

DOI: [10.46793/CIGRE37.C4.01](https://doi.org/10.46793/CIGRE37.C4.01)**C4.01****ANALIZA PRIVREMENIH PRENAPONA PRI INTEGRACIJI SKLADIŠTA
ELEKTRIČNE ENERGIJE****ANALYSIS OF TEMPORARY OVERVOLTAGES IN THE INTEGRATION OF
ELECTRICAL ENERGY STORAGE SYSTEMS****Suzana Nikolić, Mileta Žarković, Jovan Mikulović***

Kratak sadržaj: Povećana potreba potrošača za električnom energijom predstavlja ključni izazov u elektroenergetskom sistemu usled ugrožavanja njegove stabilnosti. To dovodi do odstupanja napona i frekvencije od nominalnih vrednosti, a problem postaje još složeniji sa priključenjem obnovljivih izvora energije (OIE) na distributivnu mrežu zbog njihove varijabilnosti. Kako bi se omogućio stabilan i održiv prelaz sa termoelektrana na OIE, neophodno je izgraditi sisteme za skladištenje električne energije. Jedno od mogućih rešenja predstavljaju baterijski sistemi za skladištenje energije (BESS), koji omogućavaju balansiranje proizvodnje i potrošnje energije, smanjujući pikove u potrošnji. Negativnu stranu njihove integracije predstavljaju prenaponski talasi koji mogu oštetiti postojeću elektroenergetsku opremu. Cilj ovog rada je izvršiti komparativnu analizu elektroenergetskog sistema pre i nakon integracije obnovljivih izvora energije i BESS-a, kao i istražiti njihov međusobni uticaj ukoliko se priključe istovremeno. U okviru metodologije, koristiće se programske analize i simulacije realnog sistema pomoću softverskog alata za registrovanje naponskih promena u mreži nakon integracije BESS-a. Ideja je uporediti amplitudu i strminu sklopnih prenapona pre i posle integracije BESS-a. Kao rezultat istraživanja, razvijen je reprezentativni model elektroenergetske mreže koji verodostojno prikazuje promene u sistemu nakon uvođenja baterijskih sistema za skladištenje energije. Ovaj model može poslužiti kao osnova za dalja istraživanja u cilju poboljšanja stabilnosti elektroenergetskog sistema usled sve većeg integracije OIE i BESS.

Ključne reči: elektroenergetski sistem, obnovljivi izvori energije, baterijski sistem za skladištenje energije, prenaponski talasi, simulacija.

Abstract: The increasing demand for electrical energy by consumers presents a key challenge for the power system due to its impact on system stability. This leads to deviations in voltage and frequency from nominal values, a problem further exacerbated by the integration of renewable energy sources (RES) into the distribution network due to their variability. To ensure a stable and sustainable transition from thermal power plants to RES, the development of energy

* Suzana Nikolić, Univerzitet u Beogradu -Elektrotehnički fakultet, niksuzana00@gmail.com

Mileta Žarković, Univerzitet u Beogradu -Elektrotehnički fakultet, mileta@etf.rs

Jovan Mikulović, University of Belgrade, School of Electrical Engineering, mikulovic@etf.bg.ac.rs

storage systems is essential. One potential solution is battery energy storage systems (BESS), which enable the balancing of energy production and consumption, thereby reducing peak loads. However, a downside of their integration is the occurrence of switching overvoltage waves that can damage existing power system equipment. The aim of this paper is to conduct a comparative analysis of the power system before and after the integration of RES and BESS, as well as to examine their mutual impact when connected simultaneously. The methodology involves software-based analysis and simulations of a real system using a specialized tool to record voltage fluctuations in the network after BESS integration. The study focuses on comparing the amplitude and steepness of switching overvoltages before and after BESS integration. As a result of this research, a representative model of the power network has been developed, accurately depicting system changes following the introduction of battery energy storage systems. This model can serve as a foundation for further research aimed at improving power system stability in light of the increasing integration of RES and BESS.

Key words: *power system, renewable energy sources, battery energy storage system, overvoltage waves, simulation.*

1 UVOD

Primat u proizvodnji električne energije, u poslednjoj deceniji, preuzimaju obnovljivi izvori energije. Iskorišćenje obnovljivih izvora energije u ove svrhe realizovano je formiranjem solarnih elektrana i vetroelektrana. Novi talas u ovoj oblasti predstavljaju baterijski sistemi za skladište električne energije (*Battery Energy Storage System*). Pomenute objekte je potrebno integrisati u postojeću elektroenergetsku mrežu kako bi se proizvedena električna energija distribuirala do potrošača. Prilikom integracije mogu se javiti različiti tipovi problema, ovde će se konkretno razmatrati privremeni prenaponi.

Slična istraživanja na ovu temu vršena su u [1], gde je izvršena analiza hibridnog elektorenergetskog sistema sa aspekta zaštite od atmosferskog pražnjenja. U analizama je zaključeno da prenaponi iz PV sistema ne utiču na WT-PV-BESS hibridni sistem, dok topologija sistema značajno utiče na smanjenje tranzijenata. Takođe u [2] je izvršena analiza prenaponskih talasa i njihovog uticaja na koordinaciju izolacije UHV AC prenosnog voda. Zaključeno je da svaka sklopna operacija generiše sklopni prenapon sa karakterističnim talasnim oblikom, koji utiče na koordinaciju izolacije. Analiza prenosa sklopnih prenapona u prenosnoj mreži 400 kV izvršena je u [3]. Vršena je instalacija dodatnog kabla u paraleli sa dva postojeća i analiza je pokazala da zbog rezonance u pojedinim frekvencijskim opsezima dolazi do prenosa sklopnog prenapona kroz mrežu i njegovog pojačavanja na udaljenim mestima do nivoa bliskog onom koji oprema može da izdrži. Istraživačka analiza primenjena u [4] bavi se istraživanjem efekta prenaponskih talasa u hibridnim PV/vetroenergetskim sistemima. Analiza je vršena simulacijom kvara sa zemljom i isključenjem opterećenja sa mreže. Zaključeno je da uticaj veze transformatora i podešavanje isključenja prekostrujnog releja može dovesti do nepravilnog rada uređaja za zaštitu od prenapona ili njegovog kvara. U [5] analiziraju se prvenstveno pojave koje utiču na rezonantne prenaponske talase, a izazvane su energizacijom transformatora. Udarne struje mogu izazvati paralelnu rezonancu koja povećava mogućnost pojave sklopnih prenapona. Integracijom statičkog sinhronog kompenzatora u sklopu vetroparka kao u [6] analizirana je sposobnost vetroturbine da sa ugrađenim kompenzatorom izdrži nastale sklopne prenapone, i pokazano je da sa pomenutim elementom vetropark uspešno izdržava sve prenaponske talase.

