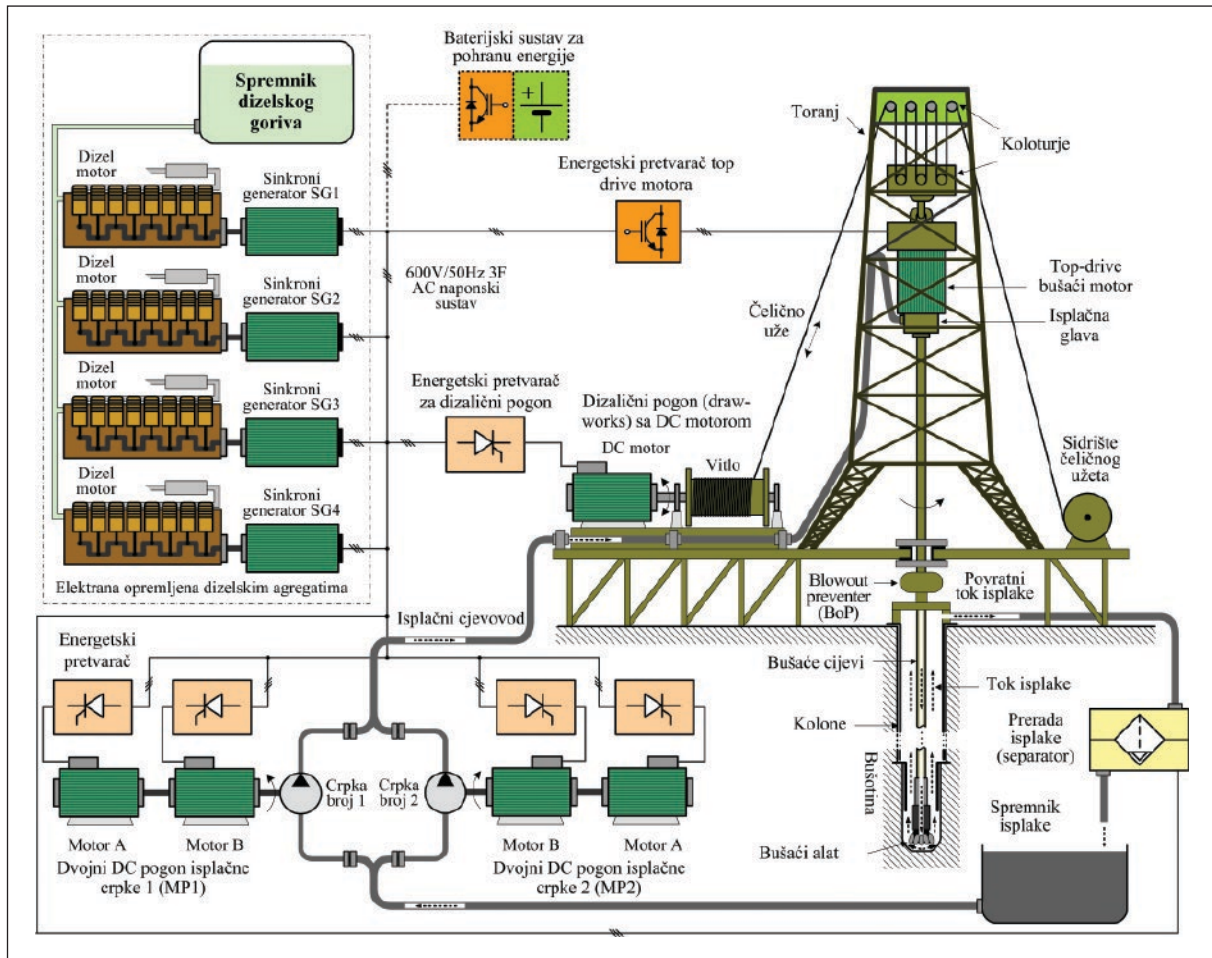
Shematski prikaz izmjenične (AC) trofazne mikromreže koptene bušaće garniture napajane iz pripadajuće dizel-agregatne elektrane (Lyons i Plisga, 2005) prikazan je na slici 1. Mikromrežu karakteriziraju značajne varijacije opterećenja (radne snage) zbog čestog uključivanja i varijabilne snage isplacnih pumpi, dizalice bušaćega niza i vršnih pogona za bušenje s tzv. „top-drive“ elektromotorom. Pored toga, postoji i značajna komponenta jalove snage, primarno zbog korištenja reguliranih elektromotornih pogona koji koriste tiristorske pretvarače snage i istosmjerne (DC) strojeve sa serijskom uzbudom (Caldeira i Watanabe, 1988). Prethodno spomenute varijacije snage u mreži, naročito one koje se javljaju tijekom postavljanja bušaćih kolona i zamjene bušaćega alata, stabilizacije bušotine cementiranjem njenih stijenci, te operacija usmjerenog bušenja, obično su pokriveno uključivanjem dodatnih generatora, a što rezultira povećanjem potrošnje goriva. Stoga bi bilo vrijedno analizirati rad dizel-agregatne elektrane i pripadajuće mikromreže za tipične operativne scenarije, a kako bi se pronašle odgovarajuće mjere za smanjenje potrošnje goriva. To može uključivati odgovarajuće tehnike uključivanja i isključivanja generatora i povezanu hibridizaciju mikromreža u smislu uključivanja dodatnog baterijskoga sustava za pohranu električne energije (crtkani blok na slici 1), a koja se također može koristiti kao pričuvni izvor napajanja u slučaju nužde. Kao što navode Kaiser i Snyder (2013), mjere rekonstrukcije i modernizacije elektroenergetske mreže bušaćih postrojenja obično obuhvaćaju tek manji dio troškova potpuno novog postrojenja, što bi ove nadogradnje moglo učiniti prihvatljivim malim i srednjim tvrtkama u ovoj branši.

Štoviše, prethodno spomenute mjere hibridizacije također mogu imati širi opseg, jer elektrane opremljene agregatima pokretanim motorima s unutarnjim izgaranjem mogu činiti do 15 % ukupnih instaliranih kapaciteta diljem svijeta (Kanoğlu, Işık, i drugi, 2005),

bilo u obliku primarnih izvora energije za izolirane (otočne) električne mreže (kao što je mikromreža u ovom tekstu) ili kao pričuvna postrojenja za hotele, zračne luke, bolnice i one industrije koje zahtijevaju pouzdano napajanje u svakom trenutku. Budući da je rad dizelskih elektrana obično povezan s prilično značajnim troškovima transporta goriva (Hunt i Szymbor-sky, 2009), značajni naponi posvećeni su optimiranju potrošnje goriva. Nedavna istraživanja su pokazala da se metaheuristički algoritmi pretraživanja mogu koristiti za pronalaženje optimalnog broja generatora (Yadav, Kumar i drugi, 2011) koji minimizira specifičnu potrošnju goriva elektrane. Zbog svoje jednostavnosti, strategije upravljanja temeljene na bazi pravila često se koriste u aplikacijama upravljanja energijom u stvarnom vremenu u svrhu koordinacije više izvora energije (Koochi-Kamali, Rahim i drugi, 2014).

Kako bi se zadovoljila potreba za isporukom energije i kompenzacija vršnih opterećenja takvih hibridnih mikromreža, prikladne strategije upravljanja obično su uključene u sustav upravljanja energetskim pretvaračem baterijskoga sustava za pohranu energije (Kim, Jeon i drugi, 2010), pri čemu potonji treba biti dizajniran s dovoljnim kapacitetom pohrane za očekivane režime pražnjenja (Kaldellis, Zafrakis i drugi, 2009), dok sučelje pretvarača snage na strani mreže treba biti dimenzionirano na temelju očekivane isporuke vršne snage (Fernão-Pires, Romero-Cadaval i drugi, 2014). Potreban kapacitet pohrane i izbor prikladne tehnologije baterija obično se temelji na analizi vremenski promjenjivih profila opterećenja (Guarino, Cassarà i drugi, 2015). S druge strane, predviđeni režimi rada sustava za pohranu energije, tj. izravnavanje vršnoga (pulsnog) opterećenja ili stabilna isporuka energije kroz dulji vremenski period, predstavljaju ključne kriterije za odabir prikladne tehnologije baterija u sustavima za pohranu energije (Poullikkas, 2013).

Stoga se u ovom radu ukratko opisuje i analizira ponašanje mikromreže temeljene na dizelskim agregatima i baterijskim sustavom za pohranu energije, pri čemu baterija služi za poravnavanje vršnih opterećenja (Pavković, Sedić i drugi, 2016). Time se postiže ujednačeniji rad dizelskih agregata uz izbjegavanje rada na niskim opterećenjima karakteriziranim većom specifičnom potrošnjom goriva. Ovo pak ima za posljednicu značajno smanjenje potrošnje goriva i uz to vezanih emisija stakleničkih plinova u usporedbi s trenutnom praksom koja se oslanja samo na dizel-agregatnu elektranu i proces odlučivanja stručnjaka na terenu.



Slika 1. Shematski prikaz kopnene bušaće garniture.

2. Karakteristike rada mikromreže bušaćega postrojenja

Razmatranu kopnenu bušaću garnituru, prikazanu na slici 1, pogoni se iz elektrane sa četiri sinkrona generatora u sklopu dizelskih agregata. Pojedinačni generatori za napajanje lokalne 600V/50 Hz trofazne AC električne mikromreže karakterizirani su nazivnom prividnom snagom $S_N = 875$ kVA i nazivnim faktorom snage $\cos \varphi_N = 0,8$ (odnosno 700 kW nazivne radne snage i 525 kVAr jalove snage nazivno) pri nazivnoj brzini vrtnje od 1 000 o/min (Caterpillar, 2015). Mikromrežu bušaćega postrojenja karakteriziraju brojni potrošači velike snage, kao što su elektromotorni pogoni ispraćnih crpki, elektromotorni pogon dizalice bušaćega niza, vršni regulirani elektromotorni pogon za pogonjenje bušaćega alata (top drive) i pogon za preradu isplake. Pritom su elektromotorni pogoni dizalice i isplaćnih crpki izvorno

instalirani istosmjerni pogoni opremljeni tiristorskim AC/DC energetskim pretvaračima, pri čemu se pogon dizalice (nazivne snage 750 kW) temelji na nezavisno uzbuđenom istosmjernom stroju, dok svaki pogon isplaćnih crpki napajaju dva istosmjerna stroja sa serijskim uzbuđenom nazivne snage 660 kW (Lyons i Plišga, 2005). S druge strane, nadograđeni vršni pogon sa izmjeničnim elektromotorom reguliranim po struji i brzini vrtnje (e. variable speed drive, VSD) treba omogućiti rad pri velikim snagama (uobičajeno 600 kW) i malim brzinama vrtnje (obično do 250 o/min). Ugradnja takvog reguliranog AC elektromotornog pogona omogućuje visoku dinamiku rada i jednostavnu implementaciju naprednih sustava bušenja s aktivnim prigušenjem torzijskih vibracija bušaćega niza te koordiniranog upravljanja njegovom vertikalnom i rotacijskom osi (Pavković, Šprljan i drugi, 2021).

Tijekom tipičnih operacija bušenja, a koje karakteriziraju približno konstantno opterećenje vršnoga pogona i pogona isplaćnih crpki, te rad dizalice pri

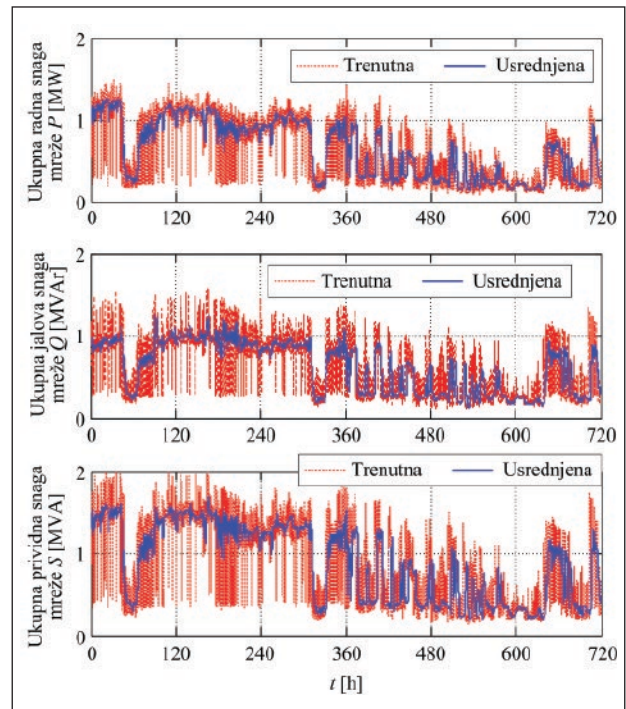
maloj snazi, opterećenje elektrane je relativno malo i ne varira značajno, pa je potreban manji broj generatora u radu, uz barem dva aktivna generatora radi redundancije (Pavković, Sedić i drugi, 2016). S druge strane, u nepovoljnim radnim uvjetima, kao što je u slučaju naglašenih torzijskih vibracija bušačega niza i operacija usmjerenog bušenja, opterećenje vršnoga pogona se značajno povećava. Dodatno, elektromotorni pogoni isplačnih crpki sa serijskim istosmjernim motorima koji rade pri malim snagama u odnosu na nazivnu, predstavljaju predominantno jalova trošila na trofaznoj izmjeničnoj mreži (Sen i Doradla, 1976). Stoga, kako bi se izbjegla nestabilnost frekvencije ili napona izmjenične mreže u gore navedenim otežanim režimima rada, uključuju se dodatni generatori koji rade blizu optimalnog faktora snage ($\cos \phi = 0,8$) u slučaju prevladavajuće potrebe za radnom snagom u mreži, dok se u scenarijima koji zahtijevaju značajno injektiranje jalove snage, faktor snage generatora može smanjiti znatno ispod nazivne vrijednosti ($\cos \phi < 0,8$) povećanjem struje uzbude generatora.

3. Analiza režima opterećenja mikromreže i generatora

Uzevši u obzir karakteristike mikromreže bušačega postrojenja, najprije je potrebno analizirati profile prosječne i vršne snage na reprezentativnom skupu podataka koji su prikupljeni kroz 30 dana kontinuiranog rada, kako bi se analizirale mogućnosti poboljšanja rada dizelskih agregata. U tu svrhu, Pavković, Sedić i drugi (2016) provode usrednjavanje mjerenja prividne, radne i jalove snage mikromreže pomoću tzv. Adaptivnog Kalmanovog filtra.

Slika 2 prikazuje usporedne trenutne i prosječne terenske vrijednosti prividne, radne i jalove snage mikromreže u promatranom razdoblju od 30 dana (720 h). Ovi podaci pokazuju da je dizel-agregatna elektrana bušačega postrojenja izložena relativno velikim zahtjevima za snagom (potražnja za prividnom snagom često doseže 2 MVA), te velikim i dugotrajnim varijacijama snage u odnosu na usporedne prosječne vrijednosti zahtijevanih snaga.

Prosječna vrijednost prividne snage mikromreže može pružiti dobar uvid u stalnu potražnju za električnom energijom, pa se ovi podaci mogu koristiti za utvrđivanje minimalnog broja generatora potrebnoga za pokrivanje srednje vrijednosti opterećenja mikromreže. S druge strane, zahtijevana prosječna radna snaga može poslužiti za procjenu potrošnje dizelskog goriva, temeljem statičkih mapa potrošnje

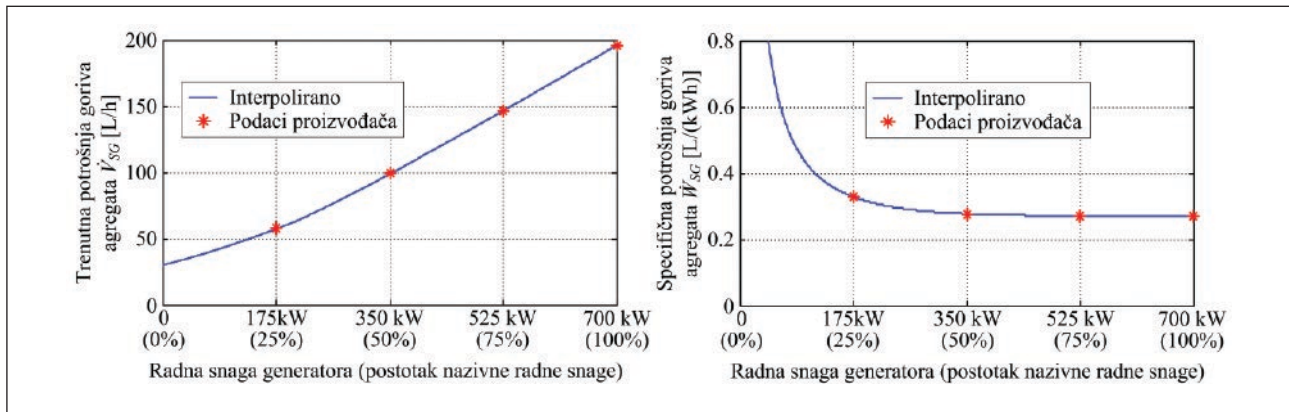


Slika 2. Trenutna i usrednjena radna, jalova i prividna snaga u mikromreži.

goriva prikazanima na slici 3. Pritom je mapa apsolutne potrošnje preuzeta iz kataloga proizvođača (CATERPILLAR, 2015), dok se specifična potrošnja (po jedinici proizvedene energije) i njen generalni trend dobro slažu s rezultatima koje prezentiraju Yadav i Kumar (2011).

Rezultati procjene kumulativne potrošnje goriva za pojedine generatore i cjelokupnu elektranu na temelju podataka o izlaznoj snazi generatora prikazani su na slici 4. Procjene izlazne radne snage (gornji i srednji red na slici 4) pokazuju da su generatori SG1 do SG3 bili periodički isključeni kako bi se postigla približno jednaka razina eksploatacije, vjerojatno zbog postizanja približno jednakog broja radnih sati u smislu preventivnog održavanja (vidi rezultate koje navode Katiraei i Abbey (2007)). S druge strane, broj radnih sati četvrtog generatora (SG4) otprilike je polovica radnih sati generatora SG1 – SG3 tijekom promatranog razdoblja. Zbrajanjem pojedinačnih doprinosa generatora SG1 – SG4, kumulativna procijenjena potrošnja goriva elektrane na kraju 30-dnevnog razdoblja iznosila je 146,73 m³ dizelskog goriva, te će se ona koristiti kao mjerilo za analizu mogućih ušteda kroz integraciju baterijskoga sustava za pohranu energije.

Budući da varijacije električne energije u mreži, osobito velika vršna opterećenja, mogu rezultirati nestabilnošću napona i frekvencije mreže, pretpostavlja se da će sve zahtjeve vršnoga opterećenja iznad



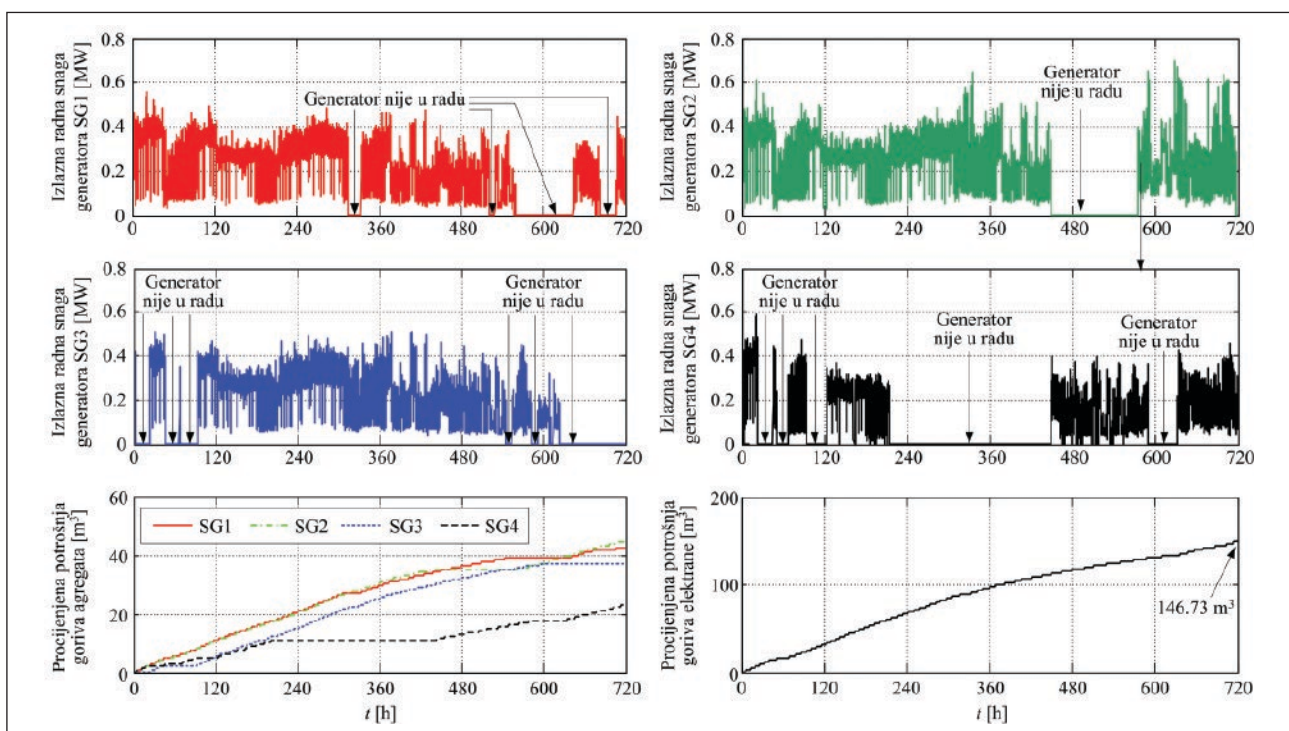
Slika 3. Apsolutna potrošnja goriva (lijevo) i specifična potrošnja goriva (desno) pojedinačnog dizelskog agregata u ovisnosti o zahtijevanoj radnoj snazi.

