

INTEGRACIJA SKLADIŠTENJA ENERGIJE U DISTRIBUTIVNE MREŽE: EKONOMSKE I TEHNIČKE PERSPEKTIVE / INTEGRATION OF ENERGY STORAGE INTO DISTRIBUTION NETWORKS: ECONOMIC AND TECHNICAL PERSPECTIVES

BSc. maš. Belmin Šehić¹, V. prof.dr Saša Đekić¹

¹IUT, Fakultet politehničkih nauka Travnik, Aleja Konzula – Meljanac bb, 72270 Travnik, BiH
e-mail: belminsehic62@gmail.com, prof.dr.sasa.djekic@gmail.com

Pregledni članak

<https://www.doi.org/10.58952/zr20251401057>

UDK / UDC 621.31:620.9:338.5

Sažetak

Integracija skladištenja energije u distributivne mreže postaje ključni faktor modernizacije elektroenergetskih sistema. Ovaj rad istražuje različite tehnologije skladištenja energije, uključujući baterijske sisteme, pumpno skladištenje, termičko skladištenje i kinetičke sisteme, analizirajući njihove prednosti i nedostatke. Poseban fokus stavljen je na ulogu skladištenja energije u distributivne mreže, s tehničke i ekonomske perspektive. Tehnički izazovi uključuju prilagođavanje postojeće infrastrukture, razvoj pametnih mreža te osiguranje stabilnosti i sigurnosti sistema. Ekonomska analiza obuhvata troškovnu isplativost, koristi za mrežu i potrošače te regulatorne aspekte koji utiču na implementaciju skladištenja energije. Kroz studije slučaja prikazani su primjeri uspješne primjene skladištenja energije u svijetu i mogućnosti njegove implementacije u lokalnim elektroenergetskim mrežama. Zaključak rada ističe ključne prednosti skladištenja energije i preporuke za dalju integraciju, uz naglasak na potrebne regulatorne reforme i tehnološka poboljšanja kako bi se maksimizirala efikasnost i ekonomska isplativost ovih sistema.

Ključne riječi: skladištenje energije, distributivne mreže, integracija
JEL klasifikacija: Q42

Abstract

The integration of energy storage into distribution networks is becoming a key in the modernization of power systems. This paper explores various energy storage technologies, including battery systems, pumped storage, thermal storage, and kinetic storage, analyzing their advantages and disadvantages. A particular focus is placed on the role of energy storage in distribution networks from both a technical and economic perspective. Technical challenges include adapting existing infrastructure, developing smart grids, and ensuring systems stability and security. The economic analysis covers cost / effectiveness, benefits for the grid and consumers, and regulatory aspects influencing the implementation of storage systems. Through case studies, examples of successful energy storage applications worldwide are presented, along with opportunities for their implementation in local power networks. The conclusion highlights the key benefits of energy storage and provides recommendations for further integration, emphasizing the need for regulatory reforms and technological improvements to maximize the efficiency and economic viability of these systems.

Keywords: energy storage, distribution networks, integration
JEL classification: Q42

UVOD

U savremenom dobu, skladištenje energije postalo je ključni element elektroenergetskih sistema širom svijeta. Njegova važnost se ogleda u sposobnosti da poveća fleksibilnost, stabilnost i efikasnost elektroenergetskih mreža, posebno u kontekstu rastuće integracije obnovljivih izvora energije, kao što su solarna i vjetroenergije. Ove tehnologije, iako ekološki prihvatljive, često karakteriše varijabilna proizvodnja koja ne prati uvijek trenutne potrebe potrošača. Skladištenje energije omogućava balansiranje ponude i potražnje, čime smanjuje opterećenje mreže i povećava njenu pouzdanost. Skladištenje energije obuhvata niz tehnologija koje omogućavaju privremeno čuvanje energije radi kasnije upotrebe. Među najpoznatijim tehnologijama su baterijski sistemi, pumpno skladištenje energije, termalno skladištenje energije i kinetički sistemi. Svaka od ovih tehnologija ima svoje prednosti i nedostatke, ali zajednički cilj im je optimizacija energetskeg sistema i povećanje njihove održivosti.

Razvoj skladištenja energije ima višestruke benefite za elektroenergetski sektor i društvo u cjelini. Na tehničkom nivou, skladištenje omogućava regulaciju frekvencije i napona, smanjuje gubitke u mreži i povećava stabilnost sistema. Na ekonomskom nivou, doprinosi smanjenju troškova energije u vrijeme vršnih opterećenja i smanjuje potrebu za velikim ulaganjima u novu infrastrukturu. Također, skladištenje energije podržava globalne ciljeve dekarbonizacije i prelazak na održive izvore energije.