Pojava strmih prenaponskih talasa za posledicu može imati oštećenje postojeće opreme u sistemu. Prilikom proizvodnje elektroenergetske opreme, ona se dimenzioniše tako da može da izdrži sve prenapone koji se mogu javiti u mreži za koju je oprema predviđena. Ispitivanje i poznavanje sklopnih prenapona u mreži zato predstavlja jedan od najvažnijih koraka pri integraciji novih objekata na mrežu. Analiza opasnih stanja opreme vršice se pomoću softverskih alata, poređenjem amplitude sklopnih napona pre i posle pojedinačne i grupne integracije obnovljivih izvora energije i baterijskih sistema za skladište električne energije. Softverski alat pruža mogućnost brze i efikasne analize sistema, formiranjem reprezentativnog modela mreže. Cilj rada je formirati model mreže koji će poslužiti kao osnov za formiranje drugih modela i situacija u programu *PowerFactory*, a koji za cilj ima analizu privremenih prenapona i ispitivanja izdrživosti opreme pri integraciji solarnih elektrana, vetroelektrana i baterijskih sistema za skladište električne energije.

2 TEORIJSKI OSVRT

Za potrebe softverske analize, neophodno je numerički, teorijski i analitički definisati objekte predviđene za integraciju na mrežu.

2.1 Fotonaponski sistemi

Fotonaponski sistemi predstavljaju integrisan skup fotonaponskih modula i drugih komponenti koji primarnu solarnu energiju direktno pretvaraju u električnu energiju i predaju potrošačima ili elektroenergetskom sistemu [7]. Fotonaponski sistemi većih snaga (reda stotine MW) koji predaju velike količine energije elektroenergetskoj mreži nazivaju se fotonaponske elektrane.

Fotonaponska elektrana, odnosno solarna elektrana se sastoji od: solarnih ćelija grupisanih u module, invertora koji pretvara jednosmerni napon u naizmenični i transformatora preko koga se proizvedena električna energija predaje u elektroenergetsku mrežu.

Za estimaciju izlazne snage solarnog sistema pri uslovima različitim od standardnih koristi se relacija:

$$P_{DC} = P_{DC(STC)} \cdot (1 + \alpha_p \cdot (T_c - 25^\circ)) \quad (1)$$

Gde je T_c temperatura modula pri temperaturi ambijenta i iradijansi na površini modula, $P_{DC(STC)}$ - instalisana snaga fotonaponskog panela koji sadrži N redno-paralelno vezanih modula:

$$P_{DC(STC)} = N \cdot P_{DC(STC)1} \quad (2)$$

Gde $P_{DC(STC)1}$ predstavlja naznačenu snagu fotonaponskog modula koju deklariše proizvođač za standardne uslove (solarna iradijansa jednaka 1000 W/m^2 i temperaturi od 25°C).

U realnim eksploatacionim uslovima, snaga P_{AC} koju fotonaponski sistem predaje u mrežu je manja od izlazne DC snage modula pri standardnim uslovima zbog gubitaka u sistemu i manje vrednosti iradijanse na panel u odnosu na iradijansu za standardne uslove:

$$P_{AC} = P_{DC(STC)} \cdot \eta_z \cdot \eta_N \cdot \eta_T \cdot \eta_{inv} \cdot \frac{I_c}{1000 \text{ W/m}^2} \quad (3)$$

gde su: I_C iradijansa na površinu panela, η_z , η_N i η_T koeficijenti koji definišu smanjenje efikasnosti panela usled zaprljanja, neuparenosti i povećanja temperature modula u odnosu na standardnu vrednost od 25°C, a η_{inv} je koeficijent koji definiše efikasnost invertora [7].

2.2 Vetroelektrana

Vetroelektranu čini jedan ili više vetroagregata koji su priključeni u jednom čvorištu u distributivnoj ili prenosnoj mreži elektroenergetskog sistema. Pri izboru lokacije buduće vetroelektrane potrebno je odrediti vetroenergetski potencijal uzimajući u obzir sva lokalna ograničenja, kao što su problemi priključenja vetroelektrane na mrežu, neravan teren i tako dalje. Projektovanje vetroelektrane se sastoji od nekoliko koraka: izbor vetroagregata, prostorni raspored vetroagregata unutar vetroelektrane, interna električna mreža, uklapanje vetroelektrane u elektroenergetski sistem i procena godišnje proizvodnje električne energije.

Prilikom izbora vetroagregata treba obratiti pažnju na ograničenja poput: raspoloživog prostora za izgradnju, blizinu i kapacitet elektroenergetske mreže, uslove transporta opreme, uticaj na životnu sredinu, uslove rada vetroelektrane u elektroenergetskom sistemu. Vetroagregat predstavlja kompaktan funkcionalni sklop sistema za elektromehaničku konverziju energije vetra, njega čine sledeći elementi: generator, spojnica, transformator, ultrazvučni senzor brzine, reduktor sistema za zakretanje turbine prema smeru vetra, reduktor, mehanički kočioni disk, noseća konstrukcija, ležaj lopatice, glavčina, lopatica vetroturbine, cilindar, kontroler, servisni kran i dodatno stub sa temeljom. Vetroturbina vrši konverziju kinetičke energije vetra u mehaničku energiju obrtnog kretanja. Razlikuju se dva osnovna tipa: vetroturbina sa vertikalnom osovinom i vetroturbina sa horizontalnom osovinom [8].

Prilikom izbora visine stuba na tržištu se nudi više mogućih visina stuba, da bi se izabrala optimalna potrebno je za svaku visinu stuba izvršiti proračun godišnje proizvodnje i prosečne cene proizvedenog *MWh*. Kolika će se snaga razviti pri određenoj brzini vetra zavisi od površine koju pri rotaciji prebriše vetroturbina. Kada vetroturbina ima veliki prečnik ona pri manjim brzinama dostiže nominalnu snagu. Za sve brzine vetra koje su veće od nominalne vrednosti površina vetroturbine nije u potpunosti iskorišćena jer se javlja aeromehaničko kočenje, to jeste smanjuje se koeficijent iskorišćenja. Zbog prethodno navedenog nije ekonomski opravdano koristiti vetroturbine sa većim prečnikom.

Prilikom izbora lokacije vetroelektrane razmatra se ruža vetrova, na kojoj je potrebno uočiti najdominantniji vetar, da bi se kasnije vetroagregati postavljali u njegovom pravcu na što većoj udaljenosti, tako da interakcija između susednih turbina bude što manja. Poželjni optimalni raspored u vetroelektrani jeste postavljanje vetroagregata u jednom redu na rastojanju od 4D do 5D, pri rastojanju između redova od 8D do 10D, gde je D prečnik vetroturbine.

2.3 Baterijski sistemi za skladište električne energije

Baterijski sistem za skladište električne energije (BESS) predstavlja sistem koji skladišti električnu energiju u obliku hemijske energije. Sistem se sastoji od baterije, pretvarača energije i upravljačkog sistema. Baterija omogućava konverziju hemijske energije u električnu energiju i obrnuto. Posедуje podkomponente: ćeliju i modul. Ćelija predstavlja osnovnu jedinicu baterije i sadrži elektrode, elektrolit i separator. Ćelija definiše napon i kapacitet baterije. Modul je grupa ćelija koje su povezane paralelno ili serijski i određuje snagu, energiju i konfiguraciju baterije. Pored prethodno navedenog, baterije poseduju i sistem upravljanja baterijom, sistem upravljanja toplotom i mehaničku strukturu. Sistem upravljanja baterijom je zadužen za kontrolu i praćenje stanja napunjenosti, temperature, struje i napona baterije. Sistem upravljanja

toplotom je odgovoran za regulaciju temperature i sprečava prekomerno hlađenje ili pregrevanje. Mehanička struktura je odgovorna za zaštitu baterije i osigurava njenu mehaničku stabilnost [9].