nominalnih vrijednosti generatora na kraju riješiti sustav za pohranu energije odgovarajućega kapaciteta pohrane energije i instalirane snage energetskoga pretvarača prema mreži. Štoviše, pretpostavlja se da bi u prethodno spomenutom hipotetskom scenariju svi generatori radili s istom vrijednošću faktora snage, pri čemu se isporuka jalove i radne snage u mrežu može osigurati do pojedinačnih nazivnih radnih i jalovih snaga generatora. Ova jednostavna strategija upravljanja generatorima, zasnovana na bazi pravila, trebala bi se lako implementirati jer se radnom i jalovom snagom sinkronih generatora upravlja odvojeno kroz izlaznu snagu dizelskog motora (pri brzini mo-

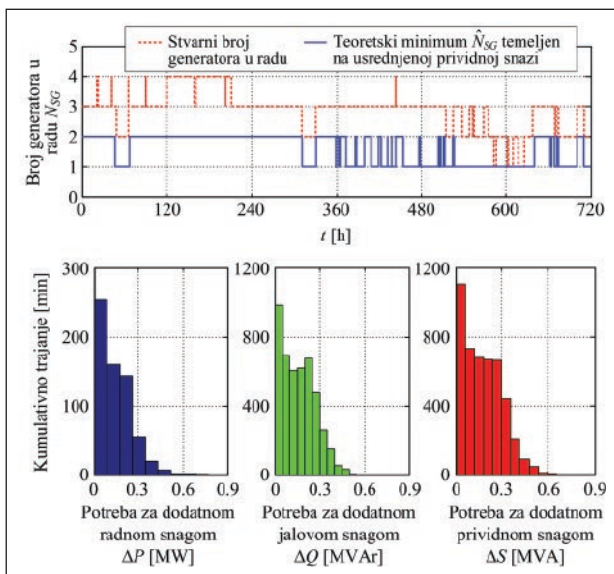
tora sinkronom s frekvencijom mreže), odnosno kroz upravljanje strujom uzbude generatora.

4. Potreban kapacitet baterije i snaga energetskoga pretvarača

Histogramski prikazi (statističke distribucije) radne, jalove i prividne snage i broja generatora (slika 5) dodatno potvrđuju da prikazani podaci pokrivaju relativno širok raspon zahtjeva za energijom dizel-agregatne elektrane (odnosno potrošnje mikromreže) povezanih s različitim brojem generatora u radu. Također se može primijetiti kako je značajan dio režima

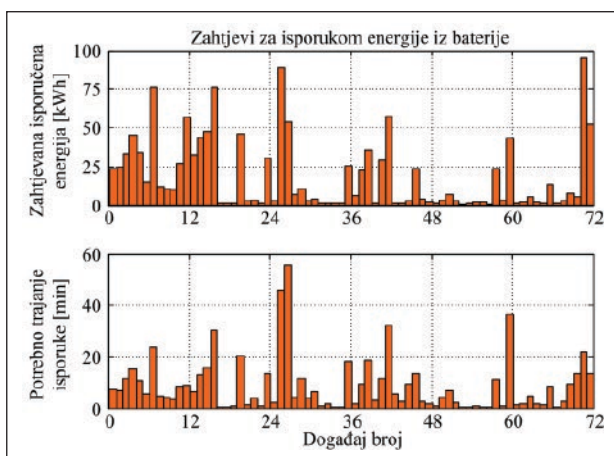


Slika 4. Trenutna isporuka radne snage za sva četiri generatora tijekom 30 dana mjerenja (gornji i srednji red) i procijenjena pojedinačna i skupna potrošnja goriva (donji red).



Slika 5. Stvarni broj generatora u radu i teoretski minimum dobiven iz srednje prividne snage (gornji red) i histogrami vršnih opterećenja (donji red).

rada mikromreže karakteriziran ili. prilično visokim ili. prilično niskim opterećenjem. Ovo dodatno potvrđuje da je opterećenje mikromreže bušačega postrojenja poprilično varijabilne prirode i može poprimiti širok raspon vrijednosti radne i jalove snage. Broj generatora potrebnih za pokrivanje srednje prividne snage mikromreže pokazuje da bi napon i frekvenciju mikromreže bušačega postrojenja bilo moguće održavati sa smanjenim brojem generatora (obično s dva generatora manje u odnosu na stanje na terenu), ukoliko bi se vršno opterećenje (iznad nazivne snage generatora) moglo pokriti iz odgovarajućega sustava za pohranu energije. Rezultati na slici 5 pokazuju da bi ovo bilo moguće provesti uz sličan broj uključivanja/isključivanja generatora (oko 30) u usporedbi



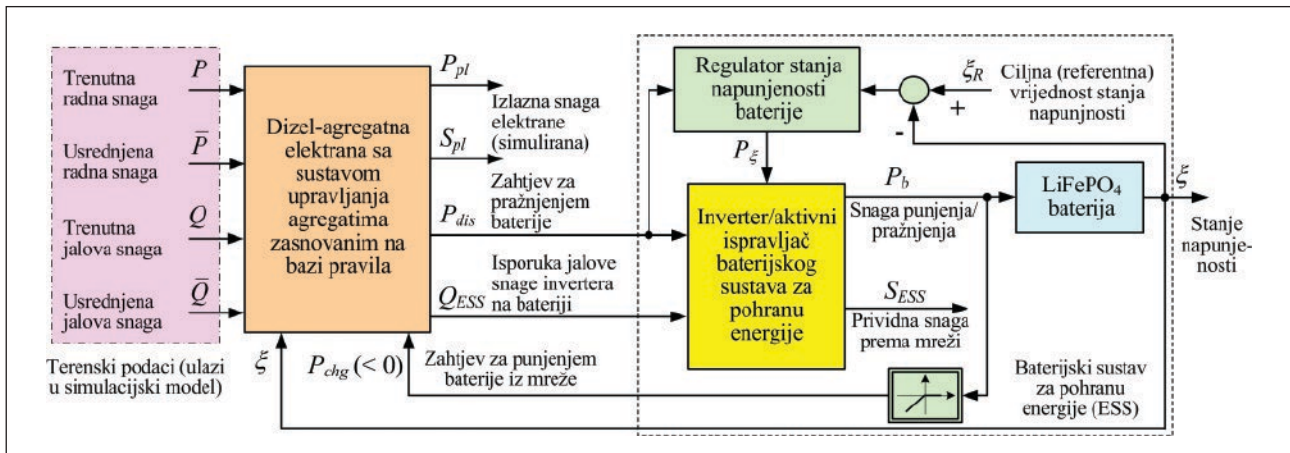
Slika 6. Zahtjevi za isporukom energije u mikromrežu (gornji red) i potrebna trajanja procesa pražnjenja baterije (donji red).

s dosadašnjom praksom na terenu. Štoviše, smanjenjem broja generatora bolje bi se iskoristio korisni raspon snage generatora, umjesto empirijske sheme implementirane na terenu, u kojoj pojedini generatori često rade na razmjerno malom postotku svoje nazivne snage (vidi sliku 4). Histogrami na slici 5 također pokazuju da bi potencijalni sustav za pohranu energije trebao moći isporučiti približno 400 kW radne snage, odnosno 600 kVA prividne snage kako bi pokrio vršna opterećenja u sustavu sa smanjenim brojem generatora u radu.

