

# Sustavi pohrane energije u naprednim mrežama

---

Čalić, Ivan

Undergraduate thesis / Završni rad

2020

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **Josip Juraj Strossmayer University of Osijek, Faculty of Electrical Engineering, Computer Science and Information Technology Osijek / Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Fakultet elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija Osijek**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:200:760357>

*Rights / Prava:* [In copyright](#) / [Zaštićeno autorskim pravom.](#)

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-01-30**

*Repository / Repozitorij:*

[Faculty of Electrical Engineering, Computer Science and Information Technology Osijek](#)



**SVEUČILIŠTE JOSIPA JURJA STROSSMAYERA U OSIJEKU**  
**FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA I**  
**INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA**

**Sveučilišni studij**

**SUSTAVI POHRANE ENERGIJE U NAPREDNIM**  
**MREŽAMA**

**Završni rad**

**Ivan Čalić**

**Osijek, 2020.**

**FERIT**FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA  
I INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA OSIJEK

Obrazac Z1P - Obrazac za ocjenu završnog rada na preddiplomskom sveučilišnom studiju

Osijek, 27.09.2020.

Odboru za završne i diplomske ispite

**Prijedlog ocjene završnog rada na  
preddiplomskom sveučilišnom studiju**

<b>Ime i prezime studenta:</b>	Ivan Čalić
<b>Studij, smjer:</b>	Preddiplomski sveučilišni studij Elektrotehnika i informacijska tehnologija
<b>Mat. br. studenta, godina upisa:</b>	4193, 24.09.2019.
<b>OIB studenta:</b>	80949645565
<b>Mentor:</b>	Izv. prof. dr. sc. Predrag Marić
<b>Sumentor:</b>	
<b>Sumentor iz tvrtke:</b>	
<b>Naslov završnog rada:</b>	Sustavi pohrane energije u naprednim mrežama
<b>Znanstvena grana rada:</b>	<b>Elektroenergetika (zn. polje elektrotehnika)</b>
<b>Predložena ocjena završnog rada:</b>	Vrlo dobar (4)
<b>Kratko obrazloženje ocjene prema Kriterijima za ocjenjivanje završnih i diplomskih radova:</b>	Primjena znanja stečenih na fakultetu: 2 bod/boda Postignuti rezultati u odnosu na složenost zadatka: 3 bod/boda Jasnoća pismenog izražavanja: 2 bod/boda Razina samostalnosti: 2 razina
<b>Datum prijedloga ocjene mentora:</b>	27.09.2020.
<b>Datum potvrde ocjene Odbora:</b>	30.09.2020.
Potpis mentora za predaju konačne verzije rada u Studentsku službu pri završetku studija:	Potpis:
	Datum:

**FERIT**FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA  
I INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA OSIJEK**IZJAVA O ORIGINALNOSTI RADA**

Osijek, 30.09.2020.

**Ime i prezime studenta:**

Ivan Čalić

**Studij:**

Preddiplomski sveučilišni studij Elektrotehnika i informacijska tehnologija

**Mat. br. studenta, godina upisa:**

4193, 24.09.2019.

**Turnitin podudaranje [%]:**

8%

Ovom izjavom izjavljujem da je rad pod nazivom: **Sustavi pohrane energije u naprednim mrežama**

izrađen pod vodstvom mentora Izv. prof. dr. sc. Predrag Marić

i sumentora

moj vlastiti rad i prema mom najboljem znanju ne sadrži prethodno objavljene ili neobjavljene pisane materijale drugih osoba, osim onih koji su izričito priznati navođenjem literature i drugih izvora informacija. Izjavljujem da je intelektualni sadržaj navedenog rada proizvod mog vlastitog rada, osim u onom dijelu za koji mi je bila potrebna pomoć mentora, sumentora i drugih osoba, a što je izričito navedeno u radu.

Potpis studenta:

## SADRŽAJ

1. UVOD.....	2
1.1 Opis zadatka.....	2
2. SUSTAVI POHRANE ELEKTRIČNE ENERGIJE.....	3
2.1 Mehanički sustavi za pohranu električne energije .....	3
2.1.1 Pohrana energije pomoću komprimiranog zraka.....	4
2.1.2 Crpno-akumulacijske hidroelektrane .....	5
2.1.3 Pohrana energije uz pomoć zamašnjaka.....	6
2.2 Elektrokemijski sustavi za pohranu električne energije .....	7
2.2.1 Olovno kiselinska baterija .....	7
2.2.2 Litij-ionske baterije .....	7
2.2.3 Redoks protočne baterije.....	8
2.3 Kemijski sustavi za pohranu električne energije.....	10
2.3.1 Vodik.....	10
2.3.2 Sintetički prirodni plin .....	10
2.4 Električni sustavi za pohranu električne energije .....	10
2.4.1 Supravodljivi magnetski svitak .....	10
2.4.2 Ultra kondenzator .....	11
2.5 Termički sustavi za pohranu električne energije .....	12
2.5.1 Pohrana topline .....	12
3. NAPREDNE MREŽE .....	13
3.1 Značajke naprednih mreža .....	14
3.2 Implementacija naprednih mreža.....	15
3.3 Prednosti naprednih mreža.....	16
4. ANALIZA I SIMULACIJA U DIgSILENT PowerFactory SOFTVERU .....	17
4.1 Prvi slučaj.....	20
4.2 Drugi slučaj .....	26
4.3 Treći slučaj .....	31
4.4 Četvrti slučaj .....	35
5. ZAKLJUČAK .....	39
SAŽETAK.....	40
LITERATURA .....	41

---

## 1. UVOD

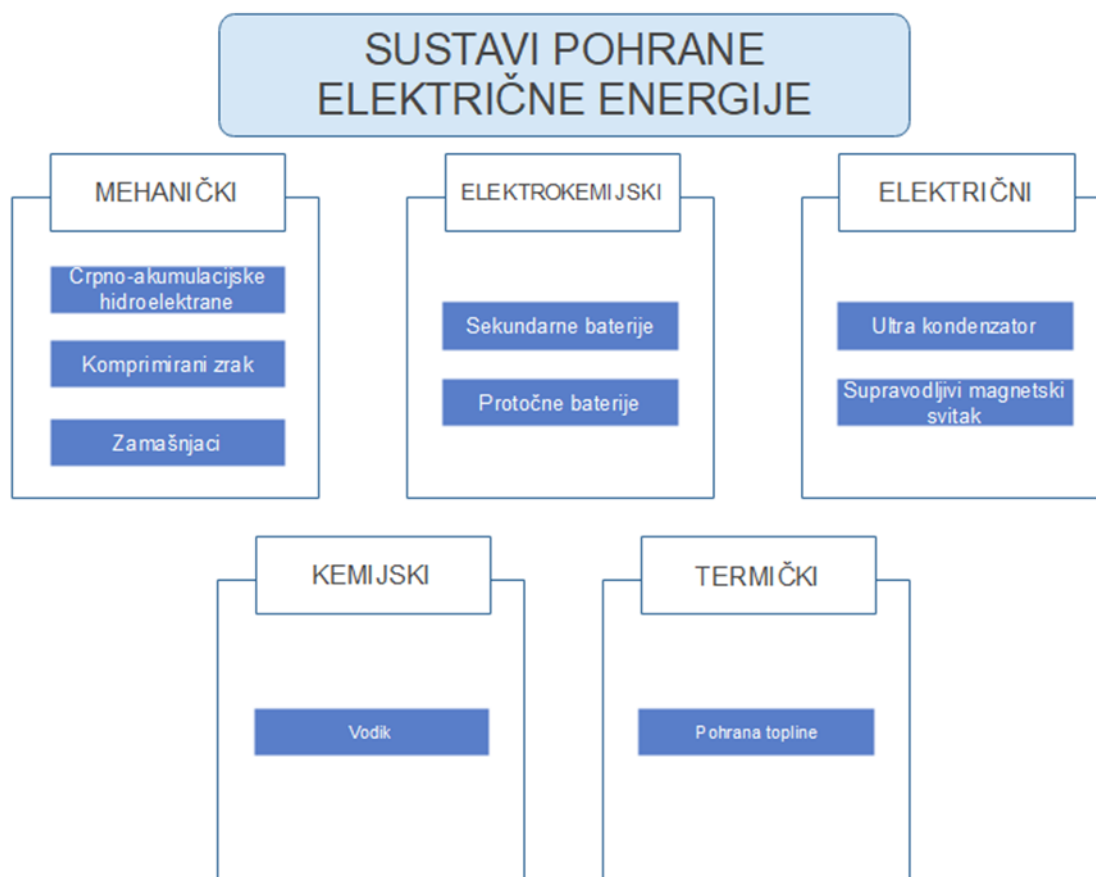
U ovom radu se predstavlja i opisuje tema „Sustavi pohrane energije u naprednim mrežama“. Pošto sve više raste važnost obnovljivih izvora energije, poboljšana učinkovitost i manji troškovi modernih tehnologija glavni su cilj. Drugo poglavlje opisuje raznolike načine pohrane električne energije te njihov princip rada. Također su navedene njihove prednosti i nedostaci te su opisane glavne karakteristike svih sustava pohrane električne energije. Treće poglavlje obuhvaća potrebu za naprednim mrežama te sam pojam naprednih mreža. Opisuje se gdje se napredne mreže primjenjuju, koje su njihove značajke te uspoređivanje svojstava trenutne mreže i napredne mreže, kao i prednosti naprednih mreža. U četvrtom poglavlju prikazuju se izvršena mjerenja sustava za pohranu energije na modelu distribucijske mreže u programu DIgSILENT PowerFactory. Zaključak završnog rada prikazan je u petom poglavlju.

### 1.1 Opis zadatka

Cilj provedbe simulacije je bio utvrditi utjecaj spremnika energije, koji su spojeni na različite udaljenosti od izvora, u mreži. Uspoređivali su se odnosi gubitaka djelatne i jalove snage mreže kada su spremnici energije bili spojeni na različitim mjestima mreže. Također se ispitivao utjecaj više baterijskih spremnika. Za uspješnu provedbu zadatka se koristio program DIgSILENT PowerFactory, te na osnovu nacrtane sheme provela simulacija.

## 2. SUSTAVI POHRANE ELEKTRIČNE ENERGIJE

Najčešći pristup podjele sustava pohrane električne energije je podjela prema obliku korištene energije. Sustavi pohrane električne energije se mogu podijeliti na mehaničke sustave, električne sustave, kemijske sustave, elektrokemijske sustave i termalne sustave, kao što je i prikazano na Slici 2.1.



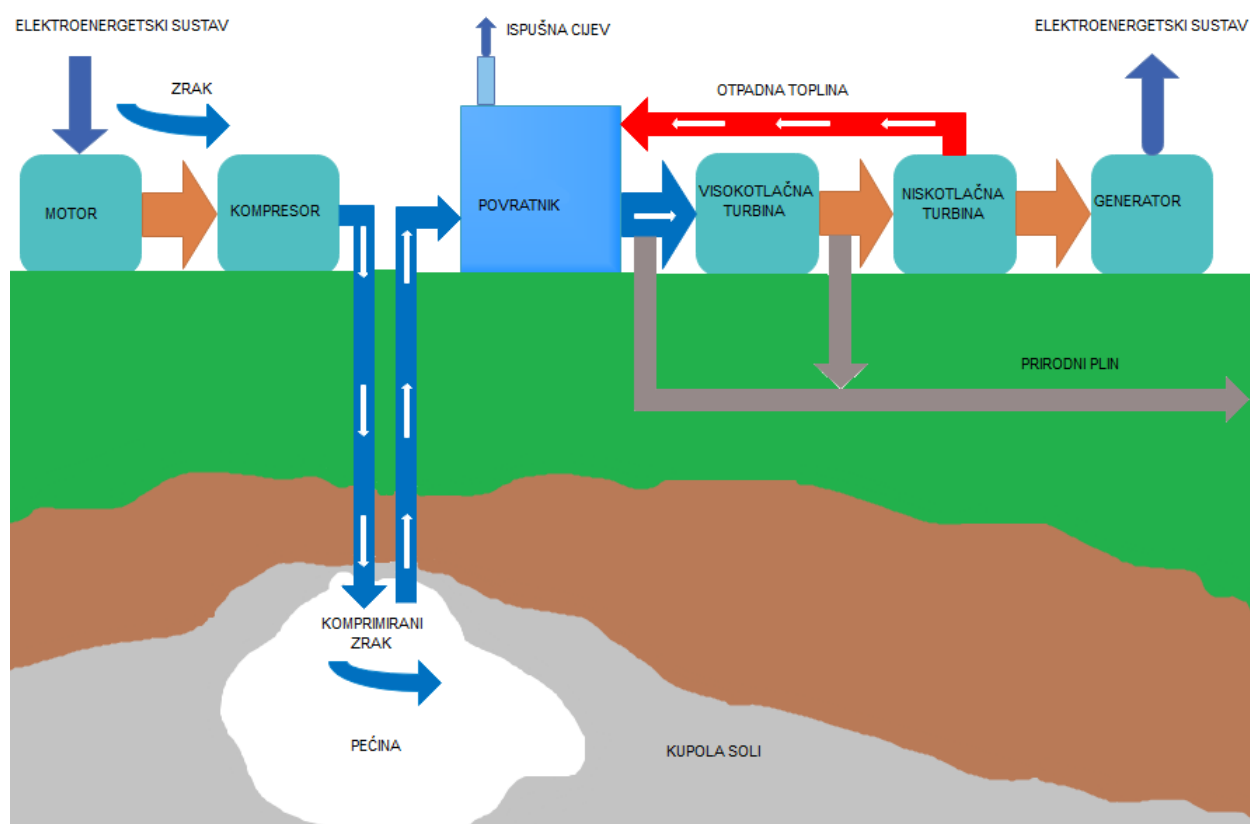
**Slika 2.1** Raspodjela sustava pohrane električne energije prema obliku korištenja energije [1]

### 2.1 Mehanički sustavi za pohranu električne energije

Najčešći mehanički sustavi pohrane električne energije su komprimirani zrak, crpno-akumulacijske hidroelektrane i zamašnjaci.

### 2.1.1 Pohrana energije pomoću komprimiranog zraka

Tehnologija pohrane energije pomoću komprimiranog zraka (slika 2.3) koristi se još od 19. stoljeća u različitim industrijskim primjenama. Zrak se, zbog raspoloživosti, koristi kao medij za pohranu. Prema literaturi [1] „električna energija se koristi za kompresiju zraka te se taj zrak pohranjuje bilo u podzemnoj strukturi ili nadzemnom spremniku ili cijevi“.



**Slika 2.2** „Sustav pohrane energije komprimiranim zrakom“ [1]

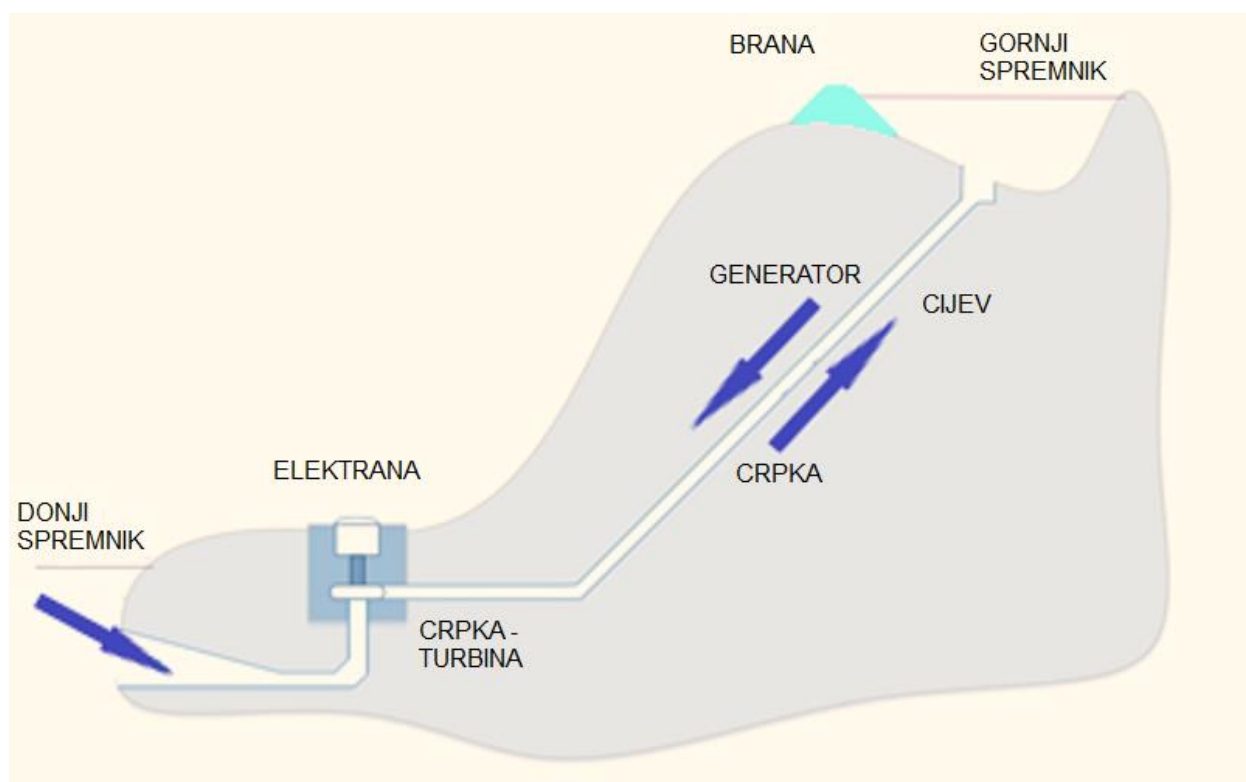
Ista ta literatura [1] navodi da je „prednost pohrane energije komprimiranim zrakom je velik kapacitet, a nedostaci su niska učinkovitost i geografska ograničenja lokacije“.



### 2.1.2 Crpno-akumulacijske hidroelektrane

Crpno-akumulacijske hidroelektrane kao sustav pohrane energije predstavljaju oko 99% svih instaliranih sustava pohrane električne energije u svijetu[1].

Konvencionalna vrsta već gore navedene hidroelektrane ima dva spremnika namjenjena za vodu koji nisu na istim visinama. Pri malim opterećenjima crpno-akumulacijska hidroelektrana uzima vodu iz donjeg spremnika u gornji te je to, zapravo, proces punjenja koji je prikazan na slici 2.3. Nakon toga, ako je potrebno, teći će voda iz gornjeg spremnika u donji i pomoću toga se pokreće turbina s generatorom što proizvodi električnu energiju i to je, zapravo, proces pražnjenja[1].

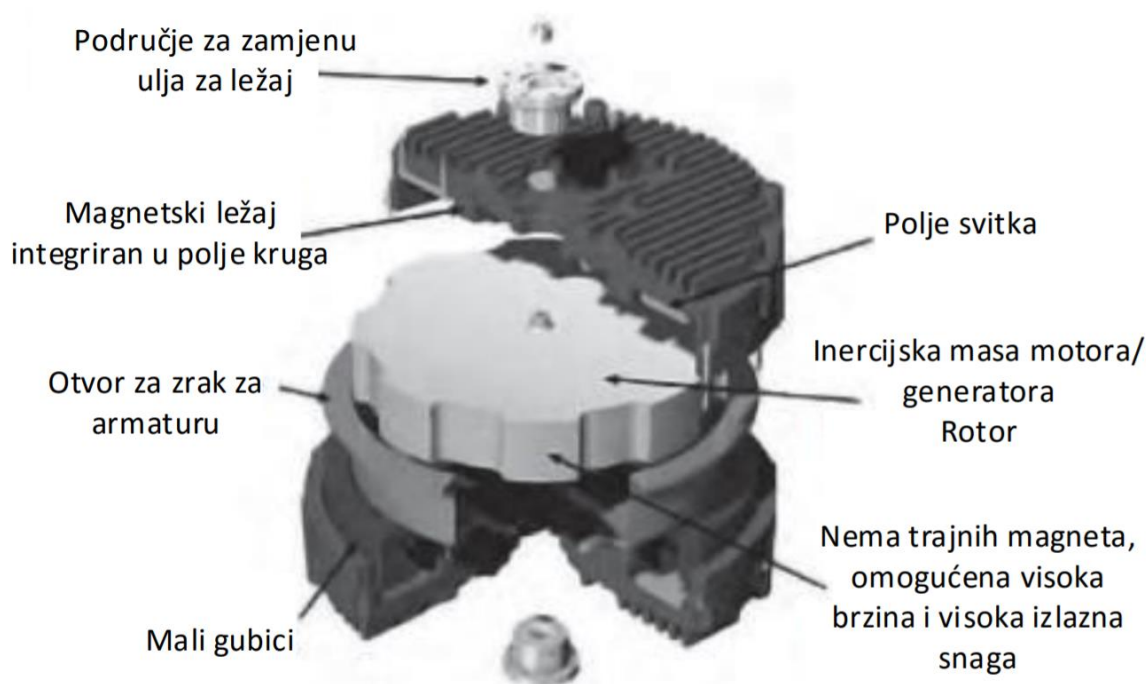


**Slika 2.3** „Princip rada akumulacijske hidroelektrane“ [1]

Njihovo vrijeme pražnjenja može trajati par sati pa sve do par dana. Što se tiče učinkovitosti, ona iznosi između 70-80%[1]. Duži vijek trajanja im je prednost ali nedostatak im je što ovise o topografskim uvjetima i što koriste veliki dio zemljišta[1].

### 2.1.3 Pohrana energije uz pomoć zamašnjaka

Autor literature [1] objašnjava kako „kod pohrane energije uz pomoć zamašnjaka rotacijska energija je pohranjena u ubrzanom rotoru masivnog rotirajućeg cilindra“. Glavni dijelovi zamašnjaka su ležajevi, rotirajuće tijelo (cilindar) i uređaj za prijenos kao što se može vidjeti na slici 2.4. U zamašnjaku se energija održava tako što drži rotirajući cilindar pri stalnoj brzini. Što je veća brzina veća je i pohrana energije. Uređaj za prijenos služi sa ubrzavanje zamašnjaka dovođenjem električne energije te za usporavanje zamašnjaka prilikom odvođenja električne energije[1].



Slika 2.4 Zamašnjak i njegovi dijelovi [1]

Prednosti zamašnjaka su dug životni vijek, odlična stabilnost ciklusa, velika gustoća energije, malo održavanja. Nedostatci zamašnjaka su gubici u ležajevima, a zbog otpora zraka imaju veliku razinu samopražnjenja te malu učinkovitost[1].

## 2.2 Elektrokemijski sustavi za pohranu električne energije

Ovo poglavlje opisuje različite vrste baterija. Postoji šest vrsta sekundarnih baterija: olovno kiselinske, natrij nikal-klorid, nikal kadmij te novije nikal metal hibrid, metal zrak, litij-ion, natrij-sumpor baterije od kojih su posebno objašnjene olovno kiselinske te litij-ionske zbog njihove učestale primjene te važnosti. Uz njih su postoje dvije vrste protočnih baterija: hibrid protočna te redoks protočna baterija od kojih je posebno objašnjena redoks protočna baterija. U literaturi [1] objašnjeno je kako se „u konvencionalnim sekundarnim baterijama energija puni i prazni u aktivnim masama elektroda“. Također je objašnjeno kako su „protočne baterije isto baterije za ponovno punjenje, ali je kod njih energija pohranjena u jednoj ili više elektro-aktivnoj vrsti otopljenom u tekućem elektrolitu“. „Elektroliti su pohranjeni izvana u spremnicima te se pumpaju kroz elektrokemijsku ćeliju koja pretvara kemijsku energiju izravno u električnu energiju i obratno“[1].

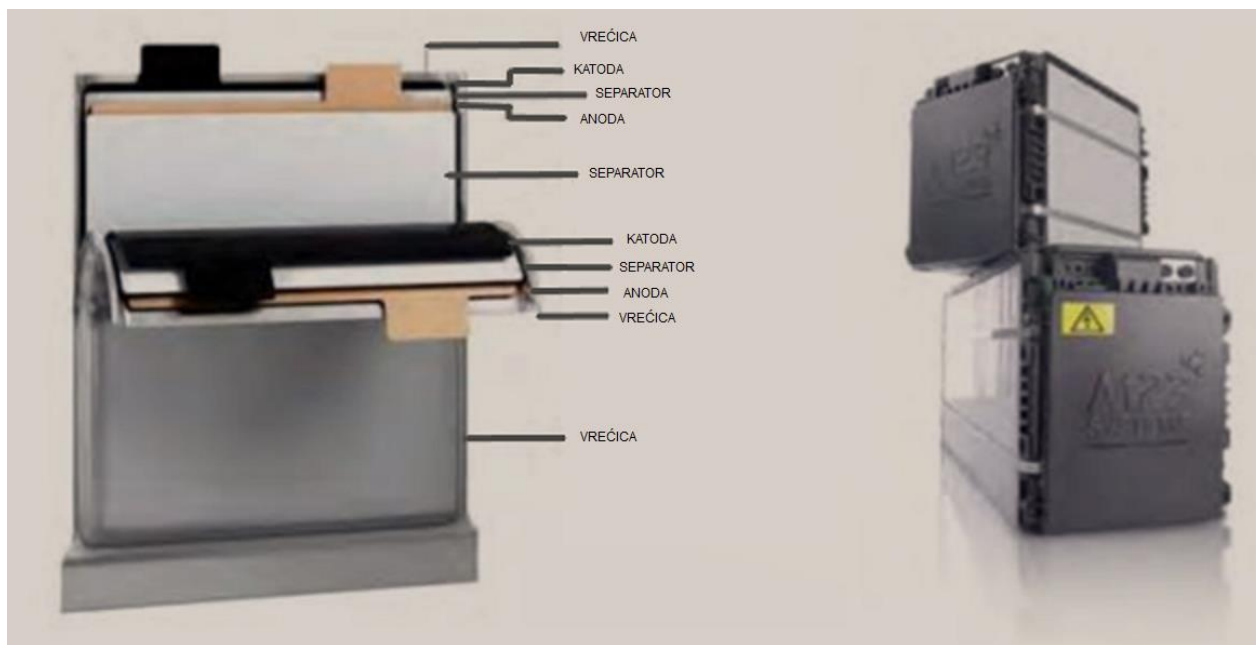
### 2.2.1 Olovno kiselinska baterija

Najkorištenije baterije na svijetu su upravo olovno-kiselinske baterije. Od 1890. godine su u komercijalnoj upotrebi. Koriste se kao stacionarne i kao mobilne. Tipična uporaba im je kao samostalni sustavi s fotonaponom, sustavi za napajanje u nuždi, sustav baterija ublažavanja izlazne fluktuacije iz energije vjetra i također akumulatori u vozilima. Ove baterije nude istraženiju tehnologiju i nižu cijenu. Prednosti olovno-kiselinskih baterija su lako recikliranje, jednostavna tehnologija te dobar omjer cijena/performansi. Nedostaci su im upotreba olova, niža gustoća energije te smanjenje korisnog kapaciteta uoči ispražnjenja velike količine energije[1].

### 2.2.2 Litij-ionske baterije

Litij-ionske baterije prikazane na slici 2.5, su trenutno jedna od najvažnijih tehnologija pohrane u području mobilnih i prijenosnih uređaja[1]. Učinkovitost litij-ionskih baterija je velika te iznosi od 95-98% [1]. Smatraju se fleksibilnom i univerzalnom tehnologijom za pohranu jer

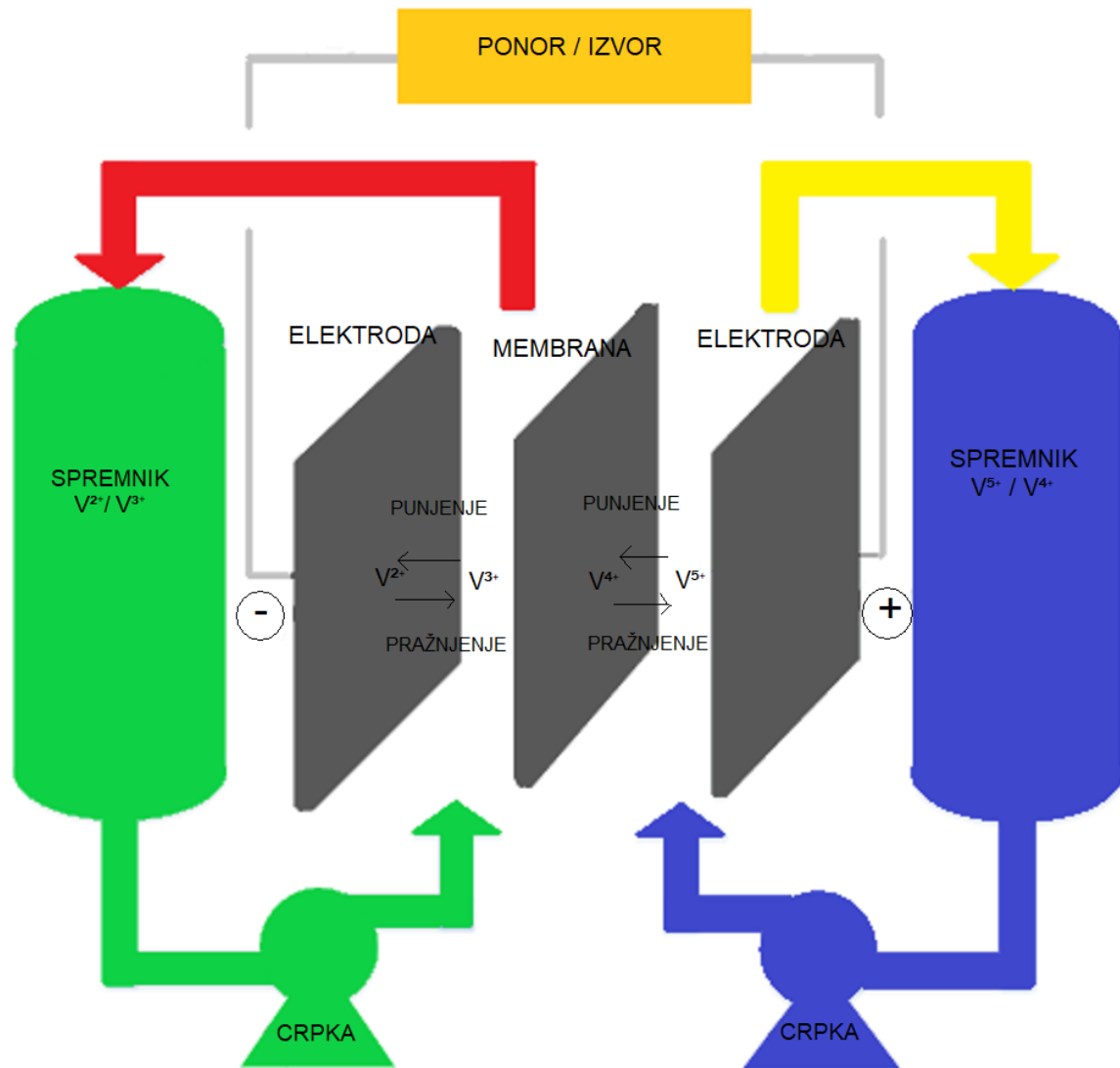
im je vrijeme pražnjenja ostvareno od sekunde pa sve do tjedna. Moguće su i veće stope ciklusa, međutim standardna ćelija ima 5000 punih ciklusa što uglavnom ovisi o materijalu za elektrode [1]. Ozbiljan problem u tehnologiji litij-ionskih baterija je sigurnost[1].



**Slika 2.5** Baterijski moduli te prizmatični dizajn litij-ionske baterije [1]

### 2.2.3 Redoks protočne baterije

Redoks protočne baterije sadrže otopljene ione metala dva tekuća elektrolita. Literatura [1] objašnjava kako se „elektroliti na negativnoj i pozitivnoj elektrodi nazivaju anolit i katolit. Za vrijeme punjenja i pražnjenja ioni metala ostaju otopljeni u tekućem elektrolitu kao tekućina te na odvijanje tih aktivnih masa promjena faze nema utjecaja“. Isti taj izvor[1] navodi kako „anodni i katodni elektroliti protiču kroz porozne elektrode koje su odvojene membranom koja protonima omogućuje da prođu“ prikazano na slici 2.6[1].



Slika 2.6 Shematski prikaz vanadiumredoks protočne baterije [1]

## 2.3 Kemijski sustavi za pohranu električne energije

### 2.3.1 Vodik

Vodik, prema literaturi [1], „kao sekundarni nosač energije može imati važan utjecaj na skladištenje električne energije u velikim količinama. Glavna svrha tog kemijskog sustava za pohranu energije je ta što koristi „višak“ struje za proizvodnju vodika preko vode elektrolizom“. Prednost vodika također prema literaturi [1] je to što: „njega kao univerzalnog energenta je moguće koristiti u različitim sektorima kao što su transport, mobilnost, grijanje i kemijska industrija“.

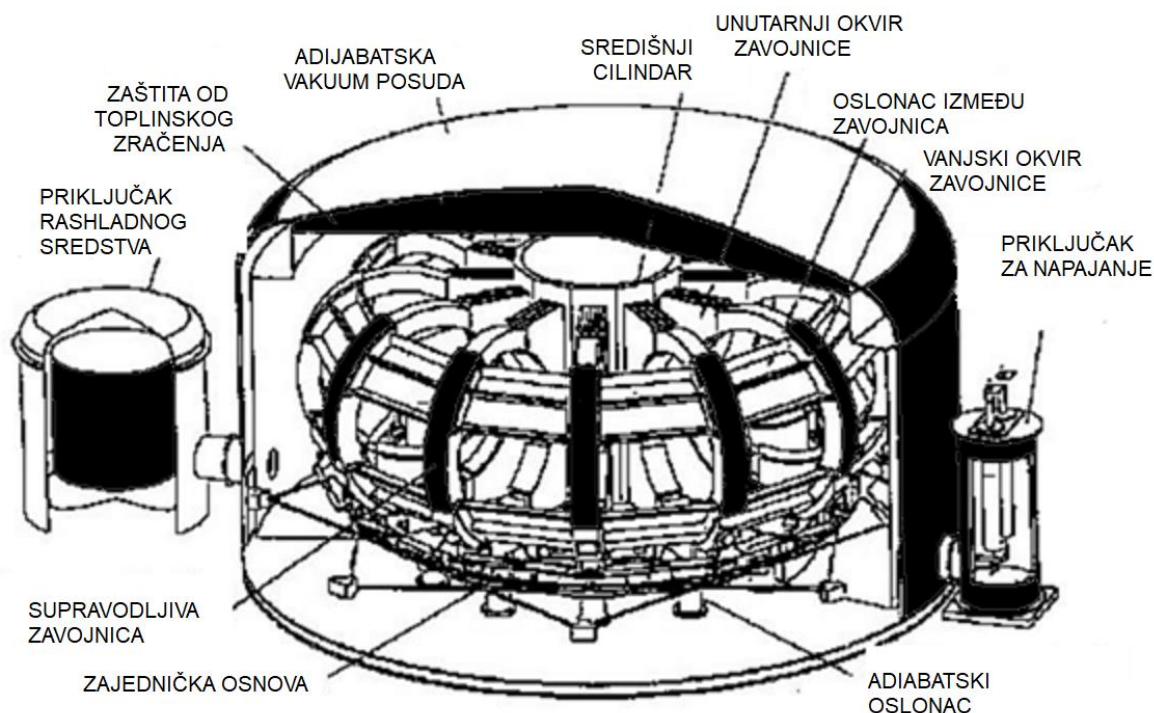
### 2.3.2 Sintetički prirodni plin

Sinteza metana (sintetički plin) je druga opcija pohrane električne kao kemijske energije. Nakon cijepanja vode potreban je još korak u kojem dolazi do reakcije vodika i ugljičnog dioksida u metan. Kao i kod vodika, može doći do pohrane sintetičkog prirodnog plina u spremnicima pod zemljom, tlakom ili direktnim uvođenjem u plinsku mrežu. Literatura [1] navodi kako je „nekoliko izvora  $CO_2$  moguće koristiti za dobivanje metana, poput elektrana na fosilna goriva, industrijskih postrojenja ili bioplinskih postrojenja“. Zbog gubitaka pri elektrolizi, transportu, skladištenju te procesu dobivanja metana učinkovitost je relativno niska, a ona predstavlja glavni nedostatak sintetičkog prirodnog plina [1].

## 2.4 Električni sustavi za pohranu električne energije

### 2.4.1 Supravodljivi magnetski svitak

Supravodljivi magnetski svitak je svitak koji je vođen radom elektrodinamičkog principa. Autor literature [1] navodi kako je „u magnetskom polju pohranjena energija koje stvara istosmjerna struja u supravodljivom svitku te se čuva na temperaturi nižoj od njegove supravodljive kritične temperature“. Zavojnica napravljena od supravodljivih materijala je glavna komponenta ovog sustava za pohranu. Dijelovi supravodljivog magnetskog svitka prikazani su slikom 2.7.



Slika 2.7 Dijelovi supravodljivog magnetskog svitka [2]

Glavna prednost ove tehnologije pohrane je vrlo brz odziv, što znači da je tražena snaga dostupna u istom trenu [1]. Prema literaturi [1] „energija može biti pohranjena na neodređeno vrijeme dok radi sustav hlađenja, ali duže vrijeme skladištenja je ograničeno energetskim potrebama rashladnog sustava“.

#### 2.4.2 Ultra kondenzator

Elektrokemijski kondenzatori sa dvostrukim slojem, poznatiji kao već spomenut podnaslov, ultra kondenzatori poznati su već 60 godina [1]. Prema literaturi [1] „popunjavaju prazninu između klasičnih kondenzatora; koji se koriste u elektronici i standardne baterije, zbog svoje izuzetno visoke snage i gotovo neograničene stabilnosti ciklusa, kao i njihove veće sposobnosti za pohranu energije u usporedbi s tradicionalnim kondenzatorima“. U istoj toj literaturi [1] mogu se naći prednosti kao što su: „pouzdanost, održavanje, dugi životni vijek te rad u širokom temperaturnom području i u različitim okruženjima (toplo, hladno, vlažno) te mogućnost lakog recikliranja te neutraliziranja“. Imaju visoku učinkovitost koja iznosi oko 90%, a samo vrijeme pražnjenja može trajati u periodu od nekoliko sekundi pa sve do nekoliko sati [1].

## 2.5 Termički sustavi za pohranu električne energije

### 2.5.1 Pohrana topline

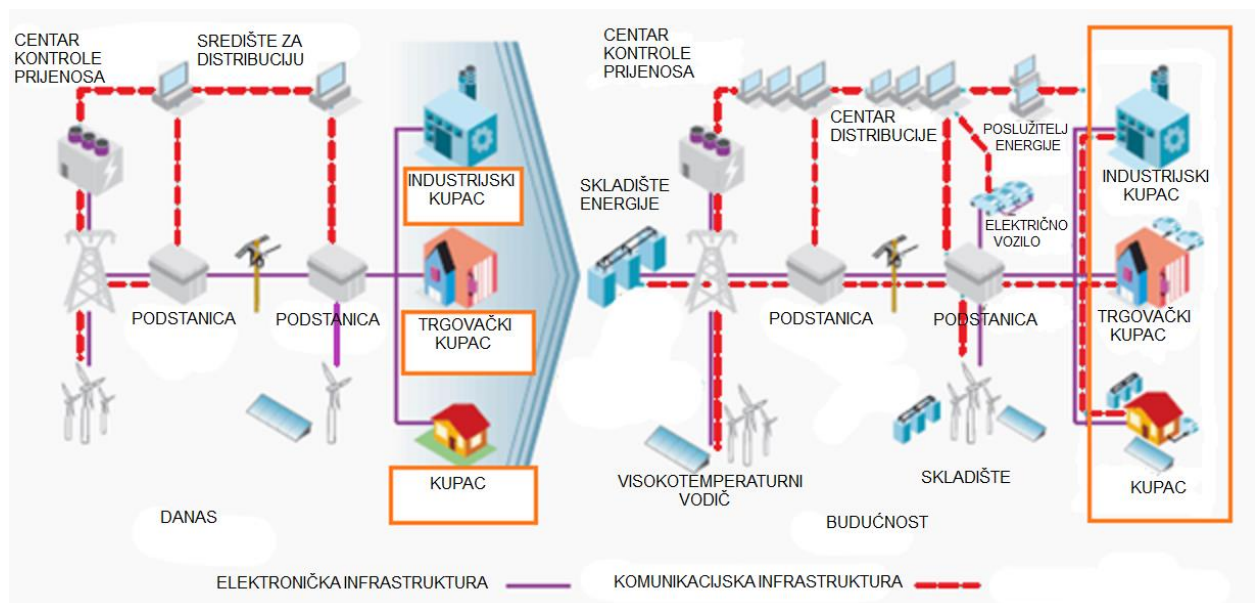
Termički sustavi pohrane temelje se načelom skladištenja energije u obliku toplinske energije. Ponajbolji način pohrane velikih količina topline je promjena stanja materijala. Poznato je kako neki pojedini materijali imaju sposobnost zadržavanja velike količine energije prilikom prelaska iz prvog u drugo stanje. Taj efekt je poznat kod kocke leda, a najbolje je opisan u literaturi [1] koja objašnjava da „kada se kocka zagrijava ona ostaje na 0°C sve dok se potpuno ne otopi. Količina energije koja je korištena za otapanje kocke leda ekvivalentna je iznosu energije koji je potreban za grijanje vode na 80°C. Uz veću gustoću energije, ali isti učinak sadrže spremnici rastaljene soli“.

Bitan je sustav za ravnotežu solarne termoelektrane, iz razloga što solarna termoelektrana koristi toplinu sunca kako bi istovremeno proizvela električnu energiju te tijekom dana napunila toplinske spremnike, a to bi omogućilo noćno generiranje energije[1].



### 3. NAPREDNE MREŽE

Literatura [3] objašnjava kako je „napredna mreža (eng. smart grid) naziv za elektroenergetsku mrežu koja se koristi digitalnim i drugim naprednim tehnologijama za upravljanje i praćenje transportom električne energije“. Ista ta literatura [3] navodi kako „bez obzira na to što su mnoge regije započele razvijati pametniji elektroenergetski sustav, potrebna su značajna dodatna ulaganja i planiranje za postizanje napredne mreže. Za napredne mreže se smatra da su razvojni skup tehnologija, primjenjuju se u različitim okruženjima širom cijelog svijeta“. Slika 3.1 „pokazuje evolucijski karakter naprednih mreža“ [3].



**Slika 3.1** „Evolucijski karakter naprednih mreža“ [3]

### 3.1 Značajke naprednih mreža

Autori literature [4] predstavili su sedam glavnih značajki naprednih mreža a to su: „1. aktivno sudjelovanje potrošača gdje potrošači imaju veći izbor i veću interakciju s mrežom, 2. prihvaćanje svih mogućnosti generiranja i pohrane električne energije, 3. omogućavanje stvaranja novih proizvoda i usluga te samih tržišta koje daje nove izbore za potrošače“. Također, glavne značajke su i „4. pružanje kvalitetne energije za digitalno gospodarstvo, 5. optimizacija iskoristivosti imovine koja daje želejnu funkcionalnost s minimalnim troškovima, 6. samooporavak sustava odnosno predviđanje i reagiranje na poremećaje te 7. elastičnost protiv prirodnih katastrofa i napada kao što su sprječavanje hakerskih napada i poboljšanje javne sigurnosti“[4].

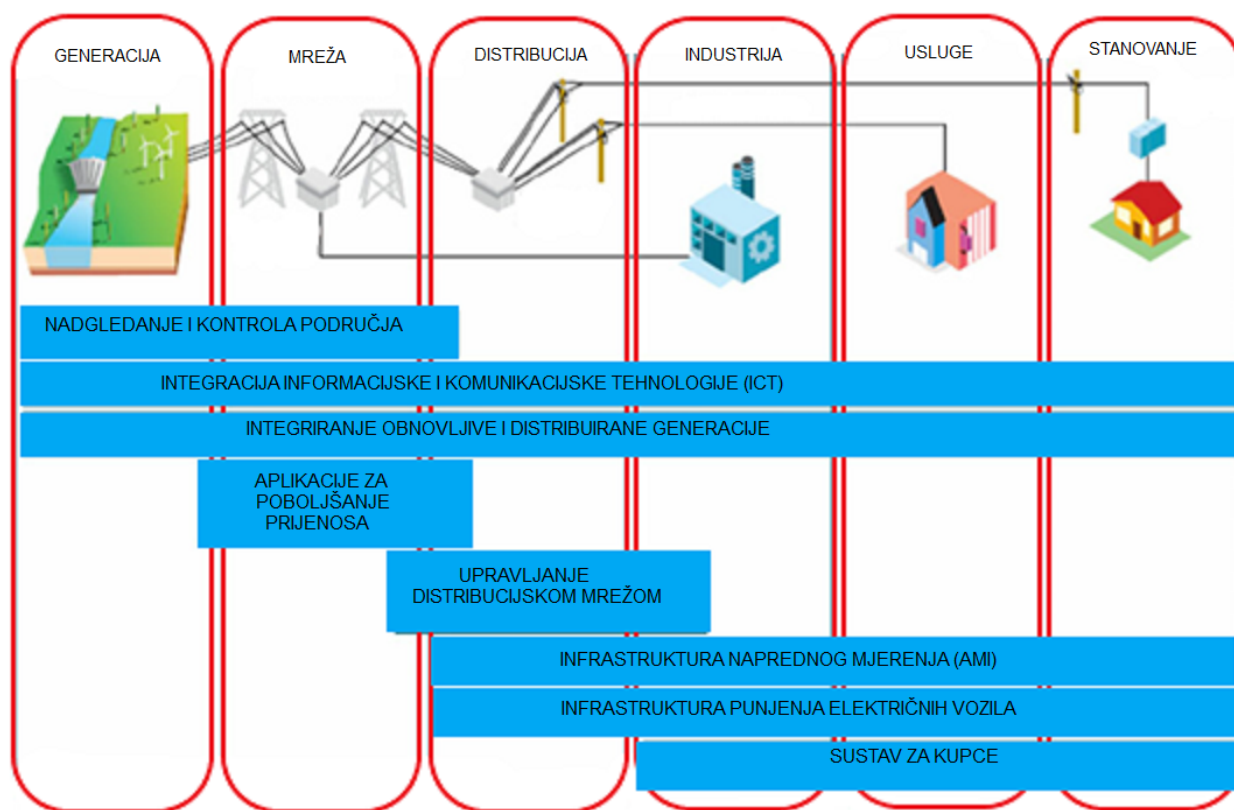
U tablici 3.1 možemo vidjeti kako su uspoređena svojstva trenutne mreže i napredne mreže [5]:

TRENUTNA MREŽA [5]	NAPREDNA MREŽA [5]
„Elektromehanička“	„Digitalna“
„Jednosmjerna komunikacija“	„Dvosmjerna komunikacija“
„Centralizirana proizvodnja“	„Distribuirana proizvodnja“
„Manji broj senzora“	„Sveukupna opremljenost sensorima“
„Ručno nadziranje“	„Automatsko nadziranje“
„Ručno popravlanje mreže“	„Automatsko popravlanje mreže“
„Kvarovi i ispadi mreže“	„Prilagodljiva i otočna“
„Ograničena upravljivost“	„Potpuna upravljivost“
„Mali izbor za potrošače“	„Veliki izbor potrošačima“

**Tablica 3.1** „Svojstva trenutne i napredne mreže“ [5]

### 3.2 Implementacija naprednih mreža

Tehnologija naprednih mreža obuhvaća cijelu elektroenergetsku mrežu. Dakle, kao što autori iz literature [6] navode „od proizvodnje do prijenosa i distribucije do različitih vrsta potrošača električne energije. Potpuno optimizirani elektroenergetski sustav će implementirati sva tehnološka područja“ kao na slici 3.2 „ali se ne moraju instalirati sva tehnološka područja da bi se jačao pametni karakter“ [6].



**Slika 3.2** „Područja tehnologije napredne mreže“ [6]

U nastavku teksta slijedi kratko objašnjenje slike 3.2 – „kojom se opisuju područja tehnologije napredne mreže“ [6]:

1. „Nadzor i kontrola širokog područja - praćenje te prikaz komponenti i performansi sustava preko međusobnog povezivanja i preko velikih zemljopisnih područja u realnom“
2. „Integracija informacijske i komunikacijske tehnologije - temeljna komunikacijska infrastruktura, podržava prijenos podataka za svako vrijeme rada“

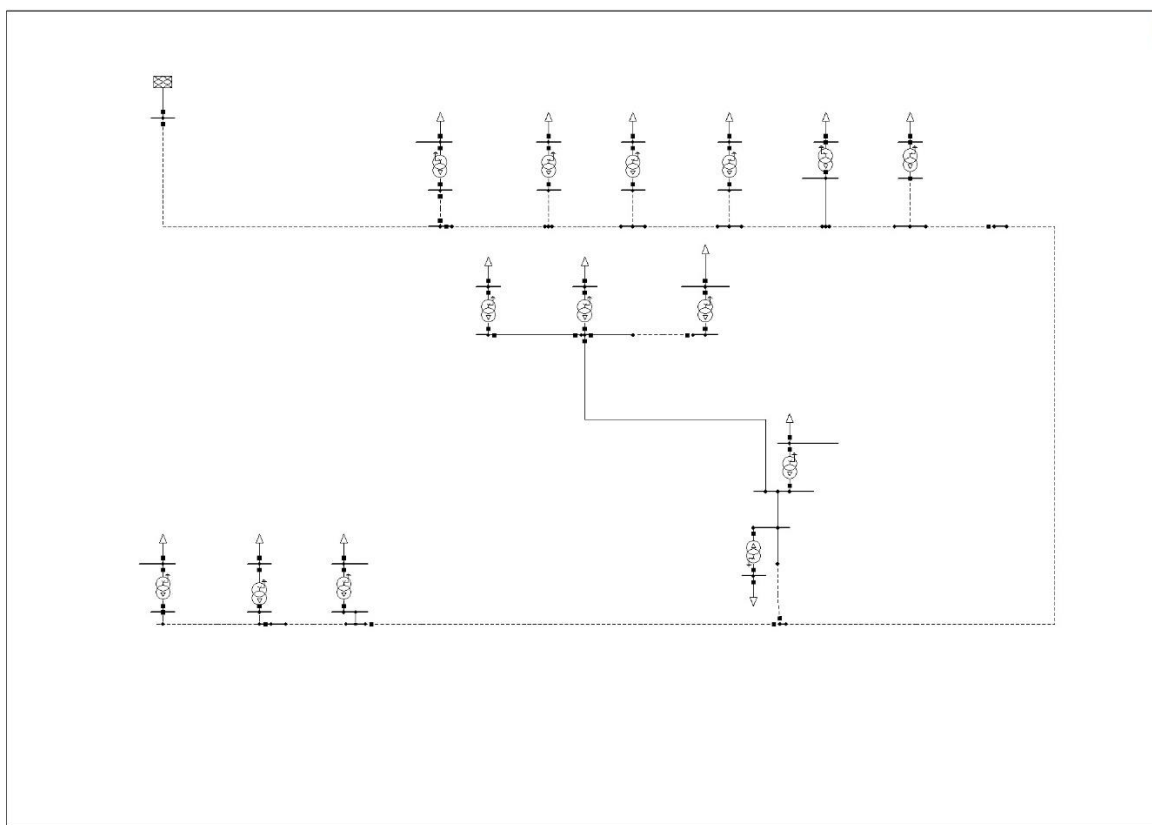
3. „Integriranje obnovljive i distribuirane proizvodnje - obuhvaćaju veliku razmjenu razine prijenosa na razini komercijalne ili stambene zgrade“
4. „Aplikacije za poboljšanje prijenosa - postoji fleksibilni AC prijenosni sustav, visokonaponska DC tehnologija, dinamička ocjena linije i visokotemperaturni punjači“
5. „Upravljanje distribucijskom mrežom - Automatizacija te senzori u podstanici mogu smanjiti pad sustava napajanja i vrijeme popravka, održavanje razine napona i poboljšanje upravljanja imovinom“
6. „Napredna mjerna infrastruktura - uključuje implementaciju brojnih tehnologija“
7. „Infrastruktura za punjenje električnog vozila - obrađuje naplatu, upravljanje te druge inteligentne značajke za pametno punjenje“
8. „Sustavi na strani korisnika - koriste se za upravljanje potrošnjom električne energije na industrijskim, uslužnim te stambenim razinama...“.

### **3.3 Prednosti naprednih mreža**

Autor literature [7] navodi kako „napredne mreže otvaraju priliku za električne sustave koji sadrže puno elektroničkih uređaja koji imaju kontrolu toka električne energije te drugih uređaja“. U literaturi [8] autor navodi da „elektroenergetski sustav koji je utemeljen na naprednim mrežama, ima veliki broj računala za razmjenu informacija te regulaciju. Struja je postala ovisnost današnjeg društva i svakim danom se sve više povećava. Napredne mreže su nametnule struju kao temelj moderne civilizacije“. Autor u literaturi [7], od strane „Odjela za energiju Sjedinjenih Država i Nacionalnog laboratorija za tehnologiju energije“, predstavio je „sedam svojstava kako napredne mreže imaju mogućnost odupiranja napadu, a ta svojstva su: samoobnavljanje, motiviranje i uključivanje potrošača, otpor napadima, pružanje kvalitete električne energije za potrebe 21. stoljeća, brojanje proizvodnje i opcija pohrane, omogućavanje tržišta, optimiziranje imovine te učinkovito djelovanje“.

#### 4. ANALIZA I SIMULACIJA U DIgSILENT PowerFactory SOFTVERU

Analiza pogona sustava za pohranu energije se izvela na modelu distribucijske mreže u DIgSILENT PowerFactory programu. Na primjeru distribucijske mreže su se koristile dvije komponente: baterija i goriva ćelija. Na spomenutim komponentama mijenjali su se parametri djelatne snage svakog slučaja simulacije te su se mijenjala mjesta priključivanja. Simulacija se pokreće pomoću kartica Calculate Load Flow – Output Calculation Analysis te se pomoću toga iscrtaju grafovi svakog pojedinog slučaja simulacije. Simulacijom su dobiveni grafovi naponskog profila izvoda mreže.



**Slika 4.1** Prikaz simulacijskog modela u aplikaciji PowerFactory

U ovom slučaju izvod je radijalan. Izvod se sastoji od 42 sabirnice, 28 vodova te 14 transformatora. U tablicama 4.1, 4.2 i 4.3 prikazane su karakteristike pojedinih dijelova izvoda mreže.

Sabirnica	Nominalni linijski napon[kV]	Sabirnica	Nominalni linijski napon[kV]
0.4 kV F1	0,4	Otcjep 4	10
0.4 kV Farm 4	0,4	Otcjep 6	10
0.4 kV Farm 5	0,4	Otcjep Farma3	10
0.4 kV Farm 6	0,4	S11	10
0.4 kV Farm10	0,4	SA	10
0.4 kV Hidrol	0,4	SA(1)	0,4
0.4 kV Hraš 2	0,4	Sc1	10
0.4 kV Srac 5	0,4	Sc1 04 kV	0,4
0.4 kV TM	0,4	Sracinec 4	10
04 kV T2	0,4	TM	10
04 kV s1	0,4	Terminal(11)	10
Cu-Al prijelaz	10	Terminal(14)	10
Farma10	10	Terminal(2)	10
Farma4	10	Terminal(5)	10
Farma5	10	Terminal(7)	10
Farma6	10	Terminal(8)	10
Hidroling	10	f1	10
Hrašica 2	10	s2	10
Odcjep 5	10	s2(1)	0,4
Otcjep 1	10	s5	10
Otcjep 2	10	Otcjep 4	10

**Tablica 4.1** Popis sabirnica i njihovih nominalnih linijskih napona

Vod	Tip	Duljina[km]	Vod	Tip	Duljina[km]
vod(10)	AL/CE 3x50	0,334	vod(29)	AL/CE 3x95	0,3
vod(11)	Al/Ce 3x25	0,5	vod(31)	AL/CE 3x95	2,1
vod(12)	Al/Ce 3x25	0,615	vod(32)	AL/CE 3x95	1,43

vod(13)	NAKBA 3x150sm 6/10kV	0,416	vod(33)	AL/CE 3x95	0,3
vod(14)	Al/Ce 3x25	0,44	vod(34)	AL/CE 3x95	1,53
vod(15)	Al/Ce 3x25	0,084	vod(35)	AL/CE 3x95	0,15
vod(19)	Al/Ce 3x25	0,97	vod(36)	AL/CE 3x95	0,482
vod(20)	Al/Ce 3x25	0,33	vod(37)	AL/CE 3x95	0,77
vod(21)	NKBA 3x95sm 6/10kV	0,25	vod(38)	AL/CE 3x95	0,37
vod(22)	NA2YSY 1x150rm 6/10kV it	0,7	vod(41)	AL/CE 3x95	0,43
vod(23)	NA2YSY 1x150rm 6/10kV it	0,439	vod(42)	AL/CE 3x95	0,43
vod(24)	NKBA 3x95sm 6/10kV	0,415	vod(46)	AL/CE 3x95	0,974
vod(25)	AL/CE 3x95	0,781	vod(7)	N2YSEY 3x95rm/16 6/10kV	0,28
vod(27)	AL/CE 3x95	0,25	vod(9)	Al/Ce 3x25	0,43

**Tablica 4.2** Popis vodova te njihove karakteristike

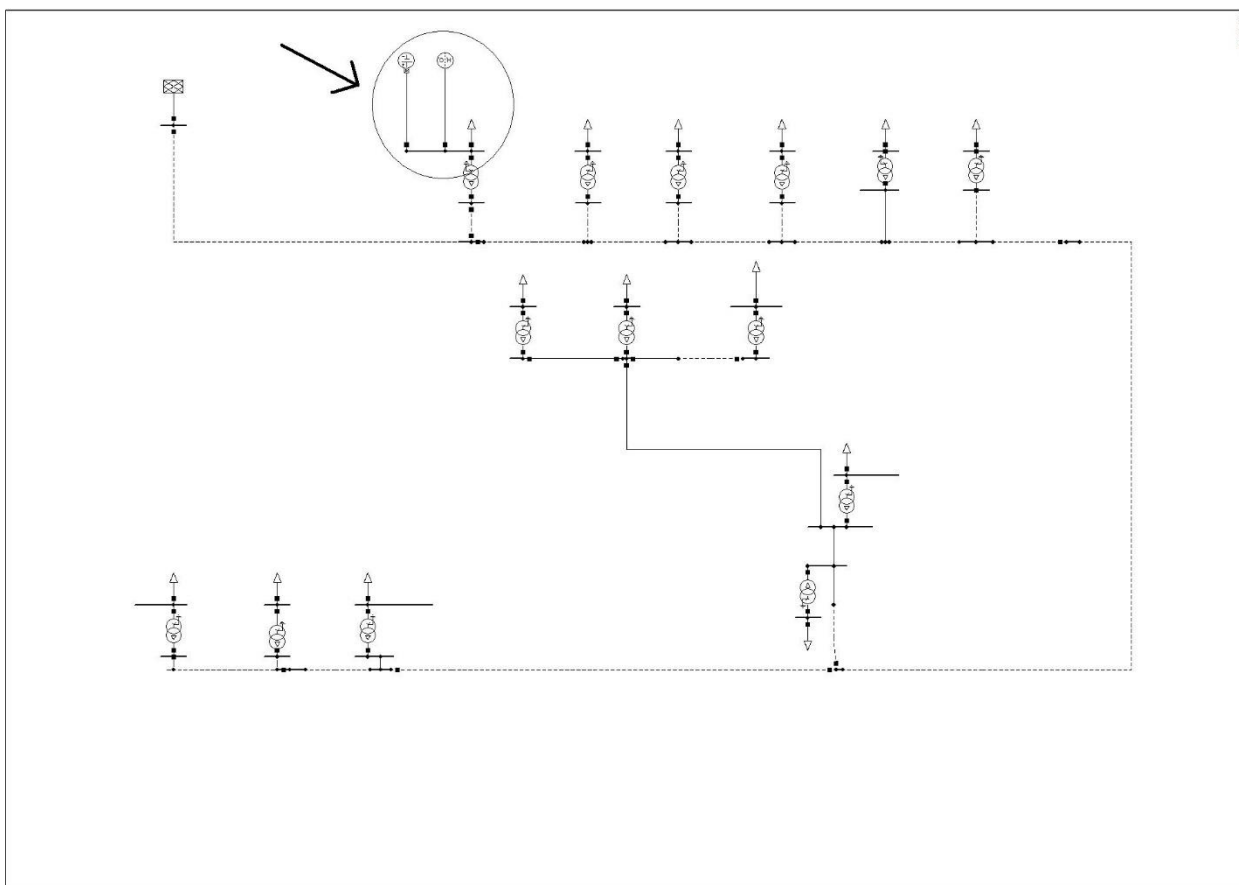
Transformatori	Tip
1	0.25MVA 10/0.4 kV Dyn5 4 ASEA
10	0.315MVA 10/0.4 kV Dyn5 6 ASEA
11	0.25MVA 10/0.4 kV Dyn5 4 ASEA
12	0.25MVA 10/0.4 kV Dyn5 4 ASEA
13	0.25MVA 10/0.4 kV Dyn5 4 ASEA
14	0.315MVA 10/0.4 kV Dyn5 4 ASEA
2	0.25MVA 10/0.4 kV Dyn5 6 ASEA
3	0.16MVA 10/0.4 kV Dyn5 ASEA
4	0.16MVA 10/0.4 kV Dyn5 ASEA
5	0.16MVA 10/0.4 kV Dyn5 ASEA

6	0.63MVA 10/0.4 kV Dyn5 4 ASEA
7	0.25MVA 10/0.4 kV Dyn5 4 ASEA
8	0.315MVA 10/0.4 kV Dyn5 6 ASEA
9	0.25MVA 10/0.4 kV Dyn5 4 ASEA

**Tablica 4.3** Popis transformatora te njihov tip

#### 4.1 Prvi slučaj

U prvom slučaju spaja se baterija i goriva ćelija na sabirnicu 0,4 kV Farm 5 prikazano na slici 4.2. Zatim su se mijenjali parametri, dvostrukim lijevim klikom na komponentu baterije i gorive ćelije, na četiri različita načina kao što je i prikazano u tablici 4.4.



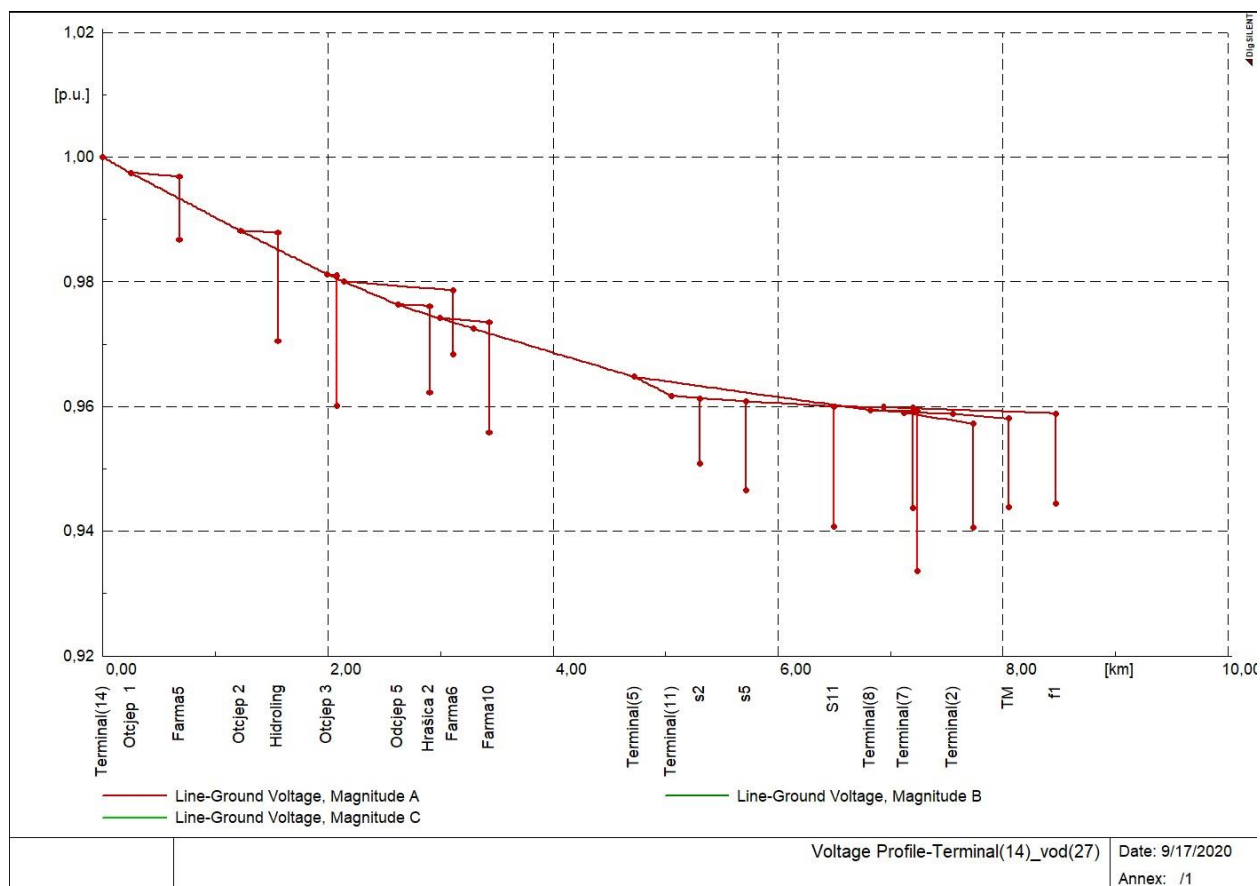
**Slika 4.2** Prikaz simulacijskog modela s baterijom i gorivom ćelijom spojenima na sabirnicu 0,4 kV Farm 5



Način	Djelatna snaga baterije[kW]	Djelatna snaga gorive ćelije[kW]	Sabirnica
1.	0	0	0,4 kV Farm 5
2.	50	50	
3.	100	100	
4.	150	150	