Pretvarač predstavlja sponu između baterije i mreže vršeći pretvaranje naizmjenične AC struje u jednosmernu DC struju i obrnuto u zavisnosti od toka struje. Posедуje sledeće komponente: inverter, transformator, filter, kontroler i prekidač. Inverter vrši konverziju struje i određuje kvalitet i frekvenciju izlazne snage. Transformator je uređaj koji određuje nivo napona i transformiše impedansu izlazne snage. Filter vrši filtriranje i ujednačavanje izlazne snage, smanjujući šum i harmonijsku distorziju. Kontroler je odgovoran za sinhronizaciju izlazne snage i komunikaciju sa mrežom ili opterećenjem. Prekidač je odgovoran za isključivanje i uključivanje napajanja i kontrolu toka energije.

Upravljački sistem je zadužen za kontrolu rada BESS-a i sastoji se od dve komponente: lokalni kontroler i centralni kontroler. Lokalni kontroler upravlja pojedinačnim elementima poput baterije, pretvarača i zaštitnog uređaja definišući način rada i strategiju upravljanja BESS-om. Centralni kontroler vrši koordinaciju između BESS-a i drugih izvora energije u sistemu, kao što su obnovljivi izvori energije (OIE). Upravljački uređaj takođe poseduje senzor, merač i komunikacioni uređaj. Senzorom se prikupljaju podaci poput struje, napona, snage, energije i temperature. Merač vrši snimanje i prikaz proizvodnje i potrošnje energije. Komunikacioni uređaj vrši prenos komandi i signala [9].

Baterije se smeštaju u kontejnere, nakon čega se pozicioniraju na izabranu lokaciju prema rasporedu definisanom elektroenergetskim projektom.

Za formiranje baterijskih sistema za skladište električne energije često se koriste sledeći tipovi baterija: olovne baterije, protočne baterije i litijum-jonske baterije [9]. Olovne baterije su jedne od najstarijih i najčešće korišćenih. Sastoje se od olovnih ploča i elektrolita sumporne kiseline. Prednost im je visoka pouzdanost i niska cena, kao i dug vek trajanja. Mana im je niska efikasnost i uticaj na životnu sredinu. Protočne baterije predstavljaju vrstu punjivih baterija. Prednost im je visoka efikasnost i dug životni vek, dok su mane visoka cena i složen sistem, pri čemu je niska gustina snage. Litijum-jonske baterije predstavljaju najnapredniji i najkorišćeniji tip baterija. Sastoje se od litijumskih metalnih ili složenih elektroda i organskog elektrolita. Prednost im je visoka efikasnost i mali uticaj na životnu sredinu. Mane su visoka cena, sigurnosni problemi i ograničen životni vek.

2.4 Integracija BESS-a sa obnovljivim izvorima energije na elektroenergetsku mrežu

Za integraciju BESS sistema sa OIE predviđena su dva glavna načina: kolokacija i hibridizacija. Kolokacija znači da su BESS sistem i OIE instalirani na istoj lokaciji i povezani u zajedničku tačku. Kolokacija smanjuje gubitke u distribuciji i prenosu i povećava lokalnu potrošnju OIE. Hibridizacija znači da su BESS i OIE kombinovani u jedan sistem i rade kao entitet. Hibridizacija optimizuje rad i kontrolu BESS sistema i poboljšava njegove performanse i efikasnost.

BESS se može koristiti za rezervno napajanje i vršno opterećenje. Vršno opterećenje znači da se BESS puni u vreme vršnih sati kada je cena električne energije niska i da se prazni kada je cena električne energije visoka. Rezervno napajanje znači da BESS obezbeđuje napajanje u slučaju nestanka mreže ili pojave kvarova. Poboljšava pouzdanost i sigurnost napajanja sprečavajući gubitak podataka i proizvodnje.

BESS se može koristiti kao podrška za stabilnost mreže, što podrazumeva regulaciju frekvencije, napona i integraciju OIE. Regulacija frekvencije znači da BESS prilagođava svoju izlaznu snagu kako bi održao frekvenciju same mreže unutar određenog opsega. Ova pojava poboljšava kvalitet električne energije i sprečava disbalans proizvodnje i potrošnje. Kontrola napona znači da BESS ubacuje ili apsorbira reaktivnu snagu kako bi održao napon mreže unutar dozvoljenog raspona, na ovaj način doprinosi stabilnosti sistema kompenzujući porast napona prouzrokovanog varijacijom opterećenja. BESS višak obnovljive energije skladišti kada je proizvodnja prevelika, a potrošnja mala i oslobađa deo energije kada je proizvodnja niska, a potražnja za energijom u porastu. Integracija BESS-a može povećati korišćenje obnovljive energije i nivelisati njenu varijabilnost i intermitentnost u vremenu.

3 MODELOVANJE SOLARNE ELEKTRANE, VETROELEKTRANE I BESS SISTEMA U PROGRAMU POWERFACTORY

PowerFactory je programski paket koji se koristi za analizu i simulaciju elektroenergetskih sistema. U radu je pažnja posvećena elektromagnetnim tranzijentnim simulacijama (EMT) koje se bave analizom karakteristika mreže u slučaju prelaznih procesa.

Suština studije jeste detektovati pojavu sklopnih prenapona prilikom integracije OIE i baterijskog sistema za skladište električne energije na mrežu i utvrditi uticaj pomenutog tranzijenta na dimenzionisanje prekidača i ostale opreme. Cilj je formiranje algoritma prilikom modelovanja koji će kao takav biti upotrebljiv za bilo koju drugu mrežu na kojoj će se vršiti integracija gore pomenutih objekata, sa definisanim energetske kapacitetima.

Mreža na kojoj će se vršiti integracija OIE i BESS sistema predstavlja distributivnu mrežu naponskog nivoa 35 kV i prividne snage od 60 MVA. Mreža se sastoji od sabirnice 35 kV, transformatora prenosnog odnosa 35/20 kV i dve sabirnice od 20kV između kojih se nalazi nadzemni vod dužine 0,14 km.

3.1 Modelovanje fotonaponske elektrane pri integraciji na mrežu

U programu se za modelovanje solarne elektrane koristi element *PV system*. Za ovaj element je moguće izabrati dva načina unošenja parametara: *Active Power Input Mode* i *Solar Calculation Mode*. Za analizu priključenja solarne elektrane na mrežu odabran je prvi navedeni način. U ovom slučaju je potrebno definisati snagu solarne elektrane koja se integriše, broj invertora u sistemu i faktor snage. Solarna elektrana korišćena za analizu formirana je od četiri invertora i poseduje snagu od 3.63 MVA. Veza sa sabirnicom 20 kV na kojoj se vrši integracija obnovljivih izvora energije ostvarena je preko transformatora prenosnog odnosa 20/0.69 kV.

Prilikom simulacije integracije solarne elektrane na mrežu korišćen je DSL model (*DigSILENT Simulation Language*) koji pomaže pri kontrolisanju vremenski neprekidnih procesa. DSL model ima neke od sledećih karakteristika: opis diferencijalnih jednačina, izdavanje simulacionih događaja, kodiranje mrtvog vremena i još mnogo toga. U ovom slučaju će se koristiti za dinamičko modelovanje sistema obnovljivih izvora energije.

DSL model se implementira jednačinama stanja i dodaje se sistemskim jednačinama u analizi vremenskog domena. Za ispitivanje sklopnih prenapona korišćena je EMT simulacija, koja se bavi stanjima neposredno nakon sklopnih operacija. Vezu između novonastalih modela i sistemskih jednačina uspostavljaju elementi interfejsa, kao što su zajednički model i kompozitni model, pri čemu se mogu posmatrati njihovi efekti na dinamičke performanse

elektroenergetskog sistema. Kompozitni model je vrlo često formiran od zaštitnog bloka, kontrolnog bloka, statičkog generatora i elemenata za merenje napona i snage.

3.2 Modelovanje vetroelektrane pri integraciji na mrežu

Postoje različiti koncepti koji se koriste prilikom modelovanja vetroagregata, ovde će se koristiti koncept sa asinhronom mašinom. Prilikom definisanja parametara potrebno je definisati nominalnu snagu, nominalni napon, broj polova, kao i broj faza. Za potrebe modelovanja kao element izabrana je asinhrona mašina, kod koje se u delu *Plant Category* može izabrati tip vetroelektrane, što podrazumeva prethodno formiranje modela vetroturbine sa definisanim načinom priključenja na mrežu, kao i elementima koji pored vetroagregata formiraju tu elektranu. Za potrebe EMT simulacije, potrebno je definisati krivu elektromagnetnog momenta. Kao sledeći korak u formiranju modela potrebno je definisati DSL model koji je isti kao i u slučaju solarne elektrane, ali je sada umesto statičkog generatora korišćen kompozitni model sa asinhronom mašinom, pri čemu se sada kontroliše elektromagnetni moment i brzina obrtanja. Snaga vetroelektrane priključene na mrežu ima vrednost od 4 MVA. Pored vetroelektrane na sabirnicu 0.69 kV priključen je kapacitivni filter. Filter je integrisan u cilju regulacije harmonijskih izobličenja, zaštite opreme, stabilnosti mreže i usklađivanju sa regulativama. Ovo poslednje se odnosi na činjenicu da svaka zemlja ima regulative i pravilnike kojima se definiše koliko je dozvoljeno harmonijsko izobličenje koje vetroelektrana može uneti u mrežu. Električna energija koju u mrežu distribuiraju vetroelektrane mora biti u skladu sa regulativama o kvalitetu električne energije.

3.3 Modelovanje baterijskog skladišta električne energije pri integraciji na mrežu

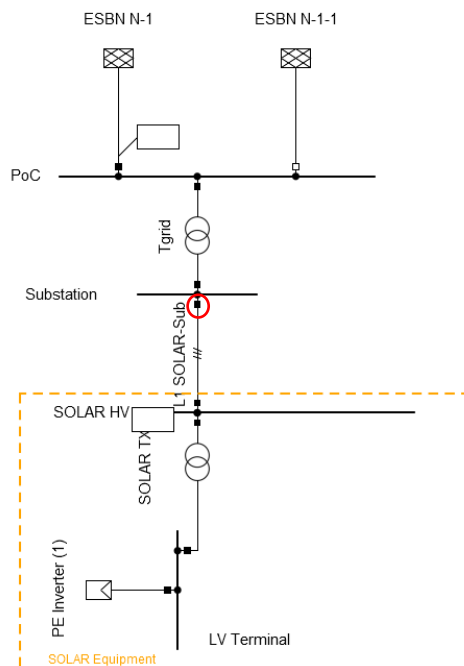
Za simulaciju modela baterijskog sistema za skladište električne energije u programu vrlo često se kao element koristi *Static Generator* kod koga postoji opcija izbora sistema koji je potrebno modelovati. U ovom slučaju izabrana je opcija *Storage* (skladište), pri čemu je potrebno definisati snagu, broj elemenata i faktor snage BESS sistema. Za potrebe simulacije izabran je sistem sa četiri jedinice sa ukupnom snagom od 3.63 MVA. Takođe u ovom slučaju korišćen je DSL model. Kompozitni model kontrolera se i u ovom slučaju sastoji od: zaštitnog bloka, kontrolnog bloka, statičkog generatora i elemenata za merenje napona i snage.

4 REZULTATI SIMULACIJA

Postupak simulacije integracije elemenata opisanih u Poglavlju 3 vršiće se pomoću sklopne operacije na prekidaču. Za prekidač je potrebno definisati rasklopne događaje (*Switch event*). Definiše se vreme uključenja ili isključenja objekta sa mreže i prati ponašanje talasnih oblika napona tokom pomenutih manipulacija sklopnom opremom.

4.1 Integracija solarne elektrane

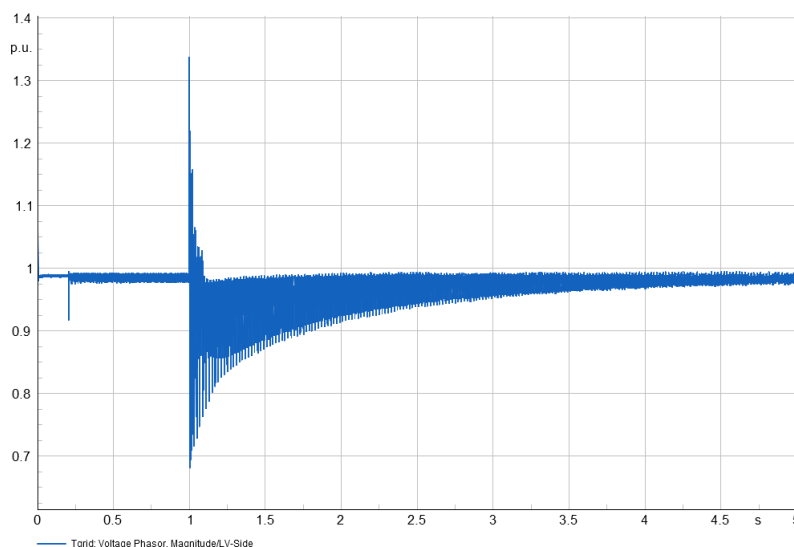
Na slici 4.1.1. u nastavku dat je prikaz mreže sa priključenom solarnom elektranom.



Slika 4.1.1: Model mreže korišćen za simulaciju priključenja solarne elektrane

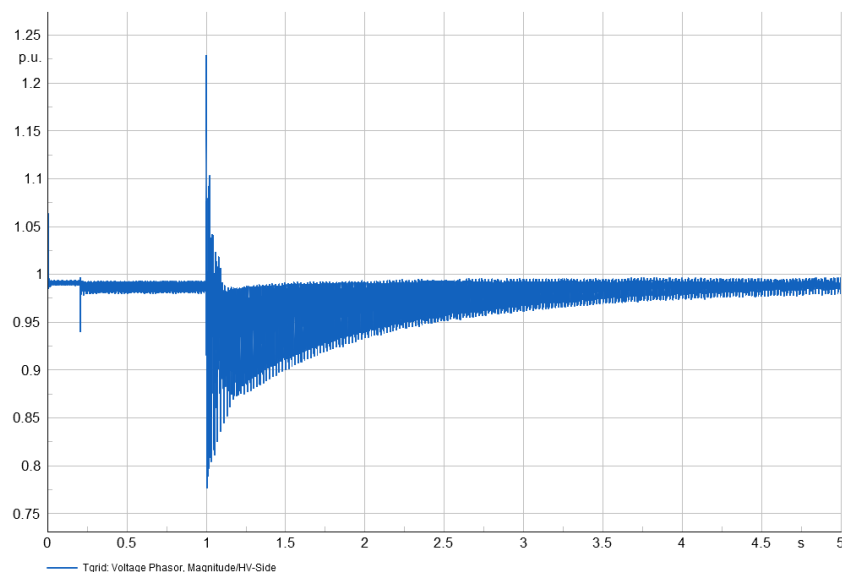
Crvenim krugom je označen prekidač za koji su definisane sklopne operacije. Za ovaj slučaj definisano je vreme uključenja solarne elektrane u sistem od 1s nakon pokretanja EMT simulacije, čije je trajanje podešeno na 5s. Ono što se očekuje kao rezultat simulacije jeste pojava sklopnih prenapona u trenutku od jedne sekunde kada je prekidač uključio elektranu na mrežu.

Napon tokom priključenja solarne elektrane na mrežu prikazan je na slici 4.1.2.



Slika 4.1.2: Efektivna vrednost napona na niženaponskoj strani transformatora *Tgrid*

Može se uočiti da tokom uključenja dolazi do blagog pada napona, nakon čega se javlja sklopni prenapon, čija efektivna vrednost amplitude prelazi vrednost od 1.3 r.j. Ovaj napon kao takav može uticati na opremu u sistemu, pogotovo na prekidačke elemente. Na narednoj slici 4.1.3. može se videti napon na višenaponskoj strani transformatora *Tgrid*.

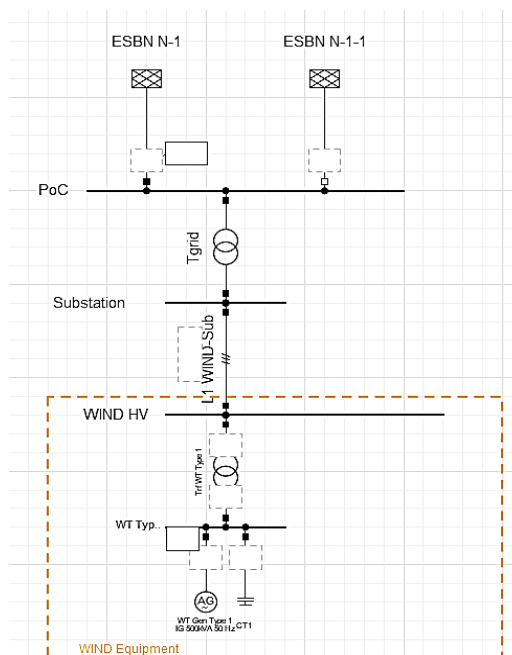


Slika 4.1.3: Efektivna vrednost napona na višenaponskoj strani transformatora *Tgrid*

Nakon tranzijentnog stanja koje je praćeno propadom napona i sklopnim prenaponom dolazi do stabilizacije napona, pri čemu je fluktuacija napona od $\pm 10\%$ dozvoljena nakon integracije solarne elektrane. Da bi se sprečilo oštećenje izolacije implementiranog transformatora poželjno je postaviti metal-oksidne odvodnike prenapona na sabirnicu na niženaponskoj strani transformatora. Zbog prethodno navedenih razloga potrebno je pravilno ispitati kapacitet mreže na koju je potrebno izvršiti integraciju, kao i pouzdanost i stanje opreme. Za ove potrebe je od velike važnosti vršiti pravilan monitoring i dijagnostiku elemenata u mreži. U programu se tokom simulacije mogu menjati vremenski trenuci integracije objekta na mrežu.

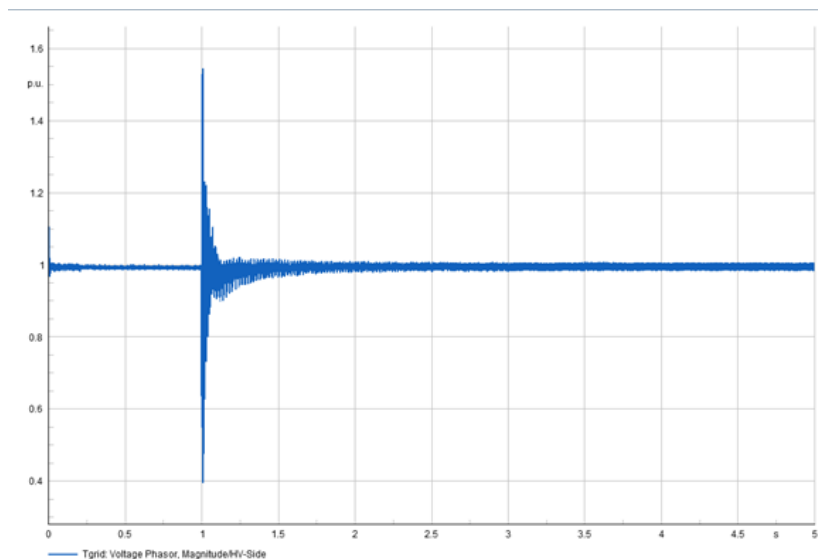
4.2 Integracija vetroelektrane

Na slici 4.2.1 prikazana je mreža sa integrisanom vetroelektranom.

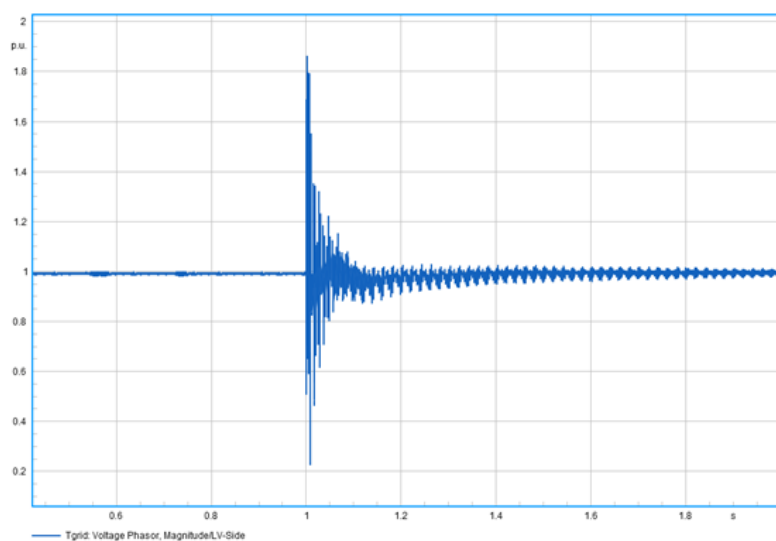


Slika 4.2.1: Integracija vetroelektrane na mrežu

U ovom slučaju definisan je prekidački događaj za vreme uključenja vetroelektrane na mrežu u trenutku od 1s za vreme trajanja EMT simulacije od 5s. Naponske promene u obliku efektivnih vrednosti prikazane su na slikama 4.2.2 i 4.2.3.



Slika 4.2.2. Efektivna vrednost sklopnih prenapona na višenaponskoj strani transformatora *Tgrid*

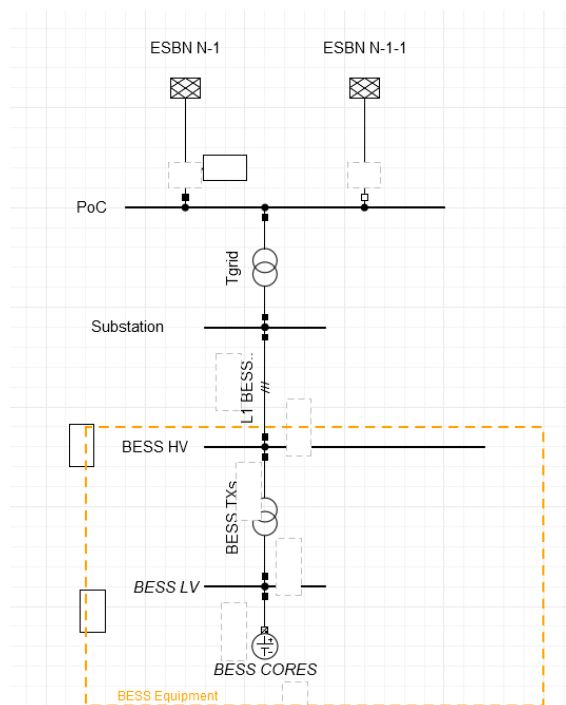


Slika 4.2.3: Efektivna vrednost napona na niženaponskoj strani transformatora *Tgrid*

Može se uočiti da prilikom uključenja vetroelektrane dolazi do pojave prenapona sa efektivnom vrednošću amplitude preko 1.5 r.j. na višenaponskoj strani i preko 1.8 r.j na niženaponskoj strani transformatora *Tgrid*, što može biti veoma opasno po opremu u sistemu. Rešenje može biti instaliranje odvodnika prenapona. Naponska kolebanja su u dozvoljenim granicama od $\pm 10\%$. Prilikom tranzijentnog perioda koji traje veoma kratko nekad i manje od 10 ms zaštita vrlo često ne stigne da odreaguje, upravo zbog toga je vrlo važno pravilno dimenzionisati opremu, tako da izolacija može da izdrži prenapon tokom prelaznog procesa.

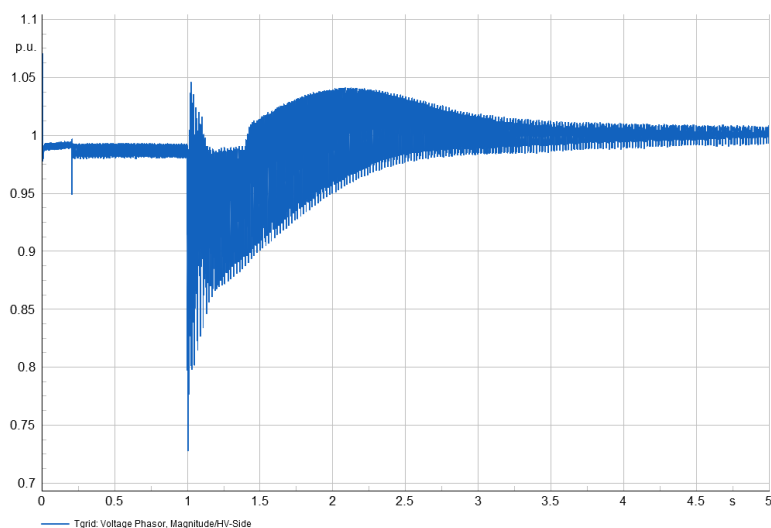
4.3 Integracija baterijskog sistema za skladište električne energije

Naredna slika 4.3.1 prikazuje mrežu sa priključenim baterijskim sistemom za skladište električne energije.



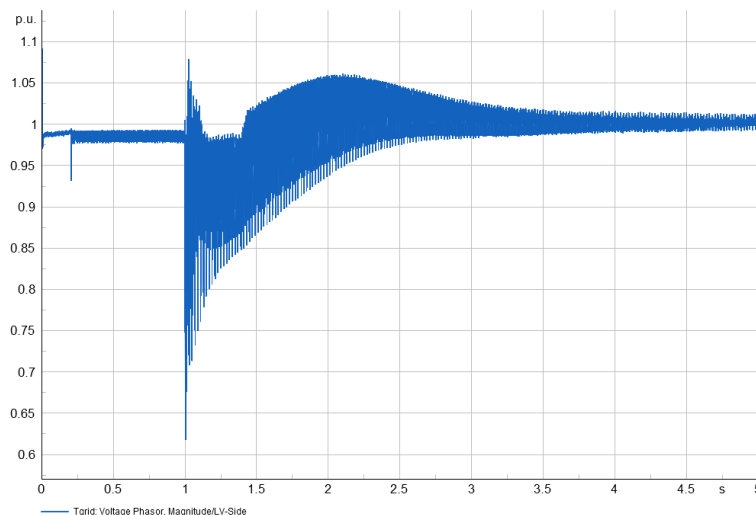
Slika 4.3.1: Integracija baterijskog skladišta električne energije na mrežu

Integracija je vršena na isti način kao i u slučaju vetroelektrane i solarne elektrane da bi se mogla izvršiti kvalitetnija komparativna analiza. Vreme prekidačkog događaja je u skladu sa tim podešeno na 1s, pri čemu je trajanje simulacije podešeno na 5s. Na slici 4.3.2 mogu se videti oblici promene efektivne vrednosti napona na višenaponskoj strani transformatora *Tgrid*.



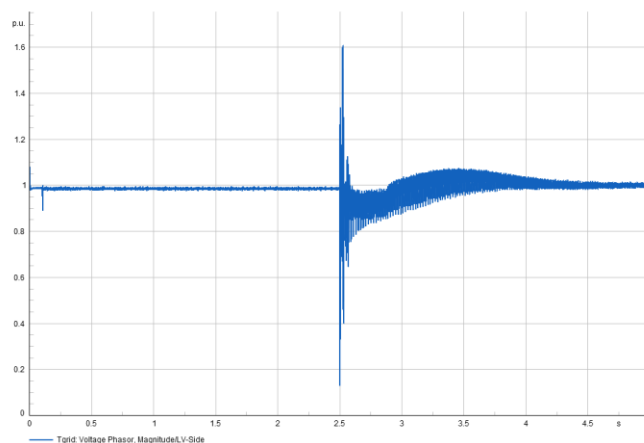
Slika 4.3.2: Promena efektivne vrednosti napona na višenaponskoj strani transformatora *Tgrid*

Naredna slika 4.3.3. prikazuje efektivnu vrednost napona na niženaponskoj strani transformatora *Tgrid*.



Slika 4.3.3: Promena efektivne vrednosti napona na niženaponskoj strani transformatora *Tgrid*

Može se uočiti da je efektivna vrednost prenapona manja od 1,05 r.j. na višenaponskoj strani, dok je na niženaponskoj strani ta vrednost malo niža od 1,1 r.j. Ovi naponi mogu uticati na sistem i opremu zbog kratkog trajanja i naglog skoka u amplitudi, ali je taj uticaj znatno manji u odnosu na obnovljive izvore energije. Propad napona je takođe u ovom slučaju znatno manji, uređaj koji u najvećoj meri kontroliše ovu pojavu jeste kompozitni kontroler. Ukoliko se definiše drugo vreme za prekidačke događaje, konkretno uključanje u trenutku od 2.5s, pri čemu je trajanje EMT simulacije 5s i kao promena uvede izbacivanje dinamičkih elemenata iz upotrebe i povećanje broja jedinica koje formiraju baterijski sistem za skladište energije dobija se grafik efektivne vrednosti napona sa slike 4.3.4.



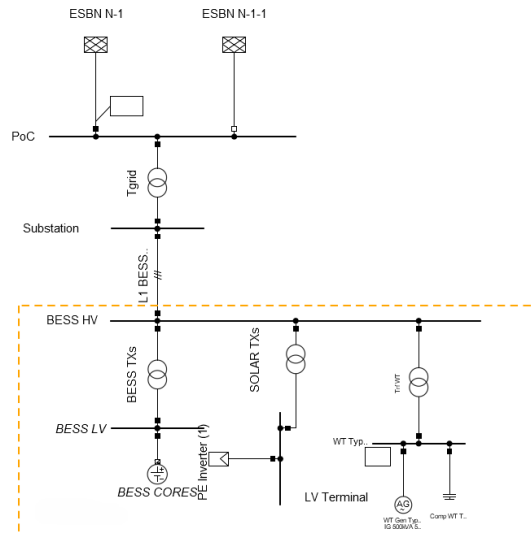
Slika 4.3.4: Integracija BESS-a u trenutku od 2,5 s

Može se primetiti da sa povećanjem opterećenja i isključenjem dinamičkog elementa, vrednost amplitude napona na niskonaponskoj strani transformatora *Tgrid* prelazi vrednost od 1.6 r.j., što predstavlja prenapon. Pored toga, javlja se znatno veći propad napona, koji može uzrokovati kratkotrajne oscilacije u napajanju korisnika. Ili eventualno oštetiti osetljive elemente energetske elektronike. Ova situacija nije poželjna sa stanovišta potrošača i stabilnosti mreže, što govori u prilog tome koliko je korišćenje dinamičkih elemenata poput kontrolera potrebno uvažiti u modelu prilikom simulacije sklopnih prenapona, i ne samo njih već i ostalih parametara pored napona koji mogu uticati na stanje mreže, kao što su promena aktivne i

reaktivne snage, promena frekvencije i tako dalje. U praksi svaki BESS sistem ima u sebi ugrađen kontroler, kao što je objašnjeno u teorijskom delu, upravo sa ciljem da se spreče analizirana naponska variranja.

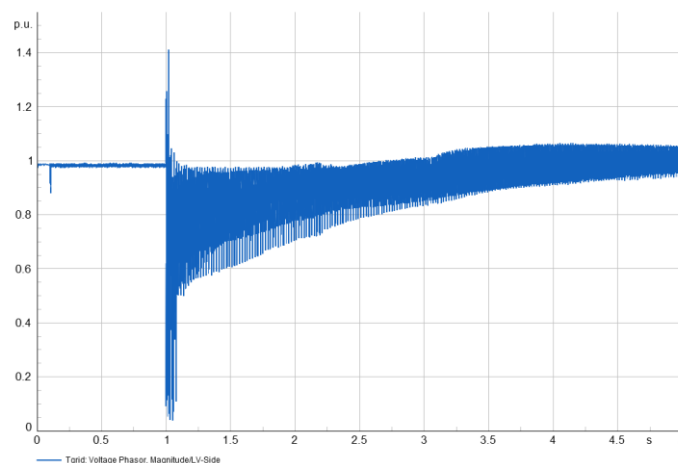
4.4 Istovremena integracija solarne elektrane, vetroelektrane i BESS sistema

Mreža sa svim integrisanim objektima istovremeno data je na slici 4.4.1.

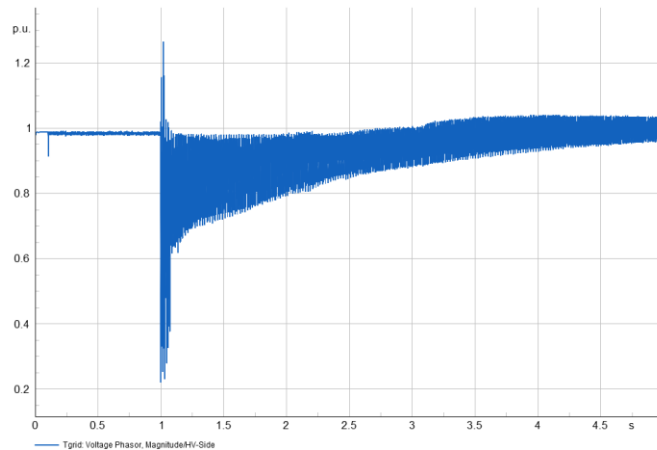


Slika 4.4.1: Model mreže pri integraciji svih analiziranih objekata istovremeno

Prekidač na kome je vršeno definisanje prekidačkih događaja isti je kao u prethodnim slučajevima i definisan je za trenutak od 1s. Generalno, vreme trajanja EMT simulacije može biti bilo koja vrednost, ovde je usvojena vrednost od 5s jer je to dovoljan vremenski interval da se vide sve potrebne promene. U modelu su uključeni kompozitni kontroleri za svaki integrisani objekat. Na narednim slikama 4.4.2 i 4.4.3 mogu se redom videti promene efektivnih vrednosti napona na niženaponskoj strani transformatora i na višenaponskoj strani transformatora.



Slika 4.4.2: Efektivna vrednost napona na NN strani transformatora *Tgrid* prilikom istovremene integracije

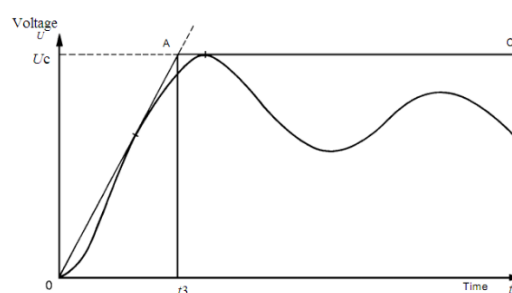


Slika 4.4.3: Efektivna vrednost napona na VN strani transformatora *Tgrid* prilikom istovremene integracije

Vrednost prenapona prelazi 1.1 r.j., što u većini slučajeva može predstavljati opasnost po opremu. Ovim se uočava da zajedničkom integracijom OIE sa BESS sistemom, u većini slučajeva, uslovljava pojavu prenapona. U ovom slučaju može se iskoristiti mogućnost BESS-a da kontroliše napon. Kontrola napona znači da BESS ubacuje ili apsorbira reaktivnu energiju kako bi održao napon mreže unutar određenog raspona.

4.5 Izbor anvelope prekidača pri integraciji BESS-a na mrežu

Prelazni povratni napon za visokonaponske prekidače je napon koji se pojavljuje na terminalima nakon prekida struje. Sadrži period velike brzine rasta, nakon čega sledi kasniji period niže stope rasta. Ovaj talasni oblik je generalno adekvatno predstavljen omotačem koji se sastoji od dva ili tri segmenta linija definisanih pomoću parametara prikazanih na slici 4.5.1. Oblik talasa prelaznog povratnog napona mora biti ispod ili jednak omotaču koji definiše sposobnost prekidača da izdrži promene tokom tranzijentnog stanja. Korišćenjem standarda IEC 62271-100 moguće je odrediti prelazni povratni napon korišćenjem omotača konstruisanog od dve prave prikazanog na slici 4.5.1.

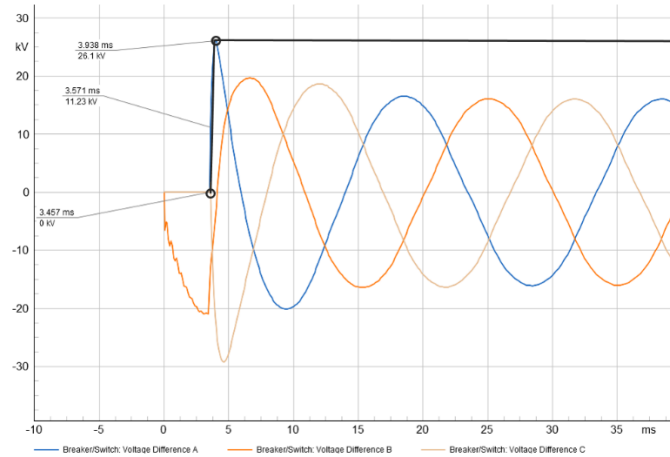


Slika 4.5.1: Definisanje anvelope prekidača

Na slici iznad parametar U_c predstavlja prvi maksimum prelaznog povratnog napona, koji definiše brzinu porasta.

Studijom komutacije napona ispitana je maksimalna vrednost napona [kV] i talasnog nagiba [$kV/\mu s$] na prekidaču od interesa. U datom primeru izbora anvelope prilikom isključenja BESS-a sa mreže, uzimajući u obzir da je za distributivnu mrežu 20 kV nazivni kratkotrajni dozvoljeni napon industrijske frekvencije 50 kV, a nazivni podnosivi atmosferski udarni prenapon 125 kV

u slučaju punog stepena izolacije, može se odrediti koeficijent prelaznog povratnog napona. Tim koeficijentom se definiše anvelopa prekidača koju je sam prekidač u stanju da podnese prilikom otvaranja kontakata i pojave prelaznih procesa, da pritom ne dođe do ponovnog paljenja luka. Na slici 4.5.2. prikazan je izbor anvelope prekidača korišćenog za sklopne operacije.



Slika 4.5.2: Izbor anvelope prekidača pri integraciji BESS sistema

U razmatranom slučaju koeficijent prelaznog povratnog napona iznosi $0.054 [kV/\mu s]$. Ukoliko se dobijena vrednost uporedi sa standardnim vrednostima koeficijenata za distributivnu mrežu navedenim u standardu IEC 62271-100, može se doći do zaključka da prilikom priključenja BESS-a na mrežu 20 kV, posmatrani prekidač uspešno izdržava sva dinamička naprezanja koja se pojavljuju. Pri čemu prelazni povratni napon na prekidaču tokom celog trajanja ostaje unutar definisane anvelope prekidača.

5 ZAKLJUČAK

Ispitivanjem privremenih prenapona pri integraciji OIE i BESS-a za njihove različite kapacitete dobijaju se različite vrednosti sklopnih prenapona. Na osnovu toga potrebno je izvršiti adekvatnu dijagnostiku kapaciteta i opreme mreže planirane za priključenje objekata. Sklopni prenaponi mogu ugroziti opremu, jer zajedno sa padom napona utiču na kvalitet električne energije koja se prenosi mrežom. Ovakve varijacije napona povećavaju rizik stradanja opreme, pre svega izolacije transformatora, kontakata prekidača i slično, zatim smanjuju životni vek opreme i povećava troškove održavanja i monitoringa mreže.

Softverskim alatom *PowerFactory* izvršeno je modelovanje realnog sistema, jer pruža mogućnost definisanja dinamičkih komponenti koje su kao takve u realnom sistemu neizostavne, poput energetske pretvarača, zatim filtera koji umanjuju harmonijske distorzije i odvodnike prenapona koji sprečavaju pojavu sklopnih prenapona koja može uticati na opremu u sistemu. Kontroleri modelovani u programu omogućavaju stabilizaciju napona pri tranzijentnom periodu integracije OIE ili BESS-a na sistem i na taj način omogućavaju simulaciju realnog stanja sistema. Rad daje jasan uvid u proces modelovanja integracije OIE i BESS-a u elektroenergetski sistem sa aspekta sklopnih prenapona.

6 LITERATURA

- [1] Jiahao Zhang, Qiuqin Sun, Zhi Zheng, Lei Huang, Danhua Chen, Jie Yuan: *Lightning surge analysis for hybrid wind turbine-photovoltaic-battery energy storage system*, College of Electrical & Information Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China, 2023
- [2] Sheri Abhishek Reddy, M. Sailaja Kumari : *A review of switching overvoltage modeling in UHV AC transmission lines*, National Institute of Technology Warangal, Warangal, 506004, Telangana, India, 2024
- [3] S.K.E. Awadallah, S. Mohanty, F. Ghassemi : *Transient overvoltage transfer and amplification in a 400 kV network – A case study*, Texas A&M University at Qatar, Doha, Qatar, National Grid plc, Warwick Technology Park, Gallows Hill, Warwick, CV34 6DA, United Kingdom, 2023
- [4] Fady Wadie, *Analysis of the Integrated Effect of Temporary Overvoltages, PV Transformer Connection and Overcurrent Protection in Hybrid PV-Wind Energy System*, Faculty of Engineering, Egyptian Russian University, Badr City, Egypt, 2022
- [5] Oscar Lennerhag, Math H.J. Bollen : *Impact of uncertainties on resonant overvoltages following transformer energization*, Independent Insulation Group, Storgatan 5, Ludvika, 771 30, Sweden, Luleå University of Technology, Skellefteå, 931 87, Sweden, 2020
- [6] Ulas Karaagac, Ilhan Kocar, Jean Mahseredjian, Lijun Cai, Zahid Javid: *STATCOM integration into a DFIG-based wind park for reactive power compensation and its impact on wind park high voltage ride-through capability*, Department of Electrical Engineering, The Hong Kong Polytechnic University, Hong Kong, Department of Electrical Engineering, Polytechnique Montréale, Montréal, Quebec, Canada, Institute for Electrical Power Engineering, University of Rostock, Rostock, Germany, 2021
- [7] Jovan Mikulović, Željko Đurišić: *Solarna Energetika*, Akademska misao Beograd, 2019
- [8] Željko Đurišić, *Vjetroelektrane*, Akademska misao Beograd, 2019
- [9] Drew Lebowitz, Swetha Sundaram, Sean Daly: *the BESS BOOK- A cell to Grid Guide to Utility Scale Battery Energy Storage System*, First edition 2024
- [10] Morteza Zare Oskouei, Behnam Mohammadi-Ivatloo: *Integration of Renewable Energy Sources Into the Power Grid Through PowerFactory*, Springer Nature Switzerland, 2020
- [11] Poul Sorensen, Anca Hansen, Lorand Janosi, John Bech, Birgitte Bark-Jensen : *Simulation of Interaction between Wind Farm and Power System*, Pitney Bowes Management Services Denmark, 2001