Cilj ovog rada je da pruži sveobuhvatan pregled tehničkih i ekonomskih aspekata integracije skladištenja energije u distributivne mreže. Kroz detaljnu analizu različitih tehnologija skladištenja energije, njihovih tehničkih karakteristika i ekonomskih efekata, rad će pokazati kako skladištenje energije može igrati ključnu ulogu u transformaciji elektroenergetskih sistema. Poseban fokus biti će na tehničkim izazovima, ekonomskim analizama i regulatornim okvirima koji utiču na implementaciju ovih sistema.

Rad se zasniva na analizi relevantne stručne literature, tehničkih izvještaja, naučnih radova i studija slučaja iz prakse. Kombinovanjem kvalitativnih i kvantitativnih pristupa, cilj je pružiti sveobuhvatan pregled trenutnog stanja u oblasti skladištenja energije, kao i potencijala za njegovu integraciju u distributivne mreže.

Ovaj rad doprinosi boljem razumijevanju skladištenja energije i njegove uloge u modernim elektroenergetskim sistemima. Pruža korisne informacije za inženjere, istraživače, donosiocel odluka i sve zainteresovane za unapređenje distributivnih mreža. Također, rad naglašava važnost ulaganja u skladišne tehnologije kao ključnog faktora za održivu energetskeg budućnost.

1. PREGLED TEHNOLOGIJA SKLADIŠTENJA ENERGIJE

Skladištenje energije predstavlja ključni element modernih elektroenergetskih sistema, omogućavajući fleksibilnost i stabilnost mreže, posebno u kontekstu rastuće integracije obnovljivih izvora energije. Postoji širok spektar tehnologija za skladištenje energije, od kojih svaka ima svoje specifične karakteristike, prednosti i ograničenja. U ovom poglavlju detaljno se analizira četiri glavne vrste tehnologija skladištenja energije: baterijski sistemi, pumpno skladištenje energije, termalno skladištenje i kinetičko skladištenje. Također, analiziraju se njihove prednosti i nedostaci.

1.1. BATERIJSKI SISTEMI

Baterijski sistemi za skladištenje energije trenutno su među najčešće korištenim tehnologijama zahvaljujući njihovoj fleksibilnosti, brzom odzivu i skalabilnosti. Najpopularnije vrste baterijskih sistema uključuju litijum – jonske (Li – ion) baterije, natrijum – sumporne (NaS) baterije i olovno kisele baterije.

- **Litijum – jonske baterije (Li – ino):** ove baterije karakteriše visoka energetska gustoća, što znači da mogu skladištiti veliku količinu energije u malom prostoru. Njihova glavna prednost je dug životni vijek, visoka efikasnost punjenja i pražnjenja (preko 90 %) i brza reakcija na promjenu u potražnji. Međutim, izazovi uključuju visoke troškove proizvodnje i ograničenu dostupnost litijuma kao resursa. Koriste se u kućnim sistemima, električnim vozilima i velikim mrežnim instalacijama.
- **Natrijum – sumporne baterije (NaS):** ove baterije su idealne za velike sisteme skladištenja energije zbog njihovog visokog vijeka trajanja. Međutim, rade na visokim temperaturama (300 – 350 °C), što zahtijeva dodatne troškove za instalaciju i održavanje. Pogodne su za industrijske aplikacije i mrežne sisteme.
- **Olovno – kisele baterije:** ovo je najstarija tehnologija baterijskog skladištenja, poznata po niskim troškovima i jednostavnosti upotrebe. Međutim, ove baterije imaju kratak životni vijek i nižu efikasnost (60 – 80 %) u poređenju sa modernim tehnologijama. Koriste se u rezervnim sistemima napajanja i manjim aplikacijama.

1.2. PUMPNO SKLADIŠTENJE ENERGIJE

Pumpno skladištenje energije najstarija je i najraširenija tehnologija skladištenja energije. Ova tehnologija koristi višak električne energije za pumpanje vode iz donjeg u gornji rezervoar. Kada je potražnja za energijom visoka, voda se ispušta kroz turbine, generišući električnu energiju. Pumpno skladištenje se uglavnom koristi za balansiranje elektroenergetskih mreža i podršku vršnim opterećenjima.

1.3. TERMALNO SKLADIŠTENJE ENERGIJE

Termalno skladištenje energije podrazumijeva čuvanje energije u obliku toplote ili hladnoće za kasniju upotrebu. Ova tehnologija često se koristi u kombinaciji sa obnovljivim izvorima energije, kao što su solarni termalni sistemi. Načini skladištenja su:

- **Skladištenje toplote:** koriste se rastopljene soli, vodi ili drugi materijali za skladištenje toplote proizvede u toku dana.
- **Skladištenje hladnoće:** hladna energija se skladišti u ledu ili tečnim azotom.

Koristi se u industrijskim procesima, centralnim sistemima grijanja i hlađenja, kao i u solarnim elektranama.

1.4. KINETIČKO SKLADIŠTENJE ENERGIJE

Kinetičko skladištenje energije koristi rotirajuće mase za čuvanje kinetičke energije. Kada je dostupan višak energije rotirajuća masa se ubrzava, a energija se čuva u obliku rotacione energije. Kada je potrebno, rotacija se usporava i energija oslobađa. Primjenjuje se za aplikacije koje zahtijevaju brzu reakciju, kao što su regulacija frekvencije i podrška kritičnim sistemima.

1.5. PREDNOSTI I NEDOSTACI TEHNOLOGIJA

Tehnologije skladištenja energije razlikuju se po tehničkim karakteristikama, ekonomskim troškovima i primjenama.

Tabela 1. Prednosti i nedostaci tehnologija skladištenja energije

TEHNOLOGIJA	PREDNOSTI	NEDOSTACI
Baterijski sistemi	Brz odziv, visoka efikasnost, stabilnost	Visoki troškovi, ograničen vijek trajanja
Pumpno skladištenje	Veliki kapacitet, dug vijek trajanja, niska cijena rada	Geografska ograničenja, visoki početni troškovi
Termalno skladištenje	Niska cijena, dug vijek trajanja	Ograničena fleksibilnost, potreba za velikim prostorom
Kinetičko skladištenje	Brz odziv, dug vijek trajanja, ekološki prihvatljivo	Ograničen kapacitet, visoki troškovi za velike sisteme

2. ULOGA SKLADIŠTENJA ENERGIJE U DISTRIBUTIVNIM MREŽAMA

Skladištenje energije igra ključnu ulogu u modernim distributivnim mrežama, omogućavajući fleksibilnost, stabilnost i efikasnost rada sistema. Integracija skladištenja energije omogućava distributivnim mrežama da bolje odgovore na izazove kao što su fluktuacije u potrošnji i proizvodnji energije, posebno u kontekstu sve veće penetracije obnovljivih izvora energije. Uloga skladištenja energije, može se analizirati kroz tehničku i ekonomsku perspektivu.

2.1. TEHNIČKA PERSPEKTIVA

Tehnički aspekti skladištenja energije u distributivnim mrežama odnose se na njegovu sposobnost da doprinese stabilnosti i pouzdanosti mreže. Ključne tehničke uloge uključuju:

- 1. Smanjenje opterećenja i balansiranje mreže:** distributivne mreže često se suočavaju s problemima preopterećenja tokom vršnih opterećenja. Skladištenje energije omogućava preusmjeravanje viška energije iz perioda niske potrošnje u period velike potrošnje. Na primjer: tokom noći, kada je potrošnja energije niska, skladišni sistemi mogu akumulirati energiju. Tokom dana, kada potražnja raste, ta energija se vraća u mrežu, čime se smanjuje opterećenje na mrežnu infrastrukturu. Efekti su: produžava vijek trajanja opreme u mreži, smanjuje potrebu za skupim nadogradnjama mreže.
- 2. Regulacija frekvencije i napona:** skladištenje energije omogućava brzo reagovanje na promjene u frekvenciji i naponu u mreži, što je ključno za stabilnost elektroenergetskog sistema.
 - Frekvencija: promjene u proizvodnji i potrošnji mogu izazvati oscilacije frekvencije. Skladišni sistemi brzo oslobađaju ili apsorbiraju energiju kako bi stabilizovali frekvenciju.
 - Napon: u udaljenim dijelovima mreže, skladišni sistemi mogu pomoći u održavanju stabilnog napona, smanjujući gubitke i povećavajući efikasnost.
- 3. Podrška integraciji obnovljivih izvora energije:** obnovljivi izvori energije, poput solarnih panela i vjetroturbina, često proizvode energiju na nepredvidljiv način, zavisno od vremenskih uslova.
 - a) Skladištenje energije kao rješenje:**
 - Akumulacija viška energije proizvedene tokom perioda visoke proizvodnje (npr. tokom sunčanih dana ili jakog vjetro),

- Oslobađanje energije tokom perioda niske proizvodnje (npr. noću ili kada nema vjetra).

b) Prednosti:

- Smanjuje potrebu za angažovanjem rezervnih kapaciteta na fosilna goriva,
- Omogućava veću penetraciju OIE u mrežu bez ugrožavanja stabilnosti sistema.

- c) Hitne intervencije i sigurnost napajanja:** skladištenje energije može služiti kao rezervni izvor napajanja tokom hitnih situacija, poput nestanka struje ili kvara na mreži. Primjena: hitno napajanje kritičnih infrastruktura, kao što su bolnice, vodovodni sistem i telekomunikacije, održavanje minimalnog nivoa napajanja za potrošače tokom vremenskih nepogoda.

2.2. EKONOMSKA PERSPEKTIVA

Ekonomski aspekti skladištenja energije u distributivnim mrežama fokusiraju se na smanjenje troškova, povećanje efikasnosti i stvaranje novih poslovnih modela. Ključne ekonomske koristi uključuju:

- 1. Smanjenje troškova energije u vrijeme vršnih opterećenja:** skladištenje energije omogućava izravnavanje opterećenja, čime se smanjuju troškovi energije tokom vršnih opterećenja.

a) Kako funkcioniše:

- Energija se skladišti tokom perioda kada su cijene električne energije niske (npr. noću),
- Ta energija se koristi tokom perioda kada su cijene visoke (npr. tokom dana).

- b) Efekti:** smanjenje troškova za distributivne firme i krajnje korisnike, smanjenje potrebe za skupim vršnim elektranam.

- 2. Povećanje efikasnosti mreže i smanjenje gubitaka:** distributivne mreže gube značajan dio energije tokom prenosa i distribucije, posebno na velikim udaljenostima.

a) Rješenje kroz skladištenje:

- Skladištenje energije na lokalnom nivou smanjuje potrebu za dugim prenosom energije,
- Gubici energije se minimiziraju, a efikasnost mreže raste.

- b) Ekonomski efekti:** manji troškovi održavanja i nadogradnje mreže, bolja isplativost postojećih resursa.

- 3. Potencijal za smanjenje ulaganja u novu infrastrukturu:** skladištenje energije može odložiti ili potpuno eliminisati potrebu za velikim ulaganjima u novu infrastrukturu, poput dalekovoda, trafostanica i elektrana.

a) Primjeri:

- umjesto izgradnje nove trafostanice u području s rastućom potrošnjom, skladišni sistemi mogu zadovoljiti povećanu potražnju,
- fleksibilnost skladištenja omogućava bolje upravljanje postojećim kapacitetima.

- 4. Stvaranje novih poslovnih modela:** integracija skladištenja energije otvara mogućnosti za nove poslovne modele u elektroenergetskom sektoru.

a) Primjeri:

- **Agregatori energije:** firme koje upravljaju distribuiranim skladištima energije i pružaju usluge balansiranja mreže,
- **Programi potrošačke fleksibilnosti:** potrošači mogu prodavati višak energije iz svojih skladišnih sistema nazad u mrežu.

- b) **Ekonomске koriti:** stvaranje dodatnih prihoda za korisnike i distributivne firme, razvoj tržišta za usluge skladištenja energije.
- 5. **Podsticaji i regulatorni okvir:** regulatorne politike i podsticaji igraju ključnu ulogu u ekonomskoj isplativosti skladištenja energije.
 - a) **Podsticaji:**
 - Subvencije za instalaciju skladišnih sistema,
 - Porezne olakšice za firme koje ulažu u skladištenje energije.
 - b) **Regulatorni izazovi:**
 - Potreba za prilagođavanjem postojećih zakona kako bi se omogućila integracija skladištenja energije,
 - Jasna pravila o vlasništvu i upravljanju skladišnim sistemima.

3. TEHNIČKI IZAZOVI INTEGRACIJE

Integracija skladištenja energije u distributivne mreže predstavlja složen proces koji zahtjeva značajne tehničke prilagodbe i unapređenja. Ovi izazovi uključuju prilagođavanje postojeće infrastrukture, razvoj pametnih mreža i osiguranje stabilnosti i sigurnosti elektroenergetskog sistema. Tehnički izazovi su ključni za uspješnu implementaciju skladišnih sistema i njihovu integraciju s postojećim mrežama.

3.1. PRILAGODBA POSTOJEĆE INFRASTRUKTURE

Postojeća elektroenergetska infrastruktura često nije dizajnirana za integraciju skladišnih sistema, što zahtjeva prilagođavanje na više nivoa:

1. Kapacitet mreže za prihvatanje skladišnih sistema: mnoge distributivne mreže imaju ograničen kapacitet za prihvatanje novih izvora energije u skladišni sistem. Potrebno je proširiti kapacitete trafostanica, dalekovoda i ostalih elemenata mreže kako bi se osigurala integracija skladišta energije. Na primjer, integracija velikih baterijskih sistema može zahtijevati značajne izmjene u lokalnim trafostanicama kako bi se osigurala kompatibilnost sa postojećim naponskim nivoima.
2. Kompatibilnost sa postojećim tehnologijama: većina postojećih mreža koristi zastarjele tehnologije koje nisu prilagođene radu s naprednim skladišnim sistemima. Integracija skladišnih sistema zahtjeva implementaciju novih standarda i protokola za komunikaciju između skladišta i mreže. Na primjer, skladišni sistemi moraju biti kompatibilni s obnovljivim izvorima energije poput solarnih panela i vjetroturbina.
3. Modernizacija opreme: potrebna je zamjena ili unapređenje transformatora, prekidača i zaštitnih uređaja kako bi se omogućio rad sa skladišnim sistemima. Oprema mora biti sposobna da se nosi s brzim promjenama opterećenja koje skladišni sistemi mogu izazvati.

3.2. PAMETNE MREŽE

Pametne mreže igraju ključnu ulogu u integraciji skladišnih sistema, omogućavajući dinamično upravljanje energijom i optimizaciju rada mreže.

1. Digitalizacija i automatizacija: pametne mreže koriste digitalne tehnologije za praćenje i upravljanje energijom u realnom vremenu. Senzori, napredna brojila i softverski sistemi omogućavaju brzu detekciju i reakciju na promjene u mreži. Na primjer, kada skladišni sistem detektuje povećanu potrošnju, može automatski osloboditi energiju kako bi stabilizovao mrežu.

2. Upravljanje distribuiranim izvorima energije (DER): pametne mreže omogućavaju integraciju skladišnih sistema sa distribuiranim izvorima energije, kao što su solarni paneli i vjetroturbine. Sistem može automatski balansirati proizvodnju i potrošnju energije, smanjujući gubitke i povećavajući efikasnost.
3. Prediktivna analitika i optimizacija: pametne mreže koriste podatke za predviđanje potrošnje energije i optimizaciju rada skladišnih sistema. Na primjer, mreža može predvidjeti vršna opterećenja i unaprijed pripremiti skladišne sisteme za oslobađanje energije.
4. Integracija sa elektromobilitetom: električna vozila i njihovi punjači mogu biti integrirani u pametne mreže kao dodatni skladišni kapacitet. Ovo omogućava korištenje baterija vozila za stabilizaciju mreže tokom vršnih opterećenja.

3.3. SIGURNOST I STABILNOST MREŽE

Sigurnost i stabilnost mreže ključni su izazovi u integraciji skladišnih sistema, posebno u kontekstu povećane kompleksnosti mreže.

1. Harmonijska izobličenja: brze promjene u punjenju i pražnjenju skladišnih sistema mogu izazvati harmonijska izobličenja u mreži. Ovo može negativno uticati na rad osjetljive opreme i smanjiti kvalitet električne energije. Rješenje bi bilo implementacija filtera harmonijskih izobličenja i naprednih algoritama za upravljanje skladišnim sistemima.
2. Prevencija nestabilnosti mreže: velike fluktuacije u proizvodnji i potrošnji energije mogu izazvati nestabilnost mreže. Skladišni sistemi moraju biti sposobni da brzo reguju i stabilizuju mrežu tokom takvih situacija.
3. Zaštita od kibernetičkih napada: pametne mreže i skladišni sistemi povezani su putem digitalnih komunikacionih mreža, što ih čini podložnim kibernetičkim napadima. Rješenje bi bila implementacija naprednih sigurnosnih protokola i enkripcije za zaštitu podataka.
4. Pouzdanost skladišnih sistema: skladišni sistemi moraju biti pouzdani i dugotrajni kako bi osigurali stabilnost mreže. Na primjer, degradacija baterijskih sistema tokom vremena može smanjiti njihovu efikasnost i kapacitet.
5. Koordinacija između više aktera: integracija skladišnih sistema zahtjeva koordinaciju između distributivnih firmi, proizvođača energije i krajnjih korisnika. Ovo uključuje razvoj standardizovanih protokola za komunikaciju i upravljanje.

4. EKONOMSKE PERSPEKTIVE I ANALIZE

Ekonomski aspekti integracije skladištenja energije u distributivne mreže predstavljaju ključni faktor u procjeni njihove održivosti i isplativosti. Ove analize uključuju procjenu troškova, koristi i uticaja regulatornog okvira na implementaciju skladišnih sistema. Razumijevanje ovih perspektiva omogućava donošenje informisanih odluka o ulaganjima, razvoju politike i implementaciji tehnologija.

4.1. TROŠKOVNA ANALIZA

Troškovna analiza obuhvata sve direktne i indirektne troškove povezane s implementacijom skladišnih sistema, uključujući početne investicije, operativne troškove i troškove održavanja.

a) Komponente troškova:

1. Kapitalni troškovi (CAPEX): uključuju nabavku, instalaciju i povezivanje skladišnih sistema s distributivnom mrežom. Zavisno o vrsti tehnologije, kapitalni troškovi mogu varirati. Na primjer, baterijski sistemi (Li – ion) imaju veće početne troškove

u poređenju sa reverzibilnim hidroelektranama, ali zauzimaju manje prostora i nude bržu instalaciju.

2. Operativni troškovi (OPEX): obuhvataju troškove rada, energije za punjenje skladišta i tehničkog održavanja. Kod baterijskih sistema, zamjena komponenti poput elektroda može biti značajan operativni trošak.
 3. Troškovi održavanja: redovno održavanje je ključno za produženje životnog vijeka sistema. Na primjer, reverzibilne hidroelektrane zahtijevaju održavanje turbina i pumpi, dok baterijski sistemi trebaju kontrolu temperaturnih uslova.
 4. Troškovi dekomisije: na kraju životnog vijeka sistema, troškovi zbrinjavanja i reciklaže (posebno kod baterijskih sistema) također ulaze u ukupnu troškovnu analizu.
- b) **Uticaj skale na troškove:** veći skladišni sistemi često imaju niže troškove po jedinici kapaciteta zbog ekonomije obima. Decentralizovani sistemi, iako manji, mogu zahtijevati više ulaganja u upravljanje i koordinaciju.
- c) **Primjeri troškovnih analiza:** instalacija baterijskih skladišta kapaciteta 10 MWh može koštati između 300 i 500 dolara po kWh, zavisno od regije i proizvođača. Reverzibilne hidroelektrane, iako zahtijevaju veće početne investicije, imaju niže operative troškove zbog dugog životnog vijeka i pouzdanosti.

4.2. ANALIZA KORISTI

Analiza koristi uključuje procjenu ekonomske, tehničke i društvene vrijednosti koju skladišni sistemi donose distributivnim mrežama i krajnjim korisnicima.

- a) **Ključne koristi:**
1. Smanjenje troškova energije: skladištenje energije omogućava kupovinu energije tokom perioda niske cijene i njenu upotrebu tokom perioda vršne cijene. Ovo smanjuje troškove za krajnje korisnike i distributivne firme.
 2. Odlaganje ulaganja u infrastrukturu: umjesto izgradnje novih dalekovoda i trafostanica, skladišni sistemi preuzimaju višak opterećenja, čime se smanjuju kapitalni troškovi za proširenje mreže.
 3. Smanjenje gubitaka energije: lokalno skladištenje energije smanjuje potrebu za prenosom energije na velike udaljenosti, čime se smanjuju gubici u mreži.
 4. Podrška integraciji obnovljivih izvora energije: skladišni sistemi omogućavaju akumulaciju viška energije iz solarnih panela i vjetroelektrana, čime se povećava njihova upotrebljivost i smanjuje zavisnost o fosilnim gorivima.
 5. Pобољшanje kvaliteta napajanja: skladištenje energije stabilizuje frekvenciju i napon, čime se poboljšava pouzdanost napajanja za krajnje korisnike.
- b) **Ekonomija na strani krajnjih korisnika:** krajnji korisnici, poput industrijskih potrošača, mogu koristiti skladišne sisteme za smanjenje troškova energije tokom vršnih opterećenja. Prosumerski modeli omogućavaju korisnicima prodaju viška energije nazad u mrežu, generišući dodatni prihod.

4.3. REGULATORNI OKVIR

Regulatorni okvir igra ključnu ulogu u podršci i razvoju skladišnih sistema energije. Jasne politike, podsticaji i tržišni mehanizmi omogućavaju ekonomski održivu integraciju ovih tehnologija.

a) Podsticaji i subvencije:

1. Subvencije za instalaciju: Vlade mnogih zemalja nude subvencije za instalaciju skladišnih sistema kako bi potaknule njihovu širu primjenu. Na primjer, u Australiji se nudi 5 000 dolara subvencije za instalaciju kućnih baterijskih sistema.
2. Porezne olakšice: firme koje ulažu u skladištenje energije mogu ostvariti porezne olakšice, čime se smanjuju troškovi kapitalnih ulaganja.
3. Podrška istraživanju i razvoju: investicije u istraživanje novih tehnologija skladištenja, poput čvrstih baterija, mogu smanjiti troškove i povećati efikasnost.

b) Tržišni mehanizmi:

1. Pristup tržištima električne energije: skladišni sistemi mogu učestvovati na tržištima za pomoćne usluge, poput balansiranja frekvencije i regulacije napona, čime stvaraju dodatni prihod.
2. Dinamičke tarife: uvođenje dinamičkih tarifa omogućava korisnicima da optimiziraju upotrebu skladišta energije prema cijenama električne energije na tržištu.

c) Regulatorni izazovi:

1. Pravila vlasništva: potrebno je jasno definisati ko ima pravo na upravljanje skladišnim sistemima – distributivne firme, nezavisni operateri ili krajnji korisnici.
2. Standardizacija i interoperabilnost: nedostatak standarda za integraciju skladišnih sistema može otežati njihovu primjenu u različitim mrežama.

d) Primjeri regulatornih politika: u Kaliforniji, zakon zahtijeva da energetske firme instaliraju skladišne sisteme kapaciteta 1325 MW do 2030. godine. Evropska unija podržava skladištenje energije kroz Fond za inovacije i Zeleni dogovor.

5. STUDIJE SLUČAJA

Studije slučaja pružaju detaljan uvid u praktične aspekte implementacije skladišnih sistema energije širom svijeta i njihovu primjenjivost u različitim kontekstima. Analiza stvarnih primjera omogućava bolje razumijevanje tehničkih, ekonomskih i regulatornih izazova i koristi koje skladišni sistemi mogu doprinijeti distributivnim mrežama. Također, ove studije pomažu u identifikaciji ključnih faktora uspjeha i potencijalnih prepreka za primjenu u lokalnim elektroenergetskim sistemima.

5.1. ANALIZA PRIMJERA IZ SVIJETA

- **Hornsedale Power Reserve (HPR)** u Južnoj Australiji je jedan od najpoznatijih primjera baterijskih skladišnih sistema velikog kapaciteta. Ovaj sistem koristi litij – jonske baterije i ima kapacitet od 150 MW/193.5 MW.
- **Tesla Megapack** je implementiran u Moss Landing Power Plant u Kaliforniji kao dio rješenja za povećanje kapaciteta skladištenja energije. Kapacitet mu iznosi 182.5 MW/730 MW, a koristi se za balansiranje mreže i skladištenje energije iz obnovljivih izvora.
- **Reverzibilna hidroelektrana Nant de Drance** u Švajcarskoj predstavlja sofisticiran primjer skladištenja energije s kapacitetom od 900 MW.
- **Sistem kinetičkog skladištenja energije (flywheel)** implementiran je u Ontariju u Kanadi za stabilizaciju mreže sa ciljem brzog reagovanja na fluktuacije frekvencije i napona.

5.2. PRIMJENJIVOST U LOKALNOM KONTEKSTU

1. **Energetski potencijal u lokalnim mrežama:** lokalni elektroenergetski sistemi, posebno u zemljama sa slabom mrežnom infrastrukturom, mogu značajno profitirati od integracije skladišnih sistema. Ključni faktori uključuju: veliki potencijal za iskorištavanje solarne energije, potrebu za stabilizacijom mreže zbog fluktuacija u potrošnji, nedovoljnu razvijenost infrastrukture za obnovljive izvore energije.
2. **Troškovna analiza i ekonomska održivost:** prednosti uključuju: smanjenje troškova uvoza energije, povećanje energetske nezavisnosti i stvaranje novih radnih mjesta u sektoru obnovljivih izvora energije. Izazovi uključuju: visoki početni troškovi instalacije skladišnih sistema, nedostatak regulatornog okvira koji podržava skladištenje energije.
3. **Regulatorni i politički okvir:** lokalne vlade i regulatori igraju ključnu ulogu u implementaciji skladišnih sistema kroz: subvencije za instalaciju skladišnih sistema, razvoj tržišta za energiju iz skladišta, edukaciju i podizanje svijesti o prednostima skladištenja energije.
4. **Geografski potencijal:** pumpno skladištenje je pogodno za područja sa prirodnim visinskim razlikama. Solarna energija i baterijski sistemi posebno relevantni za regije sa visokim brojem sunčanih dana godišnje.

ZAKLJUČAK I PREPORUKE

Integracija skladištenja energije u distributivne mreže postaje ključni element modernizacije elektroenergetskih sistema. Kroz tehničke i ekonomske analize, kao i studije slučaja iz različitih regija, jasno je da skladišni sistemi imaju potencijal da značajno unaprijede stabilnost, fleksibilnost i efikasnost mreže, dok istovremeno omogućavaju veću integraciju obnovljivih izvora energije. Međutim, kako bi se iskoristile sve prednosti ovih tehnologija, neophodno je prevazići brojne tehničke, ekonomske i regulatorne izazove.

Zaključak

Skladištenje energije pruža višestruke benefite za distributivne mreže, uključujući:

- Tehničku stabilnost: skladišni sistemi omogućavaju balansiranje opterećenja, regulaciju frekvencije i napona te podršku integraciji obnovljivih izvora energije.
- Ekonomske koristi: smanjenje troškova energije tokom vršnih opterećenja, povećava efikasnost mreže i smanjenje ulaganja u infrastrukturu.
- Podršku energetske tranziciji: omogućavaju širu primjenu obnovljivih izvora energije, čime doprinose dekarbonizaciji energetskog sektora.

Međutim, izazovi kao što su prilagođavanje postojeće infrastrukture, visoki početni troškovi, nedostatak regulatornog okvira i tehnička kompleksnost implementacije i dalje predstavljaju prepreke. Da bi se ove prepreke savladale, potrebno je strateško planiranje, tehnološki razvoj i podrška politike.

Preporuke

Na osnovu analize iznesene u ovom radu, izdvajaju se sljedeće preporuke (tabla 2.) za uspješnu implementaciju skladišnih sistema u distributivne mreže.

Tabela 2. Ključne preporuke za integraciju skladišnih sistema

Kategorija	Preporuka
Tehnička unapređenja	Modernizacija mreže, pametne mreže, tehnološke inovacije.
Ekonomske strategije	Subvencije, analiza ROI, razvoj tržišta.
Regulatorne reforme	Jasna pravila, promocija OIE, lokalni kontekst.
Obrazovanje i svijest	Edukacija stručnjaka, informisanje javnosti.
Pilot - projekti	Testiranje u specifičnim regijama, međunarodna saradnja.

LITERATURA

- [1] - <https://toplakuca.me/product/bluesun-litijum-jonska-baterija-visokog-kapaciteta-lifepo4-serije-bsl-bsm12104lpabs-12-8v-104ah/>
- [2] - <https://energijabalkana.net/natrijum-jonske-baterije-su-jeftinije-dostupnije-i-manje-unistavaju-zivotnu-sredinu-od-litijumskih/>
- [3] - <https://ba.chilweebattery.com/motive-power-battery/electric-vehicle-lead-acid-battery/universal-type-lead-acid-battery-series-12v-.html>
- [4] - <https://www.ecoport.al.me/reverzibilne-hidroelektrane/>
- [5] - <https://www.poslovni.hr/sci-tech/skladistenje-toplinske-i-toplinsko-mehanicke-energije-sastavnio-nase-energetske-buducnosti-4360762>
- [6] - <https://olx.ba/artikal/46896842/hyundai-santa-fe-2-0-crdi-plivajuci-zamajac/>
- [7] - International Renewable Energy Agency (IRENA). (2020). Electricity Storage and Renewables: Costs and Markets to 2030.
- [8] - Chen, H., Cong, T. N., Yang, W., Tan, C., Li, Y., & Ding, Y. (2009). Progress in electrical energy storage system: A critical review. Progress in Natural Science.
- [9] - Dunn, B., Kamath, H., & Tarascon, J. M. (2011). Electrical energy storage for the grid: A battery of choices. Science.
- [10] - Lazard. (2021). Levelized Cost of Storage Analysis.
- [11] - Aneke, M., & Wang, M. (2016). Energy storage technologies and real life applications – A state of the art review. Applied Energy.
- [12] - <https://www.energetika-net.com/energetsko-gospodarstvo/prijenosne-i-distribucijske-mreze-u-eu-ne-razvijaju-se-tempom-koji-namece-repower-eu>
- [13] - https://hrcak.srce.hr/file/462434?utm_source=chatgpt.com
- [14] - https://mingo.gov.hr/UserDocsImages/UPRAVA%20ZA%20ENERGETIKU/Strategije%2C%20planovi%20i%20programi/Strategija%20energetskog%20razvoja%20RH%202030%20s%20pogledom%20na%202050.pdf?utm_source=chatgpt.com
- [15] - https://www.eesc.europa.eu/sites/default/files/resources/docs/snnc-wpc-see-energy-perspectiveptx_hr_v1.pdf?utm_source=chatgpt.com
- [16] - https://deye.com/hr/future-of-energy-storage-innovations-shaping-tomorrows-power-solutions/?utm_source=chatgpt.com
- [17] - https://www.nin.rs/zelena-tranzicija/vesti/64295/skladistenje-energije-podrzava-dekarbonizaciju-evrope?utm_source=chatgpt.com
- [18] - https://www.academia.edu/86132814/Novi_izazovi_u_energetici_ekonomska_perspektiva?ucsb-sw=55872188&utm_source=chatgpt.com