**Tablica 4.4** Parametri baterije i gorive ćelije

1. NAČIN – u prvom načinu je isključena baterija i goriva ćelija, odnosno njihovi parametri djelatne snage su 0 kW.

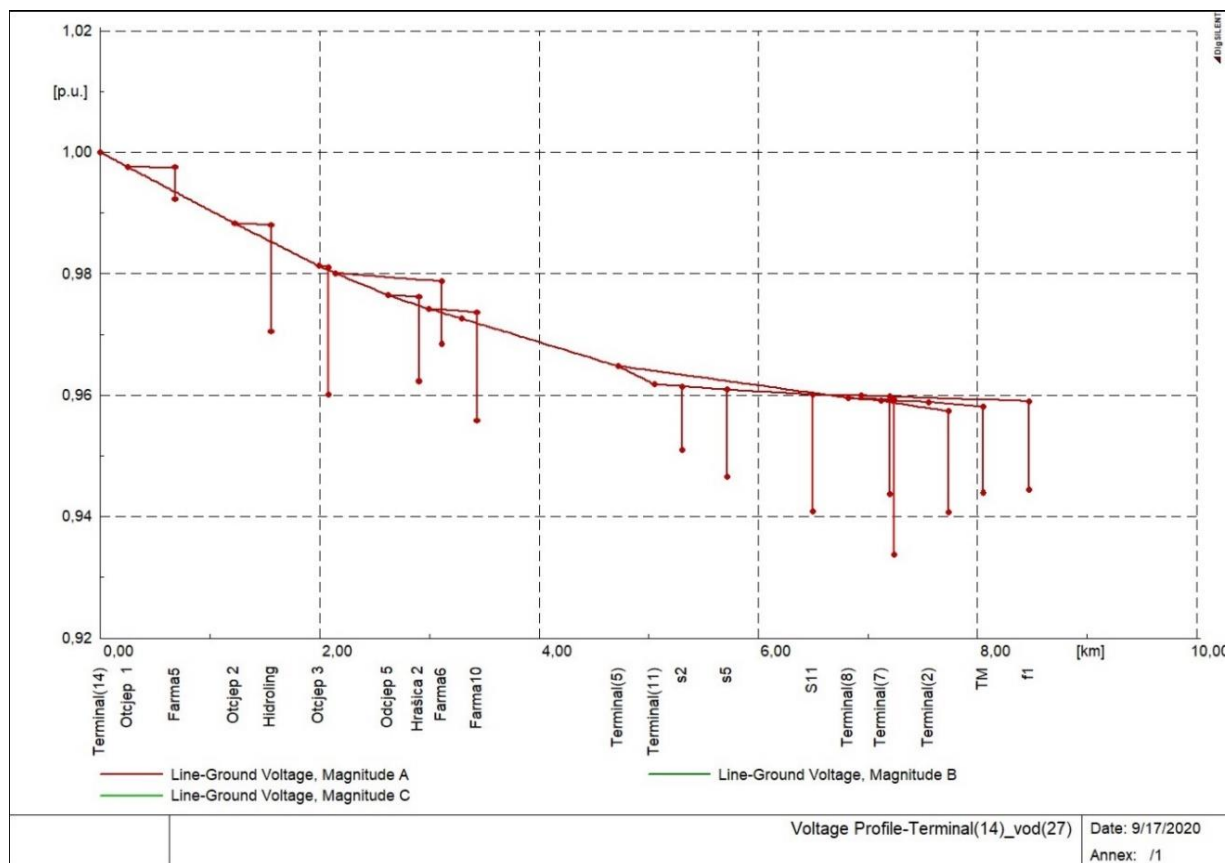


**Slika 4.3** Naponski profil izvoda mreže pri isključenoj bateriji i gorivoj ćeliji

	Djelatna snaga [kW]	Jalova snaga [kvar]	Prividna snaga [kVA]
Proizvodnja električne energije	0	0	0
Tok snage iz nadređene mreže	2208,7	787,22	2344,79
Opterećenje mreže	2124,95	698,43	2236,79
Opterećenje mreže pri nazivnom naponu	2125	698,45	2236,84
Gubici u mreži	84,05	89,41	
Faktor snage proizvodnje električne energije	0		
Faktor snage opterećenja mreže/motora	0,95/0		

**Tablica 4.5** Parametri distribucijske mreže pri isključenoj bateriji i gorivoj ćeliji

2. NAČIN – promijenjeni su parametri djelatne snage baterije i gorive ćelije, te oni iznose 50 kW.

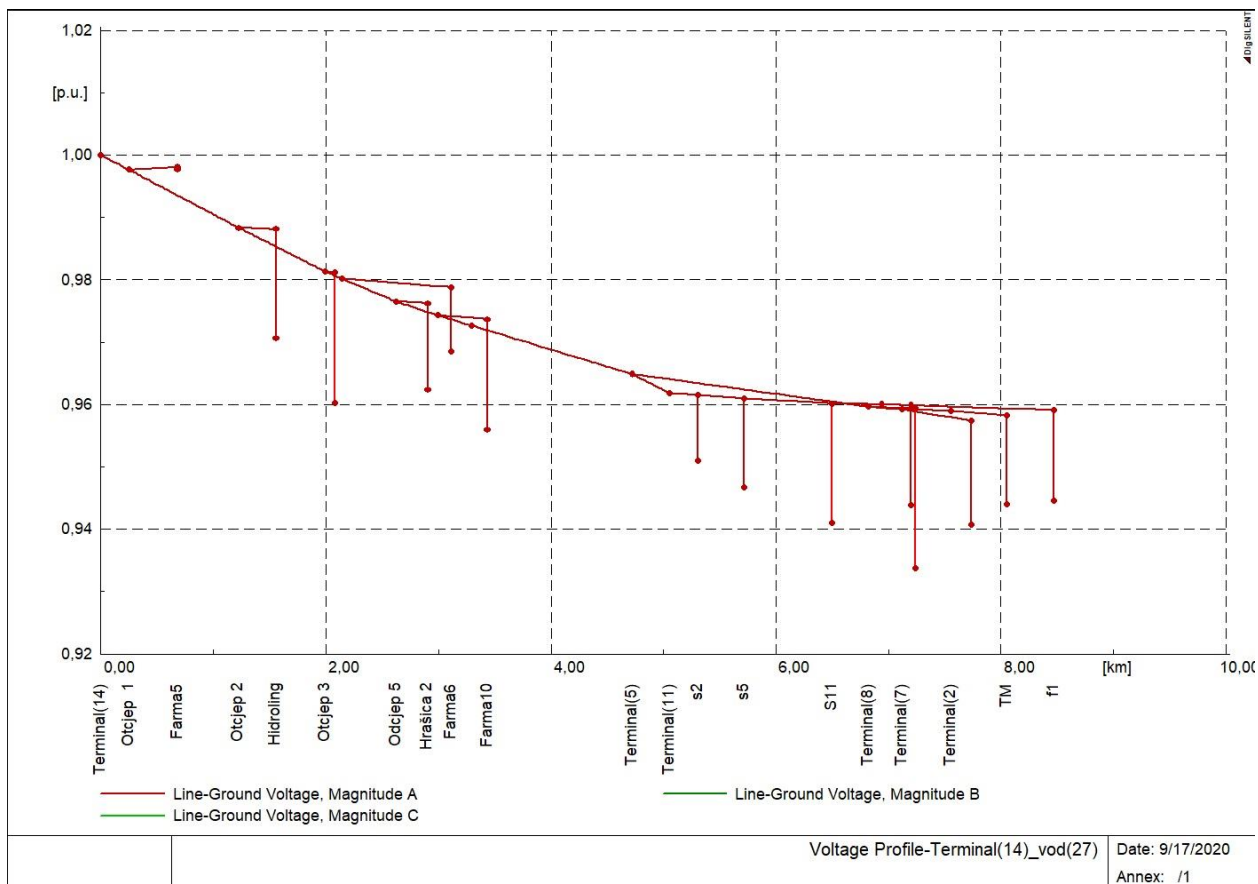


**Slika 4.4** Naponski profil izvoda mreže pri djelatnoj snazi od 50 kW baterije i gorive ćelije

	Djelatna snaga [kW]	Jalova snaga [kvar]	Prividna snaga [kVA]
Proizvodnja električne energije	100	0	100
Tok snage iz nadređene mreže	2107,8	785,15	2249,29
Opterećenje mreže	2124,95	698,43	2236,79
Opterećenje mreže pri nazivnom naponu	2125	698,45	2236,84
Gubici u mreži	83,15	87,34	
Faktor snage proizvodnje električne energije	1		
Faktor snage opterećenja mreže/motora	0,95/0		

**Tablica 4.6** Parametri distribucijske mreže pri djelatnoj snazi od 50 kW baterije i gorive ćelije

3. NAČIN - promijenjeni su parametri djelatne snage baterije i gorive ćelije, te oni iznose 100 kW.



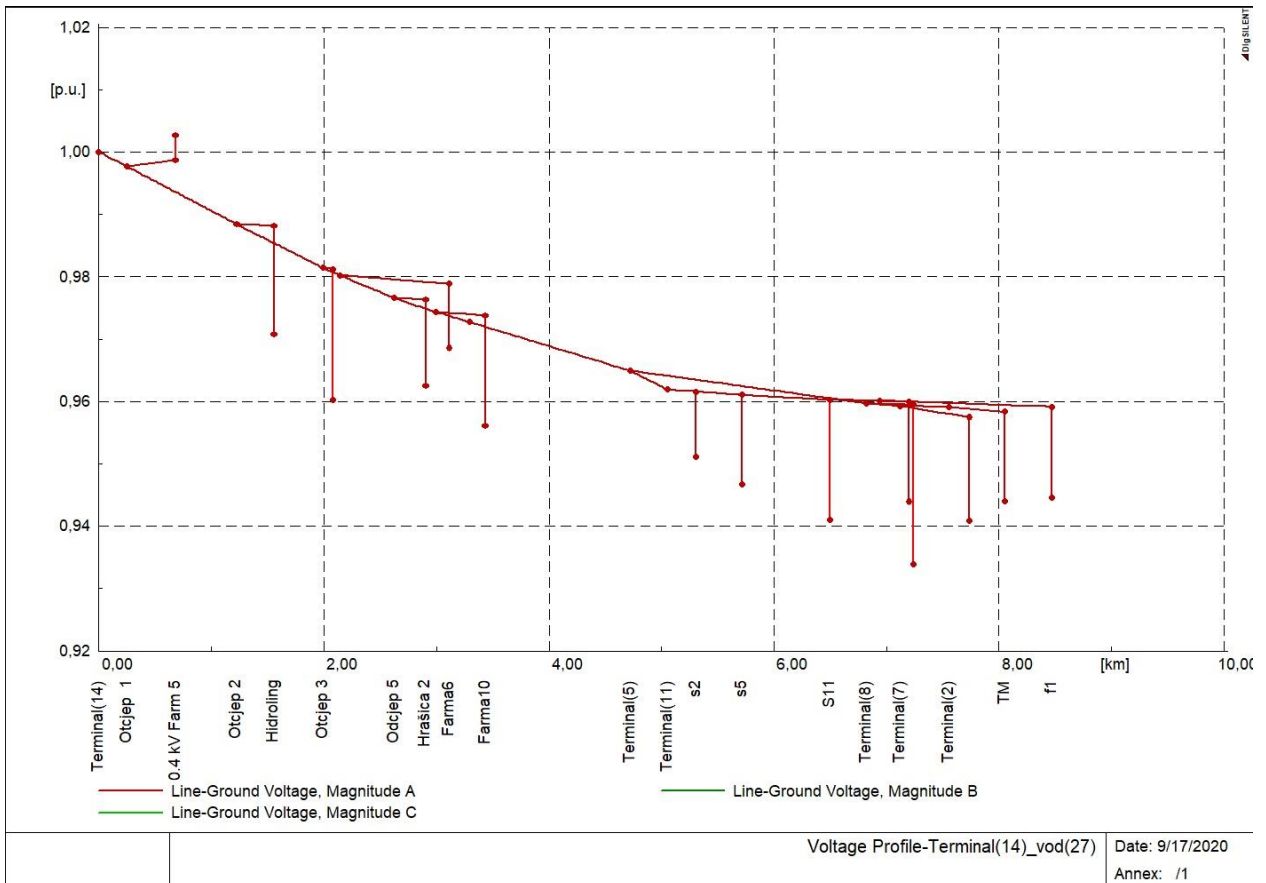
**Slika 4.5** Naponski profil izvoda mreže pri djelatnoj snazi od 100 kW baterije i gorive ćelije

	Djelatna snaga [kW]	Jalova snaga [kvar]	Prividna snaga [kVA]
Proizvodnja električne energije	200	0	200
Tok snage iz nadređene mreže	2008,01	786,26	2156,45
Opterećenje mreže	2124,95	698,43	2236,79
Opterećenje mreže pri nazivnom naponu	2125	698,45	2236,84
Gubici u mreži	83,36	88,45	

Faktor snage proizvodnje električne energije	1		
Faktor snage opterećenja mreže/motora	0,95/0		

**Tablica 4.7** Parametri distribucijske mreže pri djelatnoj snazi od 100 kW baterije i gorive ćelije

4. NAČIN - promijenjeni su parametri djelatne snage baterije i gorive ćelije, te oni iznose 150 kW.



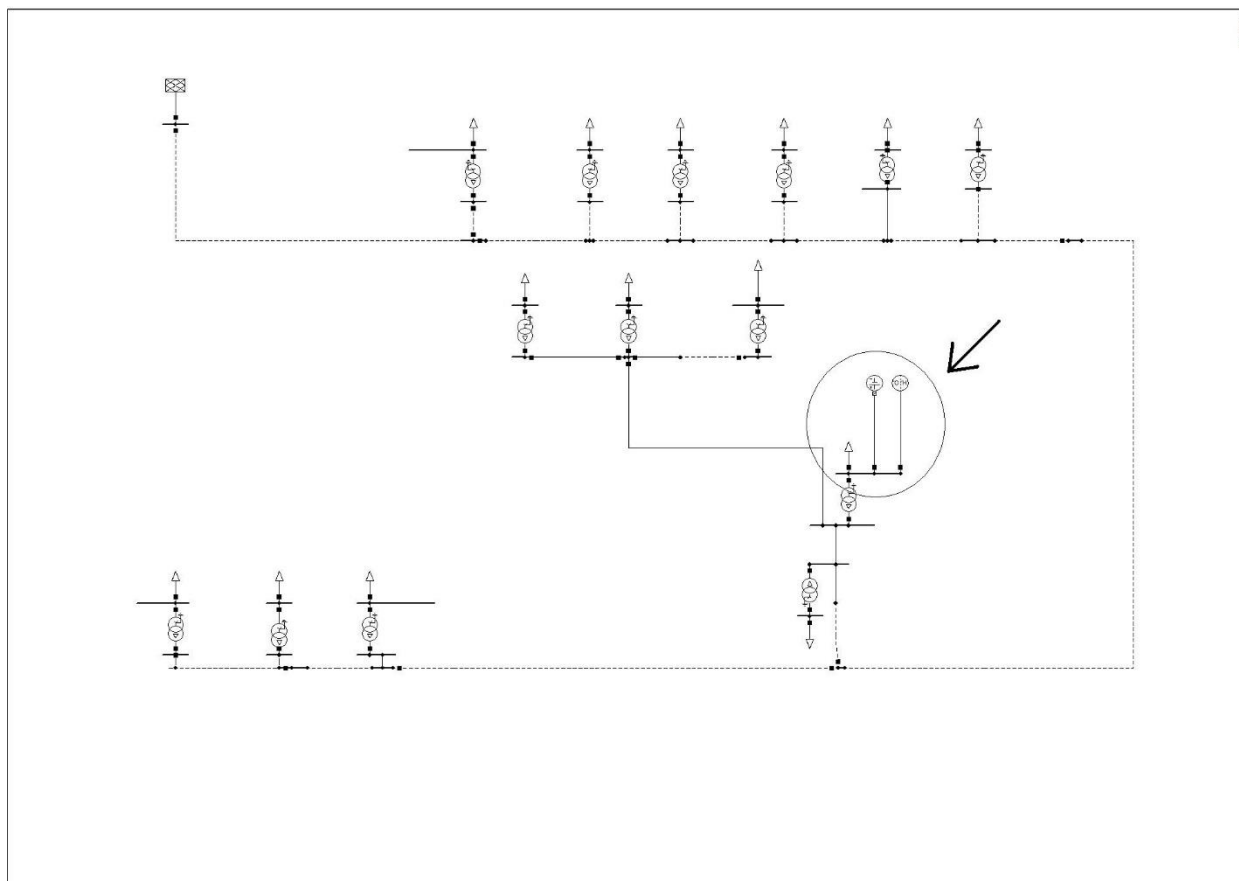
**Slika 4.6** Naponski profil izvoda mreže pri djelatnoj snazi od 150 kW baterije i gorive ćelije

	Djelatna snaga [kW]	Jalova snaga [kvar]	Prividna snaga [kVA]
Proizvodnja električne energije	300	0	300
Tok snage iz nadređene mreže	1909,28	790,42	2066,42
Opterećenje mreže	2124,95	698,43	2236,79
Opterećenje mreže pri nazivnom naponu	2125	698,45	2236,84
Gubici u mreži	84,15	92,62	
Faktor snage proizvodnje električne energije	1		
Faktor snage opterećenja mreže/motora	0,95/0		

**Tablica 4.8** Parametri distribucijske mreže pri djelatnoj snazi od 150 kW baterije i gorive ćelije

## 4.2 Drugi slučaj

U drugom slučaju baterija i goriva ćelija su spojene na drugu sabirnicu, odnosno sabirnicu 0,4 kV Srac 5, prikazano na slici 4.6. Parametri su se također mijenjali ali ovaj puta na tri različita načina, prikazano u tablici 4.9.

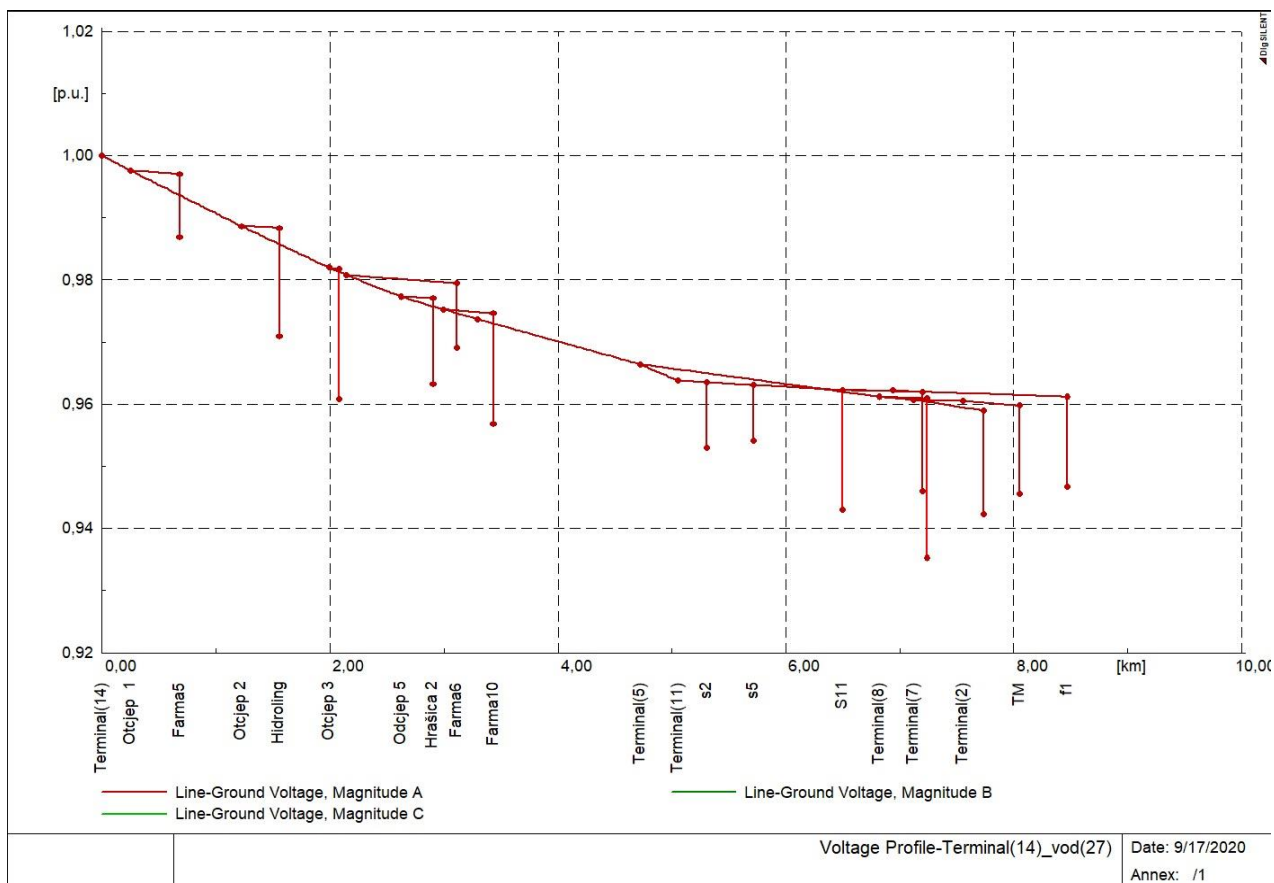


**Slika 4.6** Prikaz simulacijskog modela s baterijom i gorivom ćelijom spojenima na sabirnicu 0,4 kV Srca 5

Način	Djelatna snaga baterije[kW]	Djelatna snaga gorive ćelije[kW]	Sabirnica
1.	50	50	0,4 kV Srca 5
2.	100	100	
3.	150	150	

**Tablica 4.9** Parametri baterije i gorive ćelije

1. NAČIN - postavljeni su parametri djelatne snage baterije i gorive ćelije, te oni iznose 50 kW.



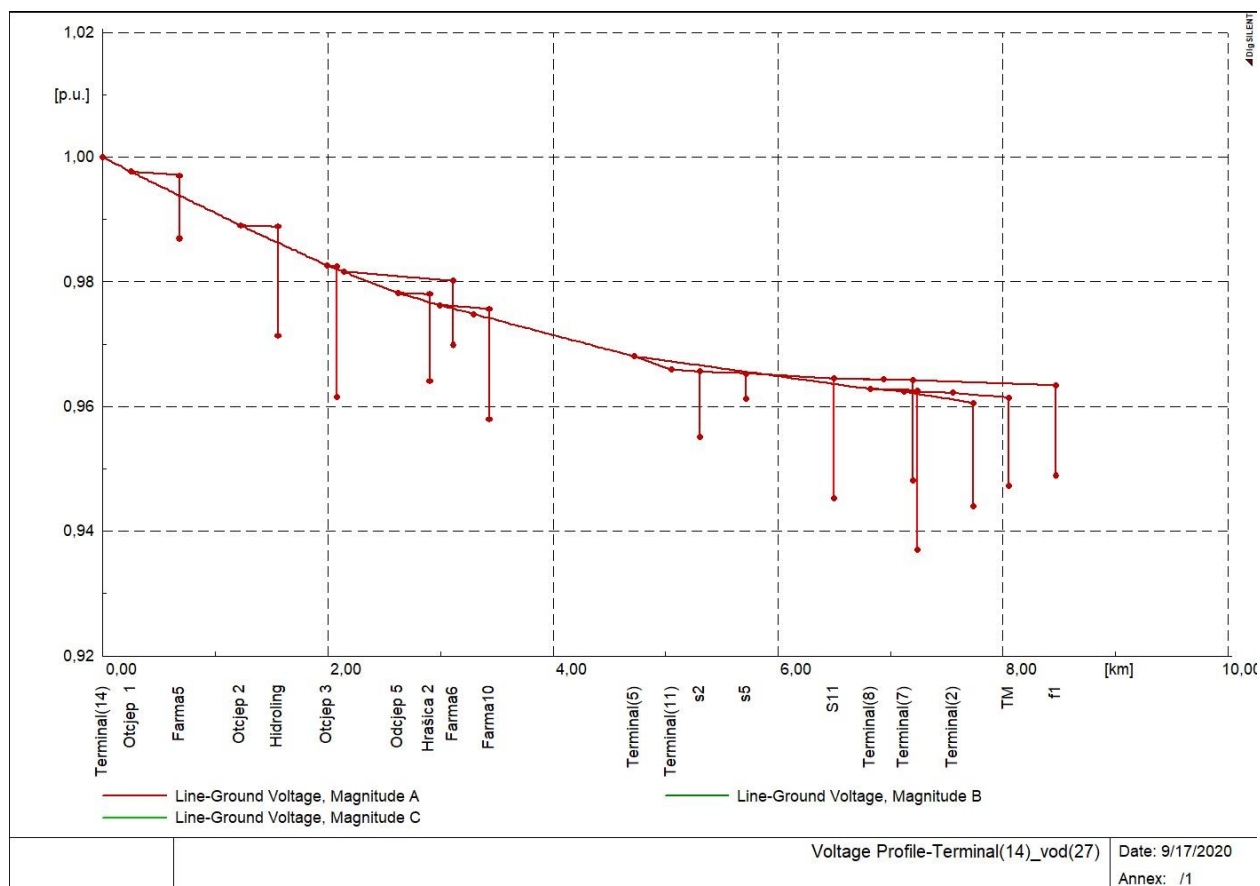
**Slika 4.7** Naponski profil izvoda mreže pri djelatnoj snazi od 50 kW baterije i gorive ćelije

	Djelatna snaga [kW]	Jalova snaga [kvar]	Prividna snaga [kVA]
Proizvodnja električne energije	100	0	100
Tok snage iz nadređene mreže	2102,89	777,1	2240,79
Opterećenje mreže	2124,95	698,43	2236,79
Opterećenje mreže pri nazivnom naponu	2125	698,45	2236,84
Gubici u mreži	77,19	79,21	
Faktor snage proizvodnje električne energije	1		
Faktor snage opterećenja mreže/motora	0,95/0		

**Tablica 4.10** Parametri distribucijske mreže pri djelatnoj snazi od 50 kW baterije i gorive ćelije

2. NAČIN - parametri djelatne snage baterije i gorive ćelije su promijenjeni, te oni iznose 100 kW.



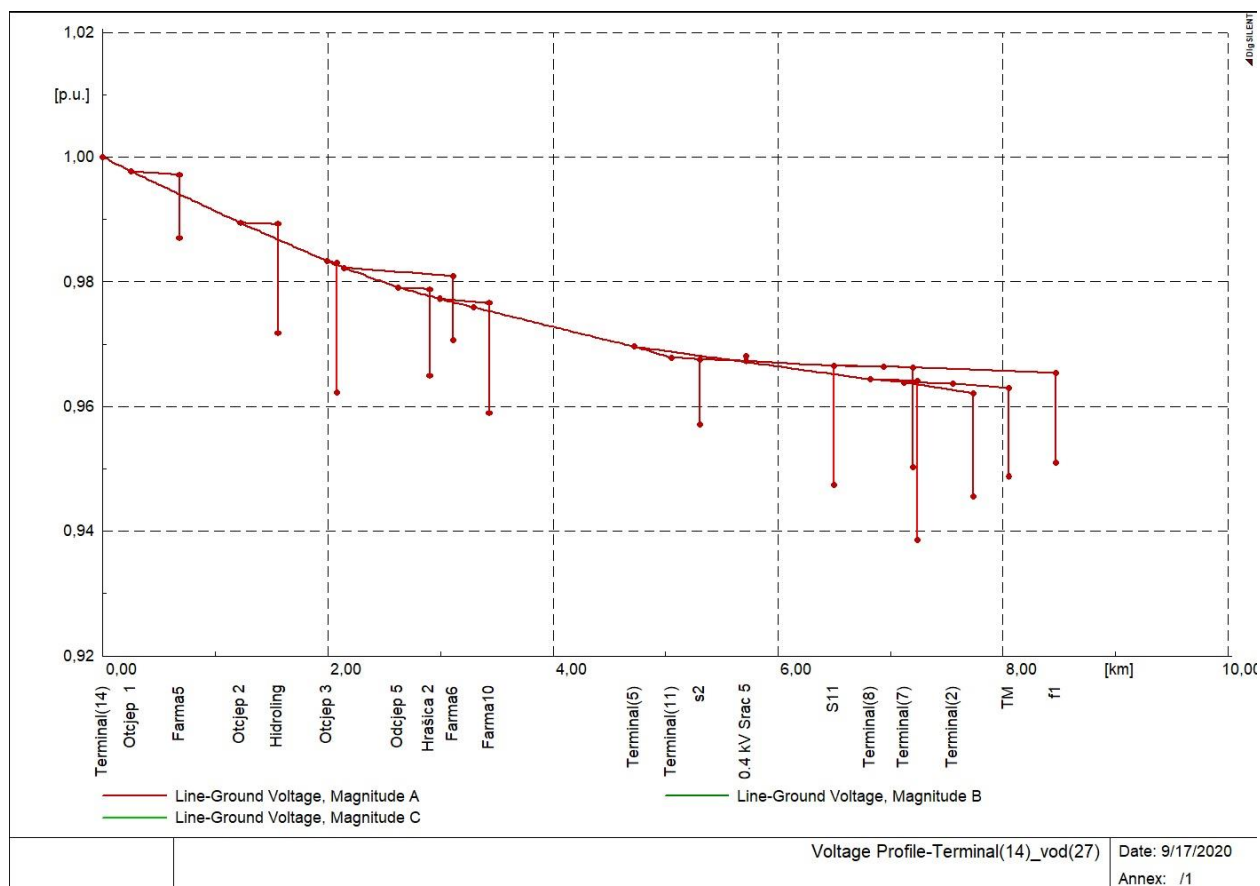


**Slika 4.8** Naponski profil izvoda mreže pri djelatnoj snazi od 100 kW baterije i gorive ćelije

	Djelatna snaga [kW]	Jalova snaga [kvar]	Prividna snaga [kVA]
Proizvodnja električne energije	200	0	200
Tok snage iz nadređene mreže	1996,74	771,01	2140,43
Opterećenje mreže	2124,95	698,43	2236,8
Opterećenje mreže pri nazivnom naponu	2125	698,45	2236,84
Gubici u mreži	72,01	73,07	
Faktor snage proizvodnje električne energije	1		
Faktor snage opterećenja mreže/motora	0,95/0		

**Tablica 4.11** Parametri distribucijske mreže pri djelatnoj snazi od 100 kW baterije i gorive ćelije

3. NAČIN - parametri djelatne snage baterije i gorive ćelije su promijenjeni, te oni iznose 150 kW.



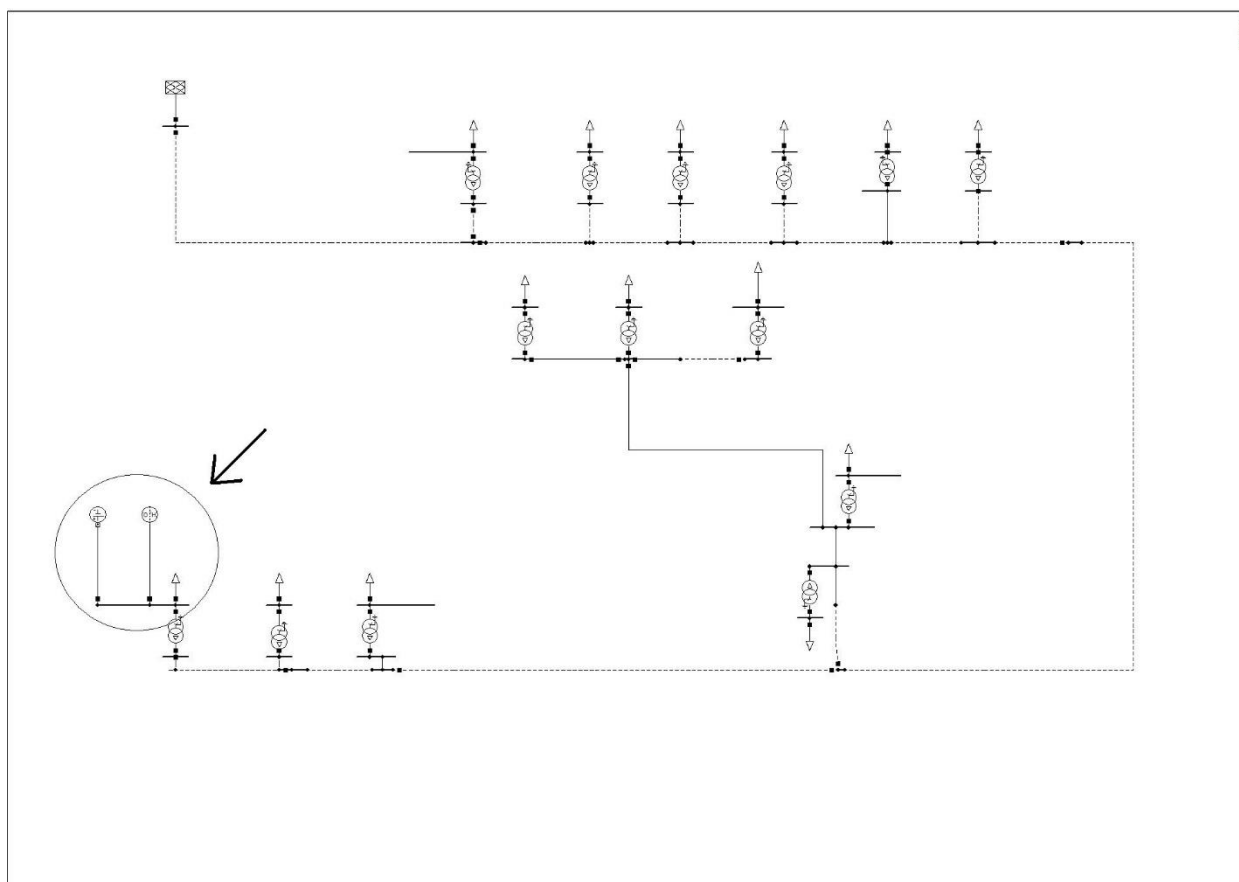
**Slika 4.8** Naponski profil izvoda mreže pri djelatnoj snazi od 150 kW baterije i gorive ćelije

	Djelatna snaga [kW]	Jalova snaga [kvar]	Prividna snaga [kVA]
Proizvodnja električne energije	300	0	300
Tok snage iz nadređene mreže	1893,18	768,79	2043,32
Opterećenje mreže	2124,95	698,43	2236,8
Opterećenje mreže pri nazivnom naponu	2125	698,45	2236,84
Gubici u mreži	68,43	70,82	
Faktor snage proizvodnje električne energije	1		
Faktor snage opterećenja mreže/motora	0,95/0		

**Tablica 4.12** Parametri distribucijske mreže pri djelatnoj snazi od 150 kW baterije i gorive ćelije

### 4.3 Treći slučaj

U trećem slučaju baterija i goriva ćelija su opet prespojene na drugu sabirnicu, odnosno sabirnicu 0,4 kV TM, prikazano na slici 4.9. Parametri su se također mijenjali ali ovaj puta na tri različita načina, prikazano u tablici 4.13.

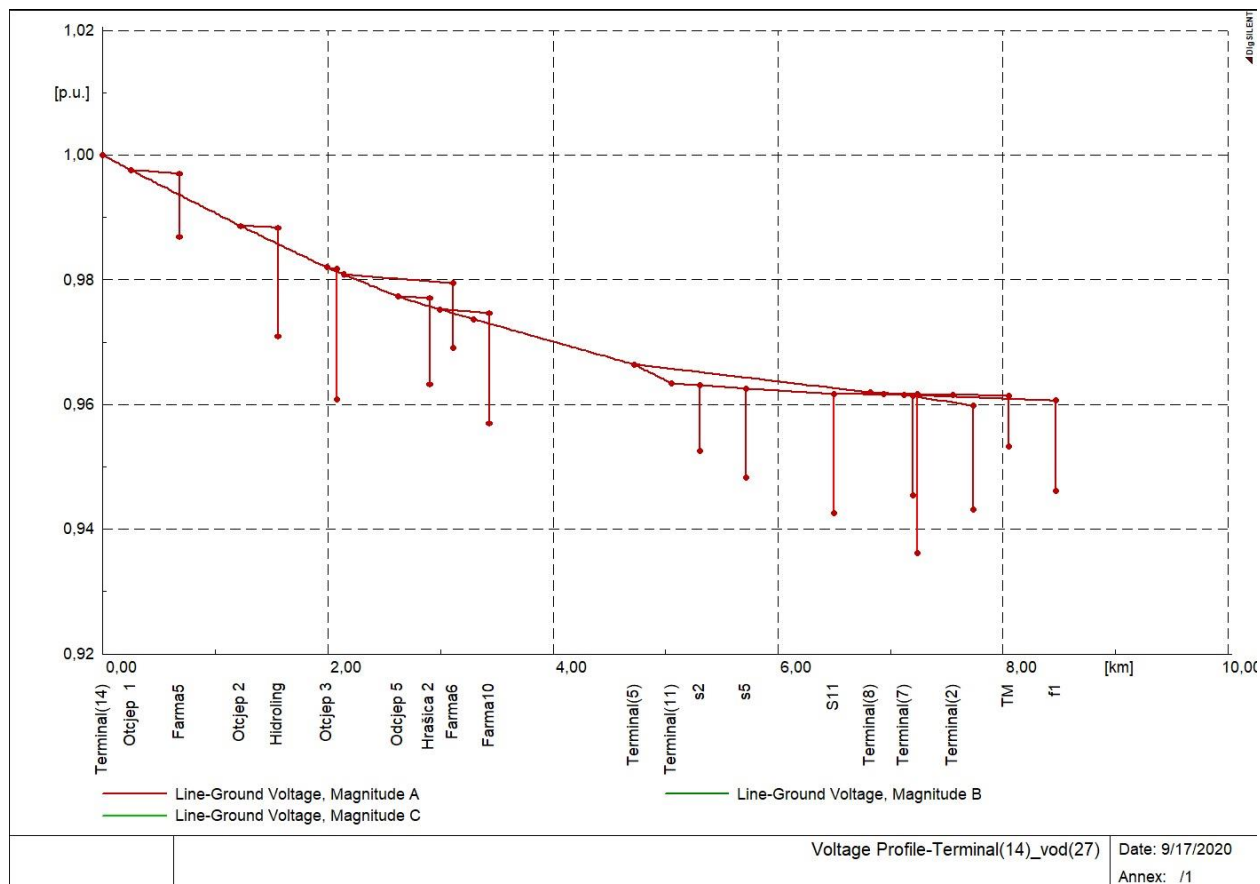


**Slika 4.9** Prikaz simulacijskog modela s baterijom i gorivom ćelijom spojenima na sabirnicu 0,4 kV TM

Način	Djelatna snaga baterije[kW]	Djelatna snaga gorive ćelije[kW]	Sabirnica
1.	50	50	0,4 kV TM
2.	100	100	
3.	150	150	

**Tablica 4.13** Parametri baterije i gorive ćelije

1. NAČIN - postavljeni su parametri djelatne snage baterije i gorive ćelije, te oni iznose 50 kW.

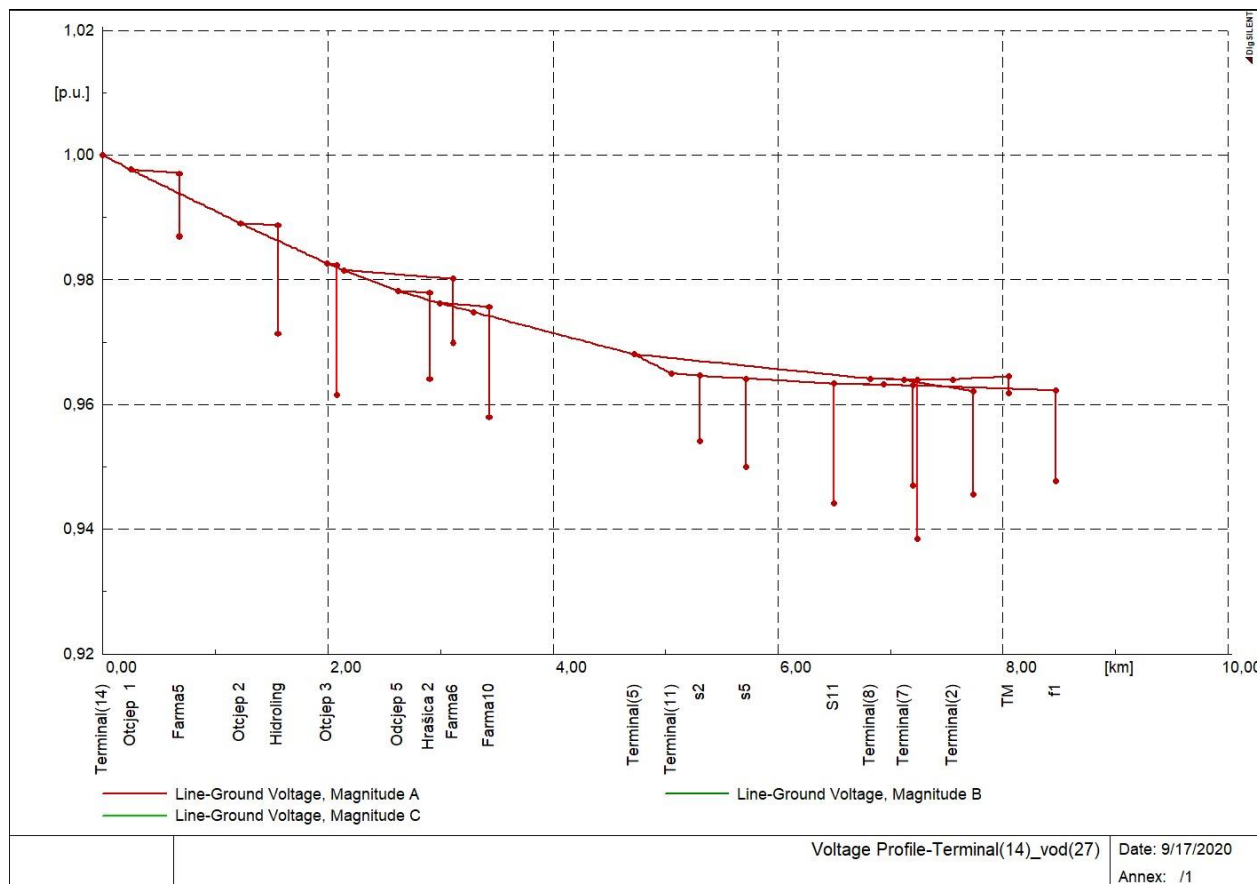


**Slika 4.10** Naponski profil izvoda mreže pri djelatnoj snazi od 50 kW baterije i gorive ćelije

	Djelatna snaga [kW]	Jalova snaga [kvar]	Prividna snaga [kVA]
Proizvodnja električne energije	100	0	100
Tok snage iz nadređene mreže	2102,04	776,63	2240,93
Opterećenje mreže	2124,95	698,43	2236,8
Opterećenje mreže pri nazivnom naponu	2125	698,45	2236,84
Gubici u mreži	77,34	78,73	
Faktor snage proizvodnje električne energije	1		
Faktor snage opterećenja mreže/motora	0,95/0		

**Tablica 4.14** Parametri distribucijske mreže pri djelatnoj snazi od 50 kW baterije i gorive ćelije

2. NAČIN - promijenjeni su parametri djelatne snage baterije i gorive ćelije, te oni iznose 100 kW.

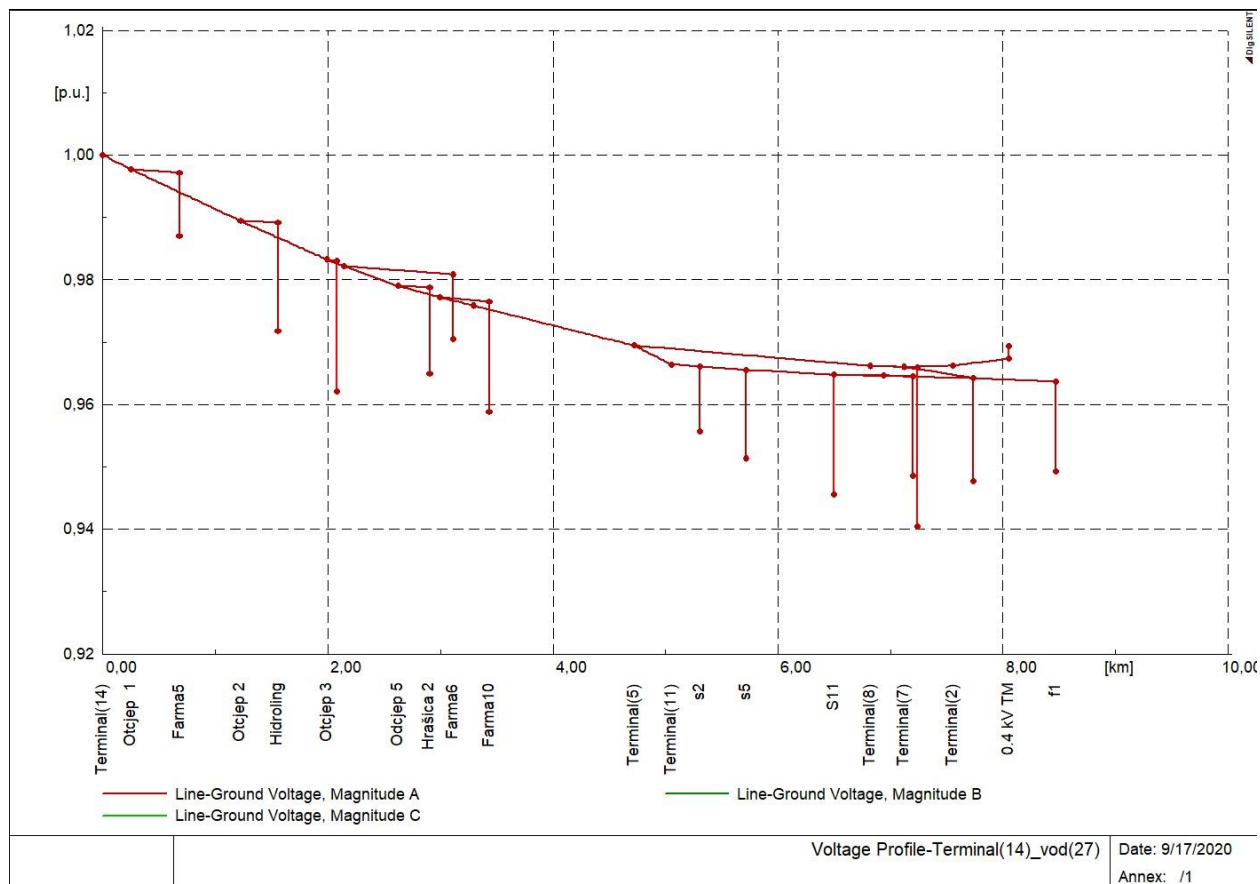


**Slika 4.11** Naponski profil izvoda mreže pri djelatnoj snazi od 100 kW baterije i gorive ćelije

	Djelatna snaga [kW]	Jalova snaga [kvar]	Prividna snaga [kVA]
Proizvodnja električne energije	200	0	200
Tok snage iz nadređene mreže	1997,44	772,18	2141,5
Opterećenje mreže	2124,95	698,43	2236,8
Opterećenje mreže pri nazivnom naponu	2125	698,45	2236,84
Gubici u mreži	72,71	74,23	
Faktor snage proizvodnje električne energije	1		
Faktor snage opterećenja mreže/motora	0,95/0		

**Tablica 4.15** Parametri distribucijske mreže pri djelatnoj snazi od 100 kW baterije i gorive ćelije

3. NAČIN - promijenjeni su parametri djelatne snage baterije i gorive ćelije, te oni iznose 150 kW.



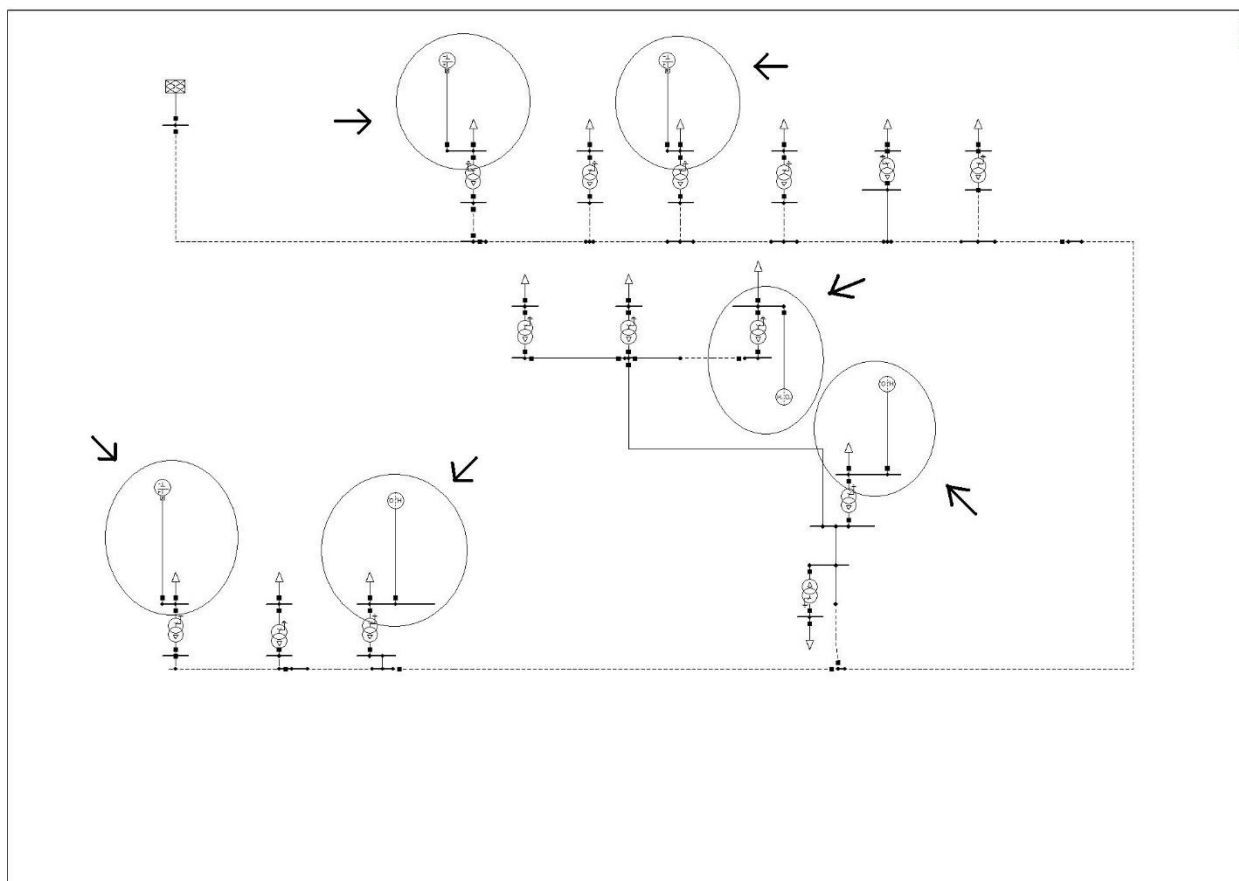
**Slika 4.12** Naponski profil izvoda mreže pri djelatnoj snazi od 150 kW baterije i gorive ćelije

	Djelatna snaga [kW]	Jalova snaga [kvar]	Prividna snaga [kVA]
Proizvodnja električne energije	300	0	300
Tok snage iz nadređene mreže	1894,79	773,55	2046,61
Opterećenje mreže	2124,95	698,43	2236,8
Opterećenje mreže pri nazivnom naponu	2125	698,45	2236,84
Gubici u mreži	70,07	75,61	
Faktor snage proizvodnje električne energije	1		
Faktor snage opterećenja mreže/motora	0,95/0		

**Tablica 4.16** Parametri distribucijske mreže pri djelatnoj snazi od 150 kW baterije i gorive ćelije

#### 4.4 Četvrti slučaj

U četvrtom slučaju su spojene tri baterije i tri gorive ćelije na različite sabirnice, što je i prikazano na slici 4.13. U dva različita načina promijenjeni su parametri baterija i gorivih ćelija što je i prikazano u tablici 4.16.



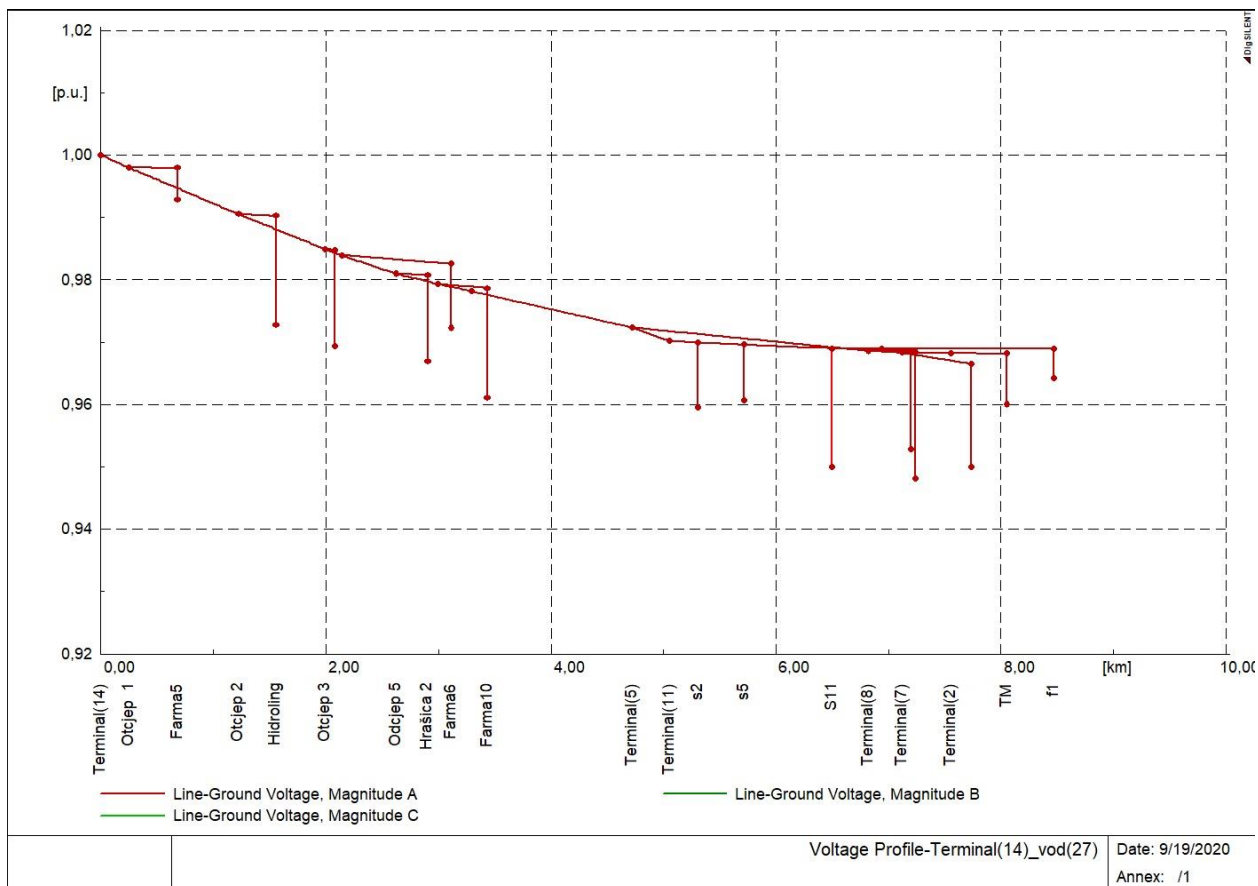
**Slika 4.13** Prikaz simulacijskog modela s baterijama i gorivim ćelijama spojenima na različite sabirnice

Način	Komponenta	Djelatna snaga[kW]	Sabirnica
1.	Baterija1	100	0.4 kV Farm 5
	Baterija2	100	0.4 kV Farm 4
	Baterija3	100	0.4 kV TM
	Goriva ćelija1	100	0.4 kV Srac 5
	Goriva ćelija2	100	0.4 kV F1
	Goriva ćelija3	100	Sc1 04 kV
2.	Baterija1	200	0.4 kV Farm 5
	Baterija2	200	0.4 kV Farm 4
	Baterija3	200	0.4 kV TM
	Goriva ćelija1	200	0.4 kV Srac 5

Goriva ćelija2	200	0.4 kV F1
Goriva ćelija3	200	Sc1 04 kV

**Tablica 4.17** Parametri baterija i gorivih ćelija te sabirnica na koje su spojene

1. NAČIN – postavljeni su parametri djelatna snage baterija i gorivih ćelija u vrijednosti od 100 kW



**Slika 4.14** Naponski profil izvoda mreže pri djelatnoj snazi od 100 kW baterija i gorivih ćelija

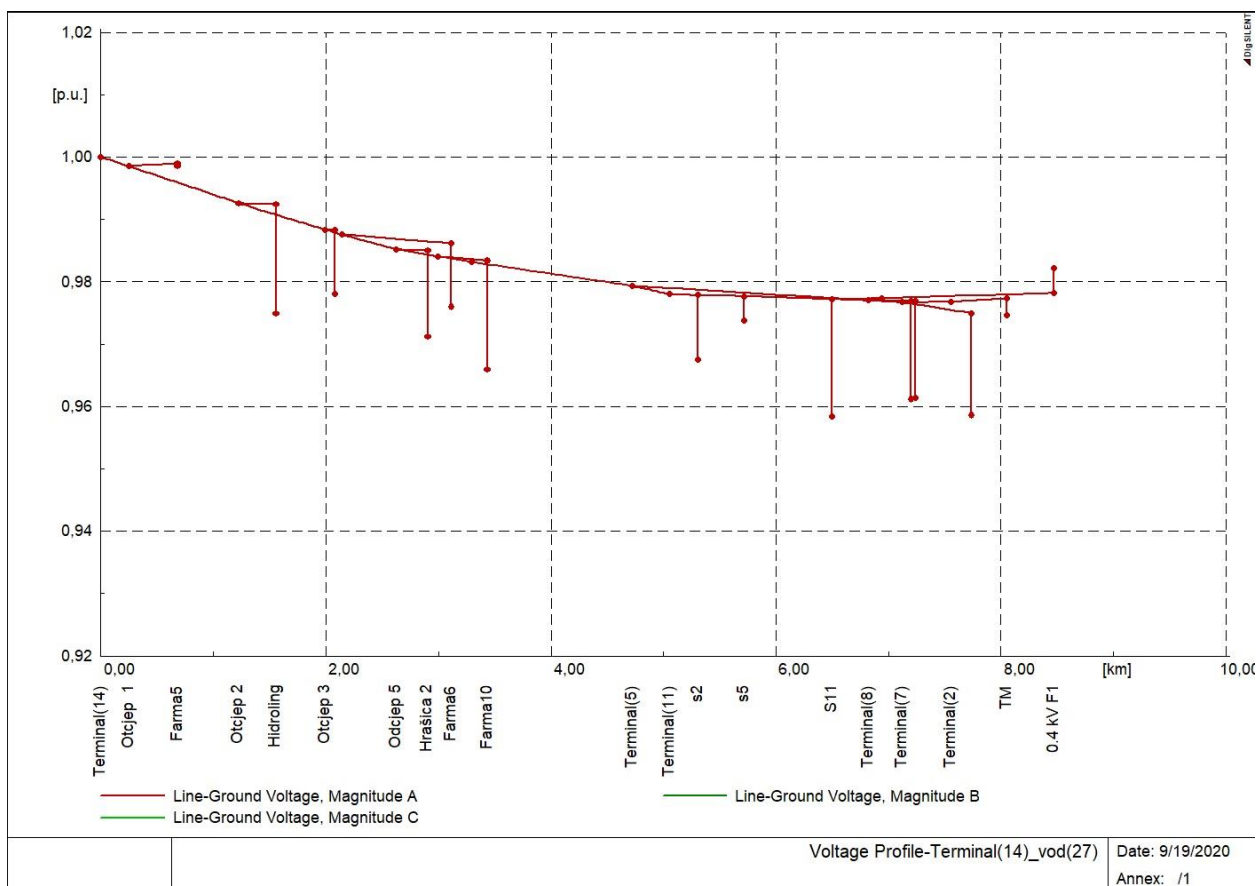
	Djelatna snaga [kW]	Jalova snaga [kvar]	Prividna snaga [kVA]
Proizvodnja električne energije	600	0	600
Tok snage iz nadređene mreže	1578,75	735,48	1741,66
Opterećenje mreže	2124,95	698,43	2236,8
Opterećenje mreže pri nazivnom naponu	2125	698,45	2236,84
Gubici u mreži	53,88	37,27	



Faktor snage proizvodnje električne energije	1		
Faktor snage opterećenja mreže/motora	0,95/0		

**Tablica 4.18** Parametri distribucijske mreže pri djelatnoj snazi od 100 kW baterija i gorivih ćelija

2. NAČIN – parametri djelatnih snaga baterija i gorivih ćelija su promijenjeni te oni iznose 200 kW

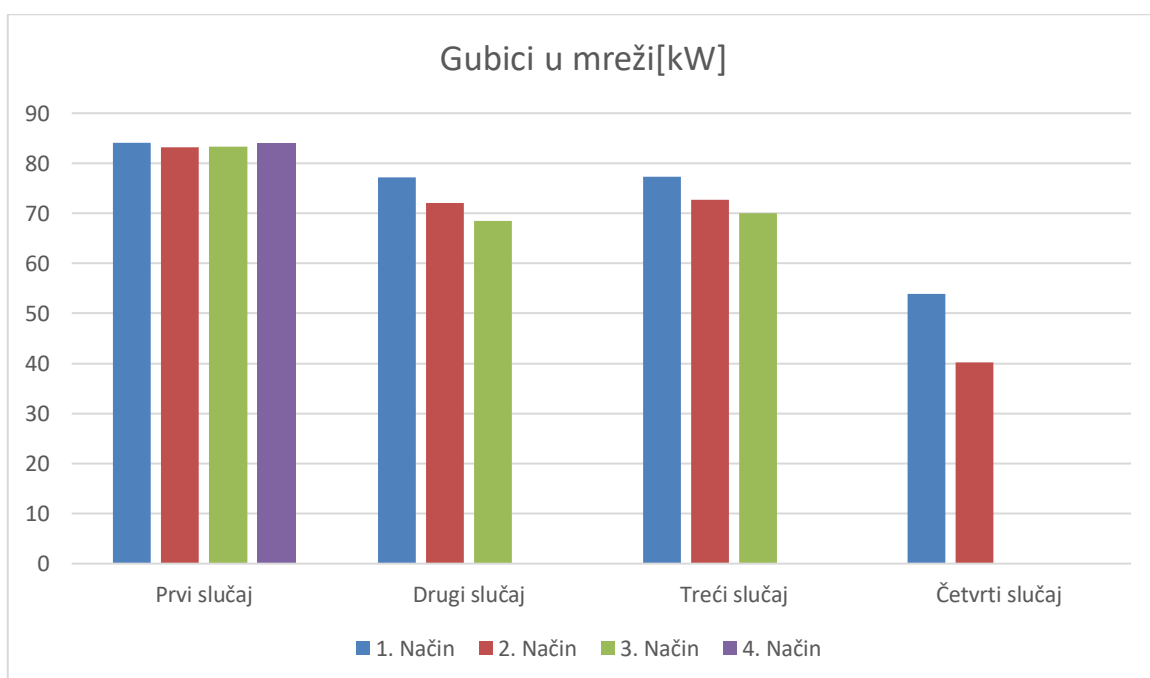


**Slika 4.15** Naponski profil izvoda mreže pri djelatnoj snazi od 200 kW baterija i gorivih ćelija

	Djelatna snaga [kW]	Jalova snaga [kvar]	Prividna snaga [kVA]
Proizvodnja električne energije	1200	0	1200
Tok snage iz nadređene mreže	966,13	718,89	1203,44
Opterećenje mreže	2124,95	698,43	2236,8

Opterećenje mreže pri nazivnom naponu	2125	698,45	2236,84
Gubici u mreži	40,21	20,58	
Faktor snage proizvodnje električne energije	1		
Faktor snage opterećenja mreže/motora	0,95/0		

**Tablica 4.19** Parametri distribucijske mreže pri djelatnoj snazi od 200 kW baterija i gorivih ćelija



**Slika 4.16** Usporedba gubitaka djelatne snage u mreži izražena u kW

## 5. ZAKLJUČAK

U završnom radu se provodila analiza i simulacija sustava za pohranu električne energije na primjeru distribucijske mreže u programu DIgSILENT PowerFactory. U prvom slučaju simulacije se provodila analiza mreže kada su jedna baterija i jedna goriva ćelija spojene na sabirnicu 0.4 kV Farm 5, koja je najbliže izvoru. Povećanjem djelatne snage baterije i gorive ćelije rezultiralo je povećanjem ukupnih gubitaka u mreži te povećanjem vrijednosti napona na sabirnici na koju su baterija i goriva ćelija spojeni. U drugom slučaju baterija i goriva ćelija su spojene na sabirnicu 0.4 kV Srac 5. U ovom slučaju, povećanjem djelatne snage baterije i gorive ćelije su se smanjivali ukupni gubici u mreži ali je pri tome došlo do povećanja napona na sabirnici na koju su spojeni. U trećem slučaju baterija i goriva ćelija su spojene na sabirnicu 0.4 kV TM, koja je spojena na kraju mreže. Povećanjem vrijednosti djelatne snage baterije i gorive ćelije također su se smanjivali ukupni gubici mreže te se povećavala vrijednost napona na sabirnici. U četvrtom slučaju spojene su tri baterije i tri gorive ćelije na šest različitih sabirnica. Povećanjem vrijednosti djelatne snage baterija i gorivih ćelija su se smanjivali ukupni gubici u mreži. Možemo zaključiti da baterije i gorive ćelije imaju svrhu kompenziranja jalove snage u mreži. S povećanjem broja baterija i gorivih ćelija spojenih u mrežu te povećanjem njihove djelatne snage ukupni gubici mreže se smanjuju.

## SAŽETAK

U ovom se završnom radu detaljno opisuju sustavi pohrane električne energije i njihov princip rada. Također se opisuju napredne mreže te njihova implementacija, model, značajke, prednosti i nedostaci. Analiza i simulacija je provedena u programu DIgSILENT PowerFactory a cilj je bio što bolje prikazati utjecaj baterija i gorivih ćelija na mrežu. Na temelju rezultata simulacije donesen je zaključak.

## ABSTRACT

This paper describes in detail the energy storage systems and their principle of operation. It also describes smart grids and their implementation, model, features, advantages and disadvantages. The analysis and simulation was performed in the DIgSILENT PowerFactory program and the goal was to show the impact of batteries and fuel cells on the grid. Based on the simulation results, a conclusion was reached.

**LITERATURA**

- [1] International Electrotechnical Commission – IEC "Electrical Energy Storage", 2011.
- [2] Global Energy Network Institute "Energy Storage Technologies and their Roll in Renewable Energy Integration", 2012.
- [3] Edvart Csanyi, Smart Grid Concept and Characteristics, <https://electrical-engineeringportal.com/smart-grid-concept-and-characteristics>
- [4] International Journal of Smart Grid and Clean Energy, Fadi Aloul, Rami Al-Dalky, Mamoun Al-Mardini, Wassim El-Hajj, <http://www.ijsgce.com/uploadfile/2012/1011/20121011121836539.pdf>
- [5] X. Fang, S. Misra, G. Xue, D. Yang, IEEE Communications Surveys & Tutorials, br. 14, sv. 4, str. 944-980, 2012.
- [6] Lopez Gregorio, Jose Ignacio Moreno, Pedro S. Moura, Anibal T. de Almeida, 5 Smart Grid technology areas (IEA 2011), [https://www.researchgate.net/figure/Smart-Gridtechnology-areas-IEA-2011\\_fig3\\_257391860](https://www.researchgate.net/figure/Smart-Gridtechnology-areas-IEA-2011_fig3_257391860)
- [7] Olofsson, M.: Power Quality and EMC in Smart Grid. Swedish National Electrical Safety Bord, Kristinehamn, Sweden. Electrical Power Quality and Utilisation Conference 2009 in Lodz, Poland, 15-17 September 2009.
- [8] Olofsson, M.: Power Quality and EMC in Smart Grid. Elforsk – Swedish Electrical Utilities' R & D Company, Stockholm, Sweden. Europe EMC guide 2012., str. 152. – 159.