Slika 6 prikazuje potrebu za isporukom energije (kroz isporuku radne snage) za vršna opterećenja prikazane na gornjem grafu na slici 2. Konkretno, naznačena su 72 različita zahtjeva za isporukom (72 događaja) koji bi se mogli koristiti za procjenu potrebnoga kapaciteta sustava za pohranu energije. Rezultati pokazuju da bi za razmatrana vršna radna opterećenja sustav za pohranu energije trebao osigurati barem 94 kWh iskoristivoga kapaciteta pohrane energije. Trajanje pojedinačnih traženih događaja pražnjenja, (slika 6), pokazuje da potrebno trajanje pražnjenja sustava za pohranu energije ne bi bilo dulje od jednog sata za razmatrani scenarij upravljanja generatorima temeljen na bazi pravila. Budući da se baterijski sustav za pohranu energije mora dimenzionirati i s obzirom na dozvoljeni raspon stanja napunjenosti kojim se sprječava njihovo preispražnjenje i produžuje životni vijek (Sauer i Wenzl, 2008), prethodno spomenuti kapacitet pohrane energije se tipično skalira prema većim vrijednostima kapaciteta pohrane [26], što je prema analizi danoj u (Pavković, Sedić i drugi, 2016) rezultiralo konačnim kapacitetom pohrane od 117,5 kWh.

5. Procjena investicijskog troška i troškova održavanja

Na temelju ovih rezultata može se procijeniti investicijski trošak ugradnje i trošak održavanja baterijskoga sustava za pohranu energije. Zbog specifičnih zahtjeva kopnenih bušačkih uređaja, sustav za pohranu energije trebao bi biti robustan, kompaktan i lako prenosiv, te karakteriziran visokom sigurnošću u radu. Za predloženu primjenu može se prilagoditi tehnologija litij-željezo-fosfatnih (LiFePO_4) baterija, koja trenutno predstavlja dobar kompromis u smislu velike gustoće snage i sigurnosti rada, dok je također karakteriziraju relativno umjereni troškovi s obzirom na kapacitet skladištenja energije (IRENA, 2013). Štoviše, ove baterije također karakterizira prilično visoka



Slika 7. Principni blokovski dijagram simulacijskog modela sustava upravljanja tokovima energije mikromreže bušačega postrojenja s baterijskim sustavom za pohranu energije.

izdržljivost u smislu životnoga ciklusa baterije (Omar, Monem i drugi, 2014).

Za prethodno spomenuti zahtjev za kapacitetom baterije od 117.5 kWh, specifični trošak baterijskoga sustava Battke, Schmidt i drugi (2013) procjenjuju na 850 EUR/kWh, što iznosi približno 100 000 EUR za razmatrani baterijski sustav. Međutim, treba imati na umu da stvarni troškovi baterijskih ćelija iznose tek polovicu gore spomenutih troškova, dok bi ostatak uključivao razno popratno elektroničko sklopovlje, kućište baterije, sustav toplinske odvodnje, te ožičenje i razne druge pomoćne sustave (IRENA, 2013). Prethodno spomenuti sustavi za upravljanje i dijagnostiku baterija te pomoćni elementi bitni su za ispravan rad baterijskoga sustava u prilično teškim uvjetima eksploatacije koji se susreću u elektroenergetskim sustavima (Rahimi-Eichi, Ojha i drugi, 2013).

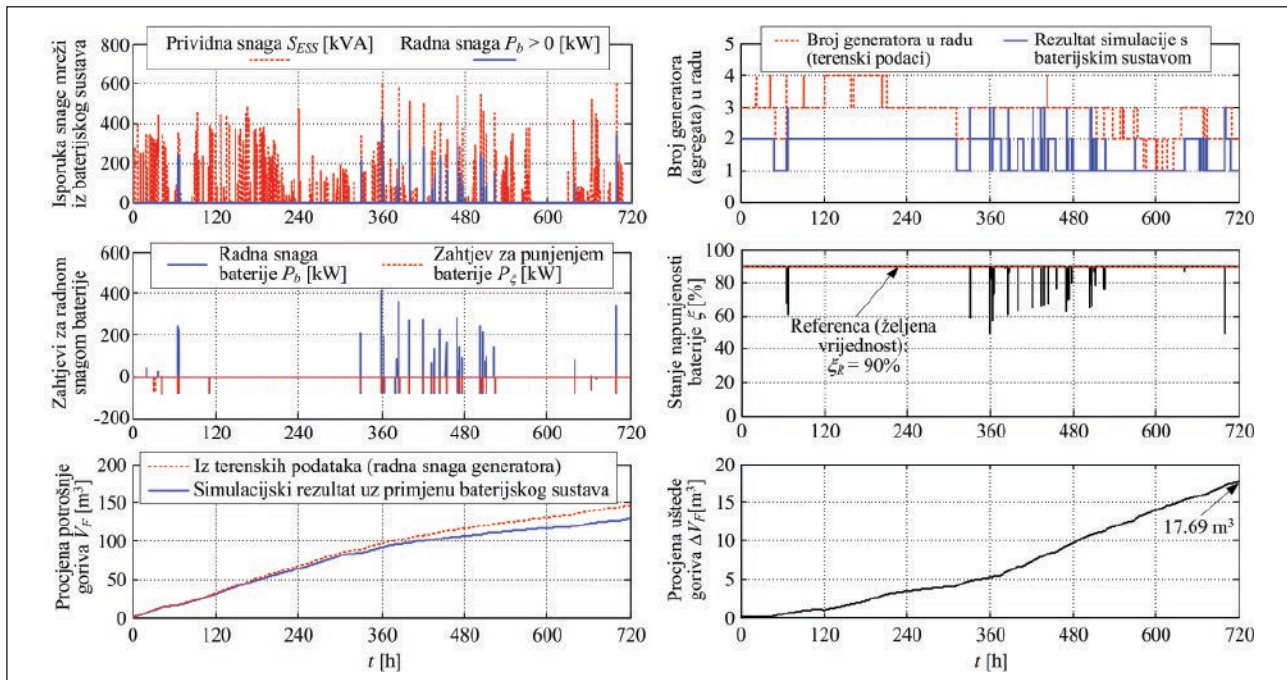
Zahtjev za prividnu snagu pretvarača od 0.6 MVA, dobiven analizom vršnih opterećenja (slika 5), korišten je za procjenu troškova energetskoga pretvarača prema izmjeničnoj trofaznoj mreži. Prosječni specifični trošak energetskoga pretvarača za primjene u sustavima litijevih baterija procjenjuje se na 125 EUR/kVA instalirane snage pretvarača (Battke, Schmidt i drugi, 2013), što rezultira investicijskim troškovima pretvarača snage od 75 000 EUR za sustav od 0.6 MVA. Konačno, dodatnih 19 EUR/kVA bilo bi potrebno izdvojiti godišnje za operativne troškove i troškove održavanja za razmatrani sustav za pohranu energije (Battke, Schmidt i drugi, 2013), što rezultira dodatnim troškom od 11 400 EUR/god. Stoga, za predviđeni 10-godišnji životni vijek LiFePO₄ baterije, što također također navode Battke, Schmidt i drugi (2013), početna procjena troškova od 175 000 EUR (trošak baterije + inverter) bi se morala prilagoditi za

dodatnih 11 400 EUR godišnje, da bi konačno dosegla 289 000 EUR na kraju očekivanog 10-godišnjeg kalendarskog vijeka trajanja baterije. Naravno, navedeni iznosi pojedinih troškova, preuzeti iz literature, ne moraju u potpunosti odgovarati stvarnom stanju na tržištu

6. Rezultati simulacijske analize i diskusija

Temeljni blokovski dijagram simulacijskog modela razmatranoga sustava upravljanja tokovima energije mikromreže bušačega postrojenja s baterijskim sustavom za pohranu energije prikazan je na slici 7. Cjelokupna strategija upravljanja sastoji se od upravljačke logike za potrebe određivanja potrebnoga broja generatora na temelju prosječnih zahtjeva za radnu i jalovu snagu i upravljanja baterijskim sustavom radi pokrivanja vršnih opterećenja (Pavković, Sedić i drugi, 2016). Budući da se baterijski sustav za pohranu energije treba periodično puniti iz mreže, mora biti opremljen odgovarajućim regulatorom stanja napunjenosti koji daje dodatni upravljački signal mrežnom energetskom pretvaraču. Ovi signali (komanda punjenja i stanje napunjenosti baterije) također moraju biti dostupni strategiji upravljanja dizelskim agregatima, kako bi elektrana mogla osigurati dovoljnu snagu za punjenje baterije kada je ona blizu granice dubokog ispražnjenja.

Slika 8 prikazuje rezultate simulacije gdje strategija upravljanja tokovima energije rezultira vrijednostima prividne snage sustava za pohranu energije unutar očekivanih granica: prividna snaga mrežnog pretvarača $S_{ESS} \leq 0,6$ MVA, uz isporuku radne snage iz baterije prema mreži koja ne prelazi 0,4 MW.



Slika 8. Isporuca snage pretvarača prema trofaznoj mreži, broj generatora u radu, snaga i stanje napunjenosti baterije, te procjena potrošnje i uštede goriva.

Razmatrana strategija upravljanja proizvodi 78 događaja uključivanja i isključivanja generatora, što je otprilike 2,6 puta više nego u slučaju „idealnog“ upravljanja uz prethodno poznatu potrošnju (slika 5). Ovo povećanje zahtjeva za uključivanjem i isključivanjem generatora je prvenstveno uzrokovano dodatnim zahtjevima za punjenje baterije kada je indicirano nisko stanje napunjenosti (slika 7) i realnih gubitaka sustava za pohranu energije koji u idealnom slučaju nisu razmatrani. Rezultati nadalje pokazuju da razmatrani baterijski sustav za pohranu energije karakteriziraju relativno mala odstupanja stanja napunjenosti od ciljane vrijednosti $x_R = 0,9$, odabrane kako bi se izbjeglo prekomjerno punjenje i s time povezani problemi starenja baterije (Rahimi-Eichi, Ojha i drugi, 2013), te također učinkovito sprječava da stanje napunjenosti baterije padne ispod 0,5. Konačno, procijenjena potrošnja goriva dizel-agregatne elektrane uspoređuje se s rezultatima dobivenim na terenu, a koji ukazuju da postoji jasan potencijal za smanjenje potrošnje goriva. Naime, ušteda goriva s obzirom na rad elektrane na terenu procjenjuje se na $\Delta V_F = 17,69 \text{ m}^3$ u razdoblju od 30 dana, što odgovara smanjenju potrošnje goriva od 12,07 % u odnosu na trenutno stanje na terenu za dani simulacijski scenarij.

Uštede dizelskog goriva dobivene prethodnom simulacijskom analizom koriste se za procjenu očekivanog razdoblja povrata investicije u baterijski sustav za pohranu energije, a također su i u korelaciji sa

potencijalnim smanjenjem emisija ugljičnog dioksida (CO_2). Financijska dobit od rada baterijskoga sustava za pohranu energije i povezano razdoblje povrata investicije procijenjeni su na temelju veleprodajne cijene dizelskog goriva od 900 EUR/ m^3 (podaci iz 2016. godine) isključujući iz proračuna stopu PDV-a od 25 % naplaćenu izvođaču bušenja od maloprodajne cijene dizelskog goriva (European Commission, 2015). Temeljem toga, uštede povezane sa smanjenjem utroška goriva od 17,69 m^3 u promatranom razdoblju od 30 dana neprekidnog rada iznosile bi 15,921 EUR. Nadalje, uz pretpostavku kontinuiranog rada elektrane pod sličnim uvjetima opterećenja, predviđeno razdoblje povrata ulaganja u sustav za pohranu energije ΔT_R (izraženo u danima neprekidnog rada) može se procijeniti na temelju kapitalnih troškova baterijskoga sustava (175 000 EUR) i godišnjih operativnih troškova i troškova održavanja (11 400 EUR/god). Sljedeći jednostavan izraz mogao bi se upotrijebiti za dobivanje grube procjene razdoblja povrata investicije uz pretpostavku identičnih uvjeta eksploatacije (Pavković, Sedić i drugi, 2016):

$$d \cdot \Delta T_R \cdot 900 \left[\frac{\text{EUR}}{\text{m}^3} \right] \cdot \frac{\Delta V_F (\theta \text{ dana})}{\theta \text{ dana}} = \quad (1)$$

$$= 175000 \text{ EUR} + 11400 \left[\frac{\text{EUR}}{\text{god.}} \right] \cdot \text{ceil} \left(\frac{\Delta T_R}{365} \right)$$

Tablica 1. Periodi povrata investicije u ovisnosti o faktoru iskorištenja elektrane

Faktor iskorištenja elektrane d	0,9	0,8	0,7	0,6	0,5
Period povrata investicije ΔT_R [dana]	414	466	533	621	788
Ostvareni profit OP [milijuna EUR]	1,717	1,690	1,654	1,608	1,519

gdje je d faktor iskorištenja hibridne dizelske elektrane opremljene baterijskim sustavom, a koji se odnosi na planirane zastoje zbog održavanja i transporta od lokacije do lokacije, dok su operativni troškovi i troškovi održavanja (11 400 EUR/godišnje) uključeni kao godišnji fiksni troškovi (gdje se period eksploatacije zaokružuje prema gornjoj vrijednosti, funkcija ceil (\times) u izrazu (1)).

Iterativnim rješavanjem gornje jednadžbe idealno razdoblje povrata investicije DT_R iznosi 352 dana kontinuiranoga rada baterijskoga sustava ($d = 1$) uz pretpostavku identičnih radnih uvjeta bušačega postrojenja. Razdoblja povrata ulaganja dobivena za različite vrijednosti faktora d prikazana su u tablici 1. Rezultati pokazuju da čak i u slučaju kada je $d = 50\%$, profitabilan rad se može postići unutar približno 26 mjeseci, što je još uvijek gotovo pet puta kraće od predviđenoga kalendarskog vijeka baterije sustava (a koji iznosi 10 godina). Tablica 1 također navodi i očekivani profit OP u jednakim uvjetima eksploatacije izračunat kroz uštedu u cijeni goriva tijekom preostalog životnoga vijeka baterije ($T_c = 10$ godina) nakon postizanja povrata investicije:

$$OP = \frac{T_c \cdot 365[\text{dana}] - \Delta T_R[\text{dana}]}{30} \cdot 15921 \left[\frac{\text{EUR}}{30 \text{ dana}} \right] \quad (2)$$

Dodatno, kroz smanjenje potrošnje dizelskog goriva dolazi i do posljedičnoga smanjenja utjecaja bušačega postrojenja na okoliš u smislu očekivanoga smanjenja emisija CO_2 . Kako bi se procijenilo potencijalno smanjenje emisija CO_2 , koristi se sljedeća proporcionalna ovisnost mase ugljičnoga dioksida Δm_{CO_2} ispuštenog u atmosferu na temelju smanjenja potrošnje dizelskoga goriva ΔV_F , kako navode Besse-link, van Oorschot i drugi (2010):

$$\Delta m_{\text{CO}_2}[\text{t}] = 2.6 \cdot \Delta V_F[\text{m}^3] \quad (3)$$

što daje procijenjeno smanjenje emisija Δm_{CO_2} od 46,88 tona CO_2 za procijenjeno smanjenje utroška goriva $\Delta V_F = 17,69 \text{ m}^3$ uslijed korištenja baterijskoga sustava za pohranu energije tijekom promatranoga 30-dnevnog razdoblja. Ovo pak rezultira smanjenjem emisija CO_2 od preko 5 000 tona na godišnjoj bazi

(uz pretpostavku identičnih radnih uvjeta elektrane i njenog faktora iskorištenja $d = 0,9$). Navedeni rezultati su u skladu s najnovijim spoznajama kao što su prikazali Hopkins, Fox i drugi (2020). Ovi rezultati su također ohrabrujući i u ekonomskom smislu jer omogućuju daljnje uštede na osnovi smanjenja penala na emisije CO_2 , a čime se posljedično također povećava profitabilnost rada postrojenja (Delija-Ružić, Hublin i drugi, 2021).

Konačno, ovdje je također potrebno napomenuti da navedena analiza nije uključila utjecaj smanjenja eksploatacije generatora u smislu kraćega kumulativnoga vremena rada kojeg omogućuje korištenje baterijskoga sustava za pohranu energije. Naime, to bi moglo pružiti dodatne pogodnosti u smislu produljenja životnoga vijeka dizelskih agregata zbog smanjenog trošenja mehaničkih komponenti, te povezanoga smanjenja troškova održavanja dizelskih agregata i duljih intervala između dva redovita remonta (Pavković, Sedić i drugi, 2016).

7. Zaključak

U radu su prikazani rezultati analize mjera za poboljšanje energetske učinkovitosti trofazne izmjenične mikromreže izoliranoga bušačega postrojenja opremljenoga dizel-agregatnom elektranom i baterijskim sustavom za pohranu energije. Pritom je upravljanje takvom hibridnom mikromrežom obuhvatilo strategiju uključivanja i isključivanja dizelskih generatora na temelju prosječnoga opterećenja mikromreže i pokrivanje vršnih opterećenja iz prikladno odabranoga baterijskoga sustava za pohranu energije. Analiza se temeljila na prethodno snimljenim podacima konvencionalne mikromreže bušačega postrojenja, opremljene dizelskim agregatima, zabilježenih tijekom 30-dnevnog razdoblja intenzivnog bušenja.

Snimljeni rezultati ukazuju na jasan potencijal za smanjenje broja generatora koji podržavaju mikromrežu, uz uvjet da se vršna opterećenja mogu pokriti iz odgovarajuće dimenzioniranog sustava za pohranu energije. U radu se stoga predlaže baterijski sustav za pohranu energije temeljen na litij-željezo-fosfatnim (LiFePO_4) baterijskim ćelijama opremljen energetskim pretvaračem prema izmjeničnoj mreži

odgovarajuće nazivne prividne snage. Na temelju odabrane konfiguracije sustava za pohranu energije procijenjen je trošak investicije i troškovi održavanja unutar očekivanog 10-godišnjeg životnog vijeka, što sveukupno iznosi 289 000 EUR prema dostupnim podacima iz relevantne literature.

Učinkovitost predloženog sustava hibridne mikromreže provjerena je simulacijama na računalu korištenjem terenskih podataka kao ulazima. Usporedni rezultati pokazali su jasan potencijal za smanjenje potrošnje dizelskoga goriva hibridne, u odnosu na konvencionalnu dizel-agregatnu elektranu, od 12 %. Razdoblje povrata investicije baterijskoga sustava za pohranu energije procijenjeno je negdje između jedne i dvije godine, ovisno o stupnju iskorisćenosti elektrane, što u potonjem slučaju predstavlja 20 % predviđenoga kalendarskog vijeka trajanja baterijskoga sustava, uz očekivani dodatni profit koji može prijeći 1,5 milijuna EUR unutar očekivanog kalendarskoga životnoga vijeka baterijskoga sustava

za pohranu energije. Na temelju prethodno spomenutih procjena uštede goriva, također je identificiran značajan potencijal smanjenja emisija CO₂, s projiciranim smanjenjem atmosferskih emisija CO₂ od približno 5 000 tona za razmatrano bušaće postrojenje tijekom predviđenoga vijeka trajanja baterijskoga sustava. Ovo smanjenje emisija također može ući u ukupnu ekonomsku bilancu temeljem tarifa za smanjenje emisija CO₂ čime se dodatno povećava profitabilnost rada postrojenja.

Zahvala

Ovom prilikom se zahvaljujemo tvrtkama CROSCO i Nev-El na pruženoj podršci tijekom snimanja profila opterećenja mikromreže na bušaćem postrojenju. Posebno se zahvaljujemo kolegama Josipu Miškoviću, dipl. ing. (CROSCO) i Zdravku Kučanu, ing. (Nev-El) na stručnoj i tehničkoj pomoći u provedbi mjerenja.

Literatura

1. BATTKE, B, SCHMIDT, T. S., GROSSPIETSCH, D. & HOFFMANN, V. H.: A review and probabilistic model of lifecycle costs of stationary batteries in multiple applications, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2013, 25, 240-250.
2. BESSELINK, I. J. M., VAN OORSCHOT, P. F., MEINDERS, E. & NIJMEIJER, H.: Design of an efficient, low weight battery electric vehicle based on VW Lupo 3L, *Proceedings of the 25th World Battery, Hybrid and Fuel Cell Electric Vehicle Symposium & Exhibition (EVS 25)*, 2010, Shenzhen, China, 10 pages.
3. CALDEIRA, P. P. A. & WATANABE, E. H.: Compensation of Power Factor in Rectifier Systems Utilized in Oil Drilling Rigs, *IEEE Transactions on Industry Applications*, 1988, 24, 2, 301-307.
4. CATERPILLAR TRACTOR CO.: Caterpillar D399 Marine Generator Set, Technical Data Sheet, <https://marine.cat.com/cat-D399>, 2015. [pristupljeno 15.11.2015.]
5. DELIJA-RUŽIĆ, V., HUBLIN, A., MARKOVIĆ, B., STANKIĆ, I., KOS, R., OPETUK, F., JELAVIĆ, V., RADOŠ, D., ŠVEDEK, I., POLJANAC, M., ČESNIK KATULIĆ, M., GLÜCKSELIG, B. & HIMA, S.: Report on Implementation of Policies and Measures that Reduce Greenhouse Gas Emissions by Sources or Enhance Removals by Sinks, EKONERG – Energy Research and Environmental Protection Institute, 2021, Report to Ministry of Economy and Sustainable Development (Contract No. 99/18 (I-08-0171)), Zagreb, Croatia.
6. EUROPEAN COMMISSION: Weekly Oil Bulletin: Consumer prices of petroleum products, (<http://ec.europa.eu/energy/>), November, 2015. [pristupljeno 15.11.2015.]
7. FERNÃO-PIRES, V., ROMERO-CADAVAL, E., VINNIKOV, D., ROASTO, I. & MARTINS, J. F.: Power converter interfaces for electrochemical energy storage systems – A review, *Energy Conversion and Management*, 2014, 86, 453-475.
8. GUARINO, F., CASSARÀ, P., LONGO, S., CELLURA, M. & FERRO, E.: Load match optimisation of a residential building case study: A cross-entropy based electricity storage sizing algorithm, *Applied Energy*, 2015, 154, 380-391.
9. HOPKINS, D., FOX, I. & MOLDEN, D.: Gas Powered Engines with Energy Storage – A Game Changer in Land Drilling, *Proceedings of IADC/SPE International Drilling Conference and Exhibition*, 2020. Paper No. IADC/SPE-199671-MS, 11 pages, Galveston, TX, USA.
10. HUNT, G. & SZYMBORSKY, J.: Achievements of an ABSOLYTE Valve-Regulated Lead-Acid Battery Operating in a Utility Battery Energy Storage System (BESS) for 12 years, *EESAT 2009 Biennial International Conference*, 2009, Seattle, WA, USA.
11. IRENA – International Renewable Energy Agency: Road Transport: The Cost of Renewable Solutions, IRENA's Costing Study (<http://www.irena.org/publications>), 2013. [pristupljeno 15.11.2015.]

12. KAISER, M. J. & SNYDER, B. F.: The Offshore Drilling Industry and Rig Construction in the Gulf of Mexico, Lecture Notes in Energy 8, Springer-Verlag, London, UK, 2013, 367 p.
13. KALDELLIS, J. K., ZAFIRAKIS, D. & KAVADIAS, K.: Techno-economic comparison of energy storage systems for island autonomous electrical networks, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2009, 13, 2, 378-392.
14. KANOĞLU, M., İŞİK, S. K. & ABUŞOĞLU, A.: Performance characteristics of a Diesel engine power plant, *Energy Conversion and Management*, 2005, 46, 11-12, 1692-1702.
15. KATIRAEI, F. & ABBEY, C.: Diesel Plant Sizing and Performance Analysis of a Remote Wind-Diesel Microgrid, *Proceedings of the IEEE Power and Energy Society 2007 General Meeting*, 2007. Tampa, FL, USA, 8 pages.
16. KIM, J.-Y., JEON, J.-H., KIM, S.-K., CHO, C., PARK, J. H., KIM, H.-M. & NAM, K.-Y.: Cooperative Control Strategy of Energy Storage System and Microsources for Stabilizing the Microgrid during Islanded Operation, *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2010, 25, 12, 3037-3048.
17. KOOHI-KAMALI, S., RAHIM, N. A. & MOKHLIS, H.: Smart power management algorithm in microgrid consisting of photovoltaic, diesel, and battery storage plants considering variations in sunlight, temperature, and load, *Energy Conversion and Management*, 2014, 84, 562-582.
18. LYONS, W. C. & PLISGA, G. J.: Standard handbook of petroleum and natural gas engineering, 2nd ed., Houston, Texas, Gulf Professional Publishing, 2005, 1569 p.
19. OMAR, N., MONEM, M. A., FIROUZ, Y., SALMIEN, J., SMEKENS, J., HAGAZY, O., GAULOUS, H., MULDER, G., VAN DEN BOSSCHE, P., COOSEMANS, T. & VAN MIERLO, J.: Lithium Iron Phosphate Based Battery – Assessment of Aging Parameters and Development of Life Cycle Model, *Applied Energy*, 2014, 113, 1575-1585.
20. PAVKOVIĆ, D., HOIĆ, M., DEUR, J. & PETRIĆ, J.: Energy Storage Systems Sizing Study for a High-Altitude Wind Energy Application, *Energy*, 2014, 76, 91-103.
21. PAVKOVIĆ, D., SEDIĆ, A. & GUZOVIĆ, Z.: Oil Drilling Rig Diesel Power-plant Fuel Efficiency Improvement Potentials through Rule-Based Generator Scheduling and Utilization of Battery Energy Storage System, *Energy Conversion and Management*, 2016, 121, 194-211.
22. PAVKOVIĆ, D., ŠPRLJAN, P., CIPEK, M. & KRZNAR, M.: Cross-Axis Control System Design for Borehole Drilling based on Damping Optimum Criterion and Utilization of Proportional-Integral Controllers, *Optimization and Engineering*, 2021, 22, 1, 51-81.
23. POULLIKKAS, A. A comparative overview of large-scale battery systems for electricity storage, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2013, 27, 778-788.
24. RAHIMI-EICHI, H., OJHA, U., BARONTI, F. & CHOW, M.-Y.: Battery Management System – An Overview of Its Application in the Smart Grid and Electric Vehicles, *IEEE Industrial Electronics Magazine*, 2013, 7, 2, 5-16.
25. SAUER, D. U. & WENZL, H.: Comparison of Different Approaches for Lifetime Prediction of Electrochemical Systems – using Lead-Acid Batteries as Example, *Journal of Power Sources*, 2008, 178, 2, 531-546.
26. SEN, P. C. & DORADLA, S. R.: Symmetrical and Extinction Angle Control of Solid-State Series Motor Drive, *IEEE Transactions on Industrial Electronics and Control Instrumentation*, 1976, 23, 1, 31-38.
27. YADAV, P., KUMAR, R., PANDA, S. K. & CHANG, C. S.: An Improved Harmony Search algorithm for optimal scheduling of the diesel generators in oil rig platforms, *Energy Conversion and Management*, 2011, 52, 2, 893-902.