

Analiza utjecaja integracije HVDC prijenosa na stabilnost kuta rotora i napona prijenosne mreže

Rastija, Jakov

Master's thesis / Diplomski rad

2024

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:200:324427>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-02-18**

Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE JOSIPA JURJA STROSSMAYERA U OSIJEKU

FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA I

INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA OSIJEK

Sveučilišni diplomski studij

**ANALIZA UTJECAJA INTEGRACIJE HVDC
PRIJENOSA NA STABILNOST KUTA ROTORA I
NAPONA PRIJENOSNE MREŽE**

Diplomski rad

Jakov Rastija

Osijek, 2024.

SADRŽAJ

1. UVOD.....	1
1.1. Zadatak diplomskoga rada	2
2. PREGLED PODRUČJA TEME	3
3. STABILNOST ELEKTROENERGETSKOG SUSTAVA.....	5
3.1. Stabilnost kuta rotora	5
3.1.1. Jednadžba njihanja.....	6
3.1.2. Tranzijentna stabilnost	7
3.1.3. Oscilatorna stabilnost.....	11
3.2. Naponska stabilnost i <i>PV</i> krivulje.....	14
4. VISOKONAPONSKI ISTOSMJERNI PRIJENOS (HVDC PRIJENOS)	17
4.1. Osnovne konfiguracije visokonaponskog istosmjernog prijenosa.....	18
4.2. Rad elektroničkih energetskih pretvarača u HVDC sustavu.....	19
4.2.1. Poluupravljiva strujno jednosmjerna sklopka — energetski tiristor.....	19
4.2.2. Trofazni mosni spoj — ispravljač.....	21
4.2.3. Trofazni mosni spoj u izmjenjivačkom režimu rada	26
4.2.4. Utjecaj komutacijskog induktiviteta na rad HVDC pretvarača	28
4.3. Vođenje i upravljanje HVDC sustavom	31
4.3.1. Ekvivalentna električka mreža HVDC veze.....	31
4.3.2. Rad HVDC LCC sustava integriranog u elektroenergetsku mrežu.....	33
4.3.3. Upravljačke karakteristike pretvarača (usmjerivača)	36
4.3.4. Kvaliteta električne energije i filtriranje višeharmonijskih veličina.....	38
4.3.5. Utjecaj kvarova u mreži na rad HVDC veze.....	39
5. SIMULACIJSKI MODEL HVDC-LCC SUSTAVA U PRIJENOSNOJ MREŽI	41
5.1. IEEE sustav s 39 sabirnica	41
5.1.1. Sinkroni generatori	41
5.1.2. Trošila.....	43

5.2. Selekcija čvorova izvorne mreže prema uvjetima za integraciju HVDC prijenosa	44
5.3. Odabir parametara HVDC veze za simulaciju	46
5.4. Tokovi snaga u mreži	50
5.4.1. Slučaj bez integriranog HVDC sustava — izvorna mreža.....	50
5.4.2. Integriranje HVDC sustava u mrežu.....	53
5.5. Analiza tranzijentne stabilnosti sustava	57
5.5.1. Trofazni kratki spoj	57
5.5.2. Tranzijentna stabilnost izvornog sustava.....	59
5.5.3. Tranzijentna stabilnost sustava s integriranim HVDC sustavom.....	66
5.6. Analiza oscilatorne stabilnosti sustava	74
5.6.1. Utjecaj HVDC sustava na pokazatelje <i>s</i> -domene.....	75
5.6.2. Utjecaj HVDC sustava na pokazatelje <i>t</i> -domene	77
5.7. Analiza pokazatelja naponske stabilnosti. <i>PV</i> krivulje.....	81
6. ZAKLJUČAK.....	86
LITERATURA	89
SAŽETAK	91
ABSTRACT	92
ŽIVOTOPIS	93
POPIS SLIKA I TABLICA.....	94
Popis slika	94
Popis tablica.....	97

1. UVOD

Elektroenergetski sustav (EES) smatran je kao najsloženiji i najneophodniji tehnički sustav kojeg je načinio čovjek. Njegova osnovna zadaća je opskrba električnom energijom na kvalitetan, pouzdan i siguran način, a sastoji se od električke mreže koja povezuje proizvodne jedinice s potrošačima. Elektroenergetska mreža se prema naponskom kriteriju dijeli na prijenosnu i distribucijsku mrežu; u Republici Hrvatskoj naponske razine 400 kV, 220 kV i 110 kV pripadaju prijenosnoj mreži, dok 35 kV, 20 kV, 10 kV i 0,4 kV pripadaju distribucijskoj mreži.

Stabilnost se općenito kao inženjerska disciplina bavi izučavanjem dinamike sustava pod utjecajima poremećaja — tako da se stabilnost EES-a može definirati kao njegova sposobnost da se, uz određeno početno stanje, nakon fizičkog poremećaja vrati u ravnotežno stanje. Poremećaji u EES-u mogu biti mali ili veliki — mali poremećaji podrazumijevaju konstantno i neizbježno mijenjanje opterećenja kojemu se sustav kontinuirano prilagođava, a u veće poremećaje ubrajaju se značajna nepoželjna pogonska stanja (kvarovi) kao što su kratki spojevi na dalekovodima ili nagli ispadi većih generatora ili potrošača. Prema klasičnoj podjeli stabilnosti EES-a navodi se stabilnost frekvencije, stabilnost napona te stabilnost kuta rotora.

Osnovna zakonitost elektroenergetskog sustava jest održavanje ravnoteže između proizvodnje i potrošnje električne energije. Neravnoteža u sustavu, odnosno narušenost ove zakonitosti, indikator je da je sustav pod utjecajem poremećaja. S obzirom na to da se u elektroenergetskom sustavu i dalje u najvećoj mjeri za proizvodnju električne energije oslanja na sinkrone generatore, nužan uvjet za održavanje stabilnosti sustava je da su svi povezani generatori sustava u sinkronizmu. U slučaju većeg tranzijentnog poremećaja doći će do elektromehaničkih oscilacija — takozvanih njihanja kuta rotora sveprisutnih u elektroenergetskom sustavu — tijekom kojih je, zbog njihove jačine, moguć ispad generatora iz sustava. Kada sinkroni generator izgubi sinkronizam s ostatkom sustava, rotor mu se okreće brzinom koja nije adekvatna za održavanje napona pri nominalnoj frekvenciji sustava. Nestabilnost sustava može se očitovati i nedozvoljenim naponima sabirnica; kada je sustav izložen poremećaju može doći do progresivnih i dugotrajnih padova napona, a najčešći uzrok je nemogućnost isporuke jalove snage dostatne za održavanje napona.

Visokonaponski istosmjerni prijenos ili HVDC¹ prijenos ima određene prednosti u odnosu na konvencionalni izmjenični (AC) prijenos u specijalnim primjenama kao što je podvodna kabela veza, asinkrona veza između dva sustava različitih nominalnih frekvencija te prijenos velike količine snage (stotine megavata) na duge udaljenosti. Integracijom HVDC veze mijenja se topologija dijela elektroenergetske mreže, odnosno početno stacionarno stanje promatranog sustava, što se može manifestirati na aspekte stabilnosti.

1.1. Zadatak diplomskoga rada

U diplomskom radu potrebno je napraviti teorijski pregled i analizu klasičnog (konvencionalnog) LCC² tipa HVDC veze koja se zasniva na radu tiristorskih pretvarača energetske elektronike te pružiti matematičku podlogu i model za analizu stabilnosti EES-a s naglaskom na tranzijentnu stabilnost i stabilnost napona u prijenosnoj mreži; uz to izložiti koncept utjecaja integracije LCC-HVDC prijenosa na stanje sustava, a prvenstveno na pokazatelje njegove stabilnosti.

Za praktični dio diplomskog rada korišten je programski paket *DIgSILENT PowerFactory*. Nakon modeliranja LCC-HVDC veze u simulacijskom sučelju potrebno je u pojednostavljenom modelu stvarne visokonaponske prijenosne mreže provesti analizu stabilnosti prije i nakon integracije HVDC veze za prijenos snage te usporediti i obrazložiti dobivene rezultate.

¹ Kratica od *High-voltage direct current*

² Kratica od *Line-commutated converter* — mrežom komutirani pretvarač

2. PREGLED PODRUČJA TEME

Razvojem suvremenih metoda računalne primjene numeričkih proračuna, inženjerima je olakšano analiziranje dinamičkog ponašanja elektroenergetskog sustava. Stabilnost, kao ključna disciplina u planiranju te vođenju i upravljanju pogonom elektroenergetske mreže, zahtjeva detaljnu evaluaciju dinamike sustava već u fazi projektiranja. Cilj ovog rada je primjenom znanja iz područja stabilnosti EES-a i energetske elektronike napraviti sintezu HVDC sustava integriranog u prijenosnu mrežu te se osvrnuti na pokazatelje stabilnosti sustava i obrazložiti dobivene rezultate i dinamičke reakcije sustava.

Temeljna znanja iz stabilnosti i vođenja elektroenergetskog sustava obuhvaćena su u knjigama [1], [2], koje su standardna referenca u međunarodnoj zajednici inženjera i znanstvenika. U navedenim knjigama pruženo je opširno teorijsko znanje zasnovano na matematičkim modelima elemenata EES-a te na matematičkom modelu stabilnosti kao grane dinamike (nelinearnih) sustava.

Literatura [3] i [4] detaljno se bavi općenitom energetskom elektronikom. Autori tih djela pružaju podlogu za razumijevanje rada stvarnih elektroničkih naprava i njihovih pripadajućih modela te elektroničkih energetskih pretvarača kao uređaja sastavljenih od većeg broja poluvodičkih i reaktivnih komponenti. Dobro razumijevanje ovog gradiva ključno je za sintezu HVDC sustava i analizu njegove performanse. Knjiga [5] posebno se bavi energetskom elektronikom primijenjenom u visokonaponskom istosmjernom prijenosu te je ona primarni izvor fizikalnog opisa rada i upravljanja HVDC sustavom koji je integriran u prijenosnu elektroenergetsku mrežu. Navedene tri knjige ne stavljaju naglasak na računalne simulacije elektroničkih pretvarača i HVDC sustava u EES-u te su stoga u ovom radu korištene samo kao teorijska fundacija za planiranu integraciju HVDC sustava u prijenosnu mrežu.

Osim istaknutih knjiga, kao značajna literatura koja je doprinijela izradi diplomskog rada je *DIGSILENT*-ov korisnički priručnik [6] i tehničke reference [7], [8]. U toj dokumentaciji pružene su upute za korištenje softvera i, ono što je uže vezano uz tematiku ovog rada, modeliranje HVDC sustava LCC tipa u simulacijskom sučelju.

Međunarodni standardi [9], [10] daju smjernice za planiranje i dizajn DC veze te pružaju materijale za rad HVDC sustava u stacionarnom stanju i opis pokazatelja zadovoljavajuće projektiranog HVDC sustava. Navedeni standardi te istaknuti konferencijski rad [11] o testnom HVDC sustavu kao interkonekciji dvije krute mreže različitih nominalnih napona obrađuju svu

tematiku koja je potrebna za uspješnu implementaciju simulacijskog modela HVDC sustava te provođenje simulacijskih proračuna elektroenergetske mreže s integriranim HVDC-om.

3. STABILNOST ELEKTROENERGETSKOG SUSTAVA

Elektroenergetski sustav sastoji se od velikog broja komponenti koje su međusobno povezane i u interakciji, čineći veliki dinamički sustav nelinearnog karaktera. Od primarnog je interesa kako će tako umrežen sustav reagirati na kontinuirane male poremećaje, ali i na veće poremećaje kao što su kratki spojevi. Stabilnost elektroenergetskog sustava se općenito definira kao njegova sposobnost uspostave ravnotežnog stanja nakon izloženosti poremećaju. Tri fizikalne veličine su ključne pri analizi stabilnosti elektroenergetskog sustava: kut rotora (δ), frekvencija (f) i napon (U). Prema tim veličinama se stabilnost klasificira u tri kategorije: stabilnost kuta rotora, stabilnost frekvencije i stabilnost napona [2].

3.1. Stabilnost kuta rotora

Stabilnost kuta rotora bavi se elektromehaničkim oscilacijama koje su inherentne za sustav povezanih sinkronih generatora. Kod takvih sustava, struje i naponi statora svakog generatora moraju biti takvi da se svi generatori okreću sinkronom brzinom, tj. da su u sinkronizmu. Stabilnost kuta rotora je, dakle, svojstvo povezanih sinkronih generatora u sustava da ostanu u sinkronizmu. Načelo održavanja usklađenog stabilnog rada jest uravnotežavanje sila nastalih kao posljedice poremećaja, koje djeluju tako da ubrzavaju ili usporavaju rotor pojedinog generatora u odnosu na ostale generatore u sustavu. U stabilnom ustaljenom stanju, za svaki generator su mehanički i električni moment u ravnoteži te je prema tome kutna brzina svih generatora konstantna. Kada je sustav eksponiran poremećaju, ishod proizlaznog disbalansa je izgubljena točka ravnoteže, što se očituje akceleracijom ili deceleracijom rotora. Stabilnost kuta rotora može se podijeliti u dvije kategorije, ovisno o jačini poremećaja kojem je sustav izložen: postoji tranzijentna stabilnost (*Transient Stability*) i oscilatorna stabilnost (*Small-Signal Stability*). U tranzijentnoj stabilnosti se proučava utjecaj velikih poremećaja na stabilnost kuta rotora, dok se u oscilatornoj stabilnosti proučava utjecaj malih poremećaja. Pri velikim poremećajima se veličine stanja mijenjaju u tolikoj mjeri da linearizacija sustava nije opravdana, dok se kod oscilatorne stabilnosti razmatraju upravo takvi poremećaji za koje se sustav može linearizirati.

3.1.1. Jednadžba njihanja

Na rotor generatora djeluju dva zakretna momenta³: mehanički moment (T_m) kojeg uzrokuje protok radnog medija (para, plin ili voda) na turbinu generatora te električni moment (T_e) kojeg uzrokuje izlazna električna snaga generatora povezanog na elektroenergetski sustav. Newtonov drugi zakon za rotirajuće kruto tijelo — vratilo rotora generatora — glasi: [1]

$$J \frac{d\omega_m}{dt} = T_m - T_e . \quad (3-1)$$

Gdje je J moment tromosti rotirajuće mase u $\text{kg}\cdot\text{m}^2$, a ω_m mehanička kutna brzina rotora u rad/s . Za opis tromosti generatora, uvodi se inercijska konstanta H koja je definirana kao [1]

$$H = \frac{1}{2} \frac{J \omega_{m,s}}{S_n} \left[\frac{\text{MW}\cdot\text{s}}{\text{MVA}} = \text{s} \right] . \quad (3-2)$$

Uvrštavanjem izraza (3-2) u (3-1) te normaliziranjem u *per-unit* sustav dobije se:

$$2H \frac{d\omega_r \text{ pu}}{dt} = T_{m \text{ pu}} - T_{e \text{ pu}} . \quad (3-3)$$

U gornjoj jednadžbi su $T_{m \text{ pu}}$ i $T_{e \text{ pu}}$ mehanički i električni moment u *per-unit* sustavu u kojem je bazna vrijednost $T_B = S_n / \omega_{m,s}$, a $\omega_r \text{ pu}$ kutna brzina rotora u *per-unit* sustavu dana izrazom

$$\omega_r \text{ pu} = \frac{\omega_m}{\omega_{m,s}} = \frac{\omega_r}{\omega_{r,s}} \quad (3-4)$$

u kojem je ω_r brzina rotora u električnim rad/s , a $\omega_{r,s}$ njezina sinkrona vrijednost. Kut rotora (δ) definira se kao kutni položaj rotora u el. rad. u odnosu na sinkrono rotirajuću referentnu os, uz početni uvjet δ_0 u trenutku $t = 0$:

$$\delta = (\Delta\omega_r)t + \delta_0 = (\omega_r - \omega_{r,s})t + \delta_0 . \quad (3-5)$$

Uzimanjem druge vremenske derivacije kuta rotora i uvrštavanjem u izraz (3-3), dobije se konačna jednadžba njihanja rotora:

$$\frac{2H}{\omega_{r,s}} \frac{d^2\delta}{dt^2} = T_{m \text{ pu}} - T_{e \text{ pu}} . \quad (3-6)$$

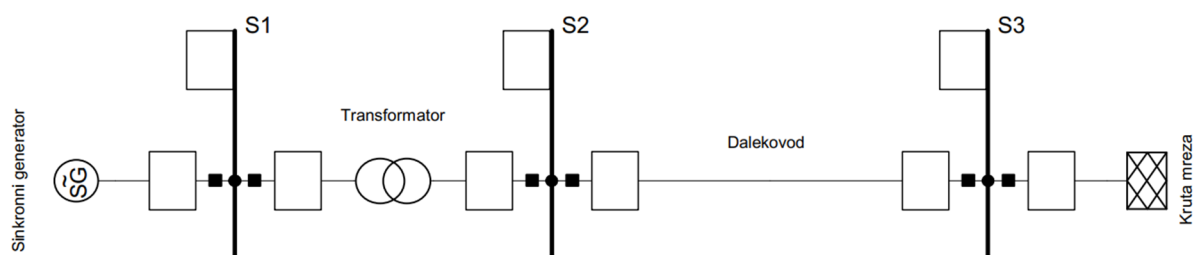
³ Mjerna jedinica za zakretni moment sile je njutn-metar (N·m)

Iz jednadžbe (3-6), a i (3-5) vidi se da pri promjeni električnog momenta na vratilo rotora dolazi do kutne akceleracije, odnosno do porasta ili pada kuta rotora, na što je potrebno reagirati kako bi se očuvala kutna stabilnost.

3.1.2. Tranzijentna stabilnost

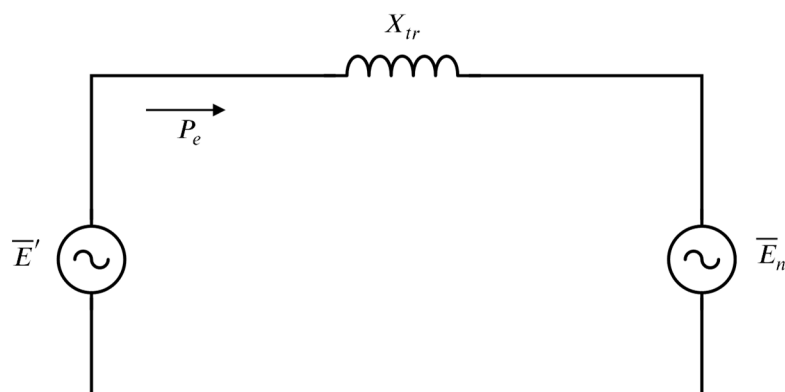
Elementarni model za tranzijentnu stabilnost

Za jednostavnu analizu tranzijentne stabilnosti koristi se klasičan pojednostavljen model sinkronog generatora spojenog na ostatak elektroenergetskog sustava. U jednofaznom prikazu, električna mreža sinkronog generatora je serijski spoj naponskog izvora tranzijentnog napona E' i tranzijentne reaktancije X'_d ,⁴ a ostatak elektroenergetskog sustava modeliran je kao mreža krutog napona i frekvencije.



Slika 3.1: Jednopolni prikaz sustava za proučavanje tranzijentne stabilnosti

Ekvivalentna jednofazna shema sustava sa **Slike 3.1**, gdje je sinkroni generator posredstvom transformatora i voda priključen na krutu mrežu, nalazi se na **Slici 3.2**.



Slika 3.2: Jednofazna mreža sustava za proučavanje tranzijentne stabilnosti

⁴ Najčešće se uzima tranzijentni interval zbog vrlo kratkog trajanja subtranzijentnog intervala [2]

Transforna reaktancija (X_{tr}) na **Slici 3.2** nadomješta serijski spoj reaktancije generatora (X'_d), transformatora (X_T) i dalekovoda (X_{DV}), a fazori faznih napona generatora i mreže na istoj slici su:

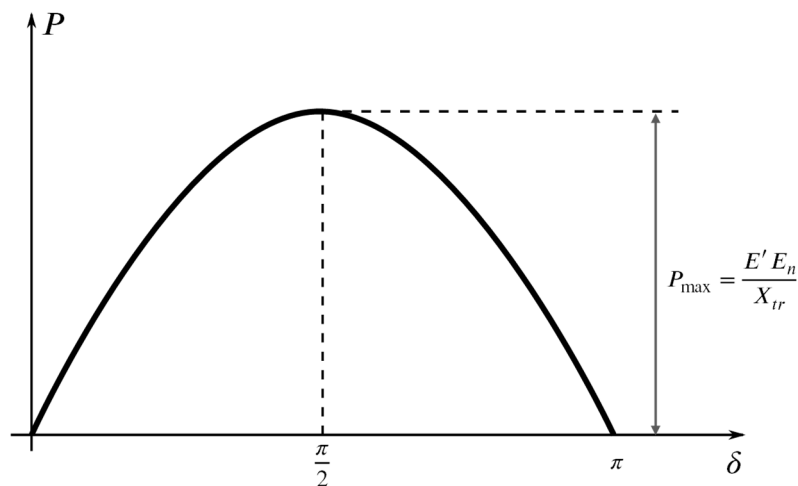
$$\overline{E}' = E' \angle \delta \quad (3-7)$$

$$\overline{E}_n = E_n \angle 0 \quad (3-8)$$

Prema literaturi [1], može se izvesti izlazna električna snaga generatora za ovaj jednostavan slučaj:

$$P_e = \frac{E' E_n}{X_{tr}} \sin(\delta) = P_{\max} \sin(\delta). \quad (3-9)$$

Grafički se ova jednadžba može prikazati kao sinusni poluval vršne vrijednosti P_{\max} , kao što je i ilustrirano **Slikom 3.3**.



Slika 3.3: Grafički prikaz ovisnosti snaga-kut

Jednadžba njihanja (3-6) može se, uz formulu (3-9), zapisati i u sljedećem obliku:

$$\frac{2H}{\omega_{r,s}} \frac{d^2 \delta}{dt^2} = P_m - P_e = P_m - P_{\max} \sin(\delta). \quad (3-10)$$

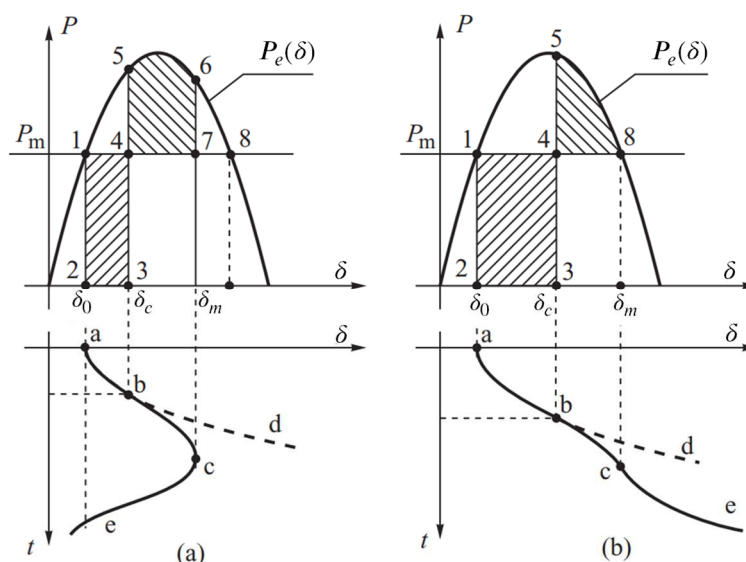
Kriterij stabilnosti nalaže da za svaki ograničeni poticaj i odziv mora biti ograničen (*BIBO*⁵ definicija stabilnog sustava) — to podrazumijeva da njihanje kuta δ , koje nastaje kao posljedica poremećaja na sustav, mora biti ograničenog raspona, odnosno postoji kritičan kut čišćenja $\delta_{c,cr}$ koji predstavlja kutnu marginu stabilnosti. Da bi se očuvala stabilnost kuta rotora, neto prirast kinetičke energije rotora mora biti negativan ili jednak nuli (granični slučaj) — na taj način je osiguran odziv u kojem su oscilacije iščezavajuće, a ne raspirujuće. Prirast kinetičke energije, induciran za vrijeme trajanja kvara (kinetička energija ubrzanja), dan je izrazom

$$KE_u = \int_{\delta_0}^{\delta_c} (P_m - P_e) d\delta, \quad (3-11)$$

a gubitak kinetičke energije ili kinetička energija kočenja

$$KE_k = \int_{\delta_c}^{\delta_m} (P_e - P_m) d\delta. \quad (3-12)$$

Na P - δ krivulji, integrali (3-11) i (3-12) su, u skladu s definicijom određenog integrala, površine određene kutovima δ_0 i δ_c (površina ubrzanja — A_u) te δ_c i δ_m (površina kočenja — A_k). Uzevši to u obzir, može se formirati kriterij stabilnosti koji nalaže da je sustav stabilan onda kada vrijedi da je površina ubrzanja manja ili jednaka površini kočenja, gdje je od ključne važnosti promatrati granični slučaj kada je $A_u = A_k$.



Slika 3.4: Prikaz površina ubrzanja i kočenja [2]:

- (a) stabilan slučaj. $A_u = A_{1234}$, $A_k = A_{4567}$, $A_u < A_k \implies t_c < t_{c,cr}$;
- (b) nestabilan slučaj. $A_u = A_{1234}$, $A_k = A_{458}$, $A_u > A_k \implies t_c > t_{c,cr}$

⁵ Bounded-input, bounded-output

Analizirajući granični slučaj, dobije se kritičan kut čišćenja $\delta_{c,cr}$, a iz njega se određuje kritično vrijeme čišćenja $t_{c,cr}$, koje se drži kao najvažniji parametar pri analizi stabilnosti i podešenju sustava zaštite mreže. Naime, sustav će ostati stabilan ako kvar traje manje od kritičnog vremena ili ako sustav zaštite izolira elemente pod utjecajem kvara za vrijeme kraće od kritičnog vremena. Na **Slici 3.4** smatrano je da je mehanička snaga P_m konstantna za vrijeme promatranja sustava zbog tromosti reakcije primarnog regulatora. Prikazana su dva slučaja: u slučaju (a) je sustav stabilan jer je površina kočenja veća od površine ubrzanja, odnosno vrijeme čišćenja je manje od kritičnog vremena; u slučaju (b) sustav je nestabilan jer je površina ubrzanja veća od površine kočenja, što znači da je vrijeme čišćenja veće od kritičnog. U prikazu nestabilnog slučaja, vidljivo je na δ - t krivulji kako kut progresivno raste, što u konačnici rezultira ispadom generatora iz sinkronizma.

Praktični modeli elektroenergetskih mreža znatno su složeniji od elementarnog slučaja, a naročito važno obilježje je da se u sustavima koje treba u praksi analizirati nalazi više od jednog generatora. Uz to je za analizu tranzijentne stabilnosti potreban detaljan matematički model svih generatora i njihove pripadajuće opreme, a i ostatka mreže. Najpreciznija i suvremena metoda analize tranzijentne stabilnosti u vremenskoj domeni je računalna simulacija gdje se sustavi nelinearnih diferencijalnih jednadžbi rješavaju numeričkim postupcima.

Matematički model za postupak numeričkog rješavanja

Diferencijalne jednadžbe kojima se, za potrebe studija stabilnosti, opisuje elektroenergetski sustav su obične nelinearne diferencijalne jednadžbe. Vektorski zapis za sustav od n takvih jednadžbi u euklidskom prostoru je:

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{f}(\mathbf{x}) . \quad (3-13)$$

Gdje je \mathbf{x} notacija za vektor stanja n nezavisnih varijabli sustava, a \mathbf{f} vektorska funkcija pomoću koje je uspostavljena veza između $\dot{\mathbf{x}}$ i \mathbf{x} , te je uz to poznat početni uvjet $\mathbf{x}_0 = \mathbf{x}(t_0)$. Metode koje su najčešće implementirane su izravna Eulerova i Runge-Kuta (R-K) metode numeričke integracije. Obje metode detaljno su opisane u istaknutoj literaturi iz područja stabilnosti [1], [2]; iz tog razloga će u ovom radu biti samo ukratko izložen princip korištenja modificirane Eulerove metode prema čijim načelima računala provode postupak simulacije.

Unaprijeđena Eulerova metoda sastoji se od dva koraka: za i -ti vremenski korak računa se pretpostavljena te korigirana vrijednost vektora stanja \mathbf{x}_i .

- 1) Pretpostavljena vrijednost. Iz poznate vrijednosti \mathbf{x}_{i-1} aproksimira se vrijednost i -tog koraka:

$$\mathbf{x}_i^p = \mathbf{x}_{i-1} + \left. \frac{d\mathbf{x}}{dt} \right|_{\mathbf{x}=\mathbf{x}_{i-1}} \cdot \Delta t \quad (3-14)$$

- 2) Korigirana vrijednost. Koristi se srednja vrijednost nagiba tangente za i -ti korak:

$$\mathbf{x}_i^k = \mathbf{x}_{i-1} + \frac{1}{2} \left(\left. \frac{d\mathbf{x}}{dt} \right|_{\mathbf{x}=\mathbf{x}_{i-1}} + \left. \frac{d\mathbf{x}}{dt} \right|_{\mathbf{x}=\mathbf{x}_i^p} \right) \cdot \Delta t \quad (3-15)$$

Budući da je kut rotora varijabla od interesa, može se zapisati da je

$$\delta_i^p = \delta_{i-1} + \left. \frac{d\delta}{dt} \right|_{\delta=\delta_{i-1}} \cdot \Delta t \quad (3-16)$$

$$\delta_i^k = \delta_{i-1} + \frac{1}{2} \left(\left. \frac{d\delta}{dt} \right|_{\delta=\delta_{i-1}} + \left. \frac{d\delta}{dt} \right|_{\delta=\delta_i^p} \right) \cdot \Delta t, \quad (3-17)$$

gdje se prema relaciji (3-5) derivacija $\left. \frac{d\delta}{dt} \right|_{\delta=\delta_{i-1}}$ za i -ti korak može izračunati kao:

$$\left. \frac{d\delta}{dt} \right|_{\delta=\delta_{i-1}} = \omega_i^p - \omega_{r,s}. \quad (3-18)$$

Postupak započinje u trenutku $t = 0$ za koji su već izračunate početne vrijednosti u ustaljenom stanju, a završava u specificiranom trenutku (vrijeme trajanja simulacije) $t = T$. Broj uzoraka (vremenskih koraka) je prema navedenom $N = T/\Delta t$.

3.1.3. Oscilatorna stabilnost

Temeljna polazna pretpostavka vezana uz oscilatornu stabilnost EES-a jest da su poremećaji koji se proučavaju smatrani dovoljno slabima, tako da je opravdana linearizacija diferencijalnih jednadžbi sustava u okolini stacionarne radne točke. Za potrebe oscilatorne stabilnosti, sustav se opisuje pomoću vektorskog zapisa:

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{f}(\mathbf{x}, \mathbf{u}), \quad (3-19)$$

gdje je \mathbf{x} vektor stanja sustava, a \mathbf{u} vektor inputa sustava:

$$\begin{aligned}\mathbf{x} &= [x_1 \quad x_2 \quad \dots \quad x_n]^T \\ \mathbf{u} &= [u_1 \quad u_2 \quad \dots \quad u_m]^T.\end{aligned}\quad (3-20)$$

Izlaznom jednađbom povezane su izlazne veličine sustava (vektor $\mathbf{y} = [y_1 \quad y_2 \quad \dots \quad y_l]^T$) s varijablama stanja i inputa:

$$\mathbf{y} = \mathbf{g}(\mathbf{x}, \mathbf{u}). \quad (3-21)$$

Stacionarnom radnom točkom je po definiciji opisano ravnotežno stanje sustava koje se gleda kao polazište analize, što nalaže da je

$$\dot{\mathbf{x}}_0 = \mathbf{f}(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0) = \mathbf{0}. \quad (3-22)$$

Uvođenje malog poremećaja u sustav upućuje na malu devijaciju od ravnotežne točke:

$$\begin{aligned}\mathbf{x} &= \mathbf{x}_0 + \Delta\mathbf{x} \\ \mathbf{u} &= \mathbf{u}_0 + \Delta\mathbf{u}.\end{aligned}\quad (3-23)$$

Jednađba stanja uz uvedeno odstupanje od radne točke sada glasi

$$\dot{\mathbf{x}} = \underbrace{\dot{\mathbf{x}}_0}_{\mathbf{0}} + \Delta\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{f}((\mathbf{x}_0 + \Delta\mathbf{x}), (\mathbf{u}_0 + \Delta\mathbf{u})). \quad (3-24)$$

Razvojem u Taylorov red, uz odbacivanje svih viših potencija, dobije se linearizirani sustav:

$$\begin{aligned}\Delta\dot{\mathbf{x}} &= \mathbf{A}\Delta\mathbf{x} + \mathbf{B}\Delta\mathbf{u} \\ \Delta\mathbf{y} &= \mathbf{C}\Delta\mathbf{x} + \mathbf{D}\Delta\mathbf{u}.\end{aligned}\quad (3-25)$$

Matrice parcijalnih derivacija A, B, C i D su izvedene kao:

$$\begin{aligned}\mathbf{A} &= \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x_1} & \dots & \frac{\partial f_1}{\partial x_n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial f_n}{\partial x_1} & \dots & \frac{\partial f_n}{\partial x_n} \end{bmatrix} & \mathbf{B} &= \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial u_1} & \dots & \frac{\partial f_1}{\partial u_m} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial f_n}{\partial u_1} & \dots & \frac{\partial f_n}{\partial u_m} \end{bmatrix} \\ \mathbf{C} &= \begin{bmatrix} \frac{\partial g_1}{\partial x_1} & \dots & \frac{\partial g_1}{\partial x_n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial g_l}{\partial x_1} & \dots & \frac{\partial g_l}{\partial x_n} \end{bmatrix} & \mathbf{D} &= \begin{bmatrix} \frac{\partial g_1}{\partial u_1} & \dots & \frac{\partial g_1}{\partial u_m} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial g_l}{\partial u_1} & \dots & \frac{\partial g_l}{\partial u_m} \end{bmatrix}\end{aligned}\quad (3-26)$$

Kako bi se dobili polovi sustava u s -domeni, primjenjuje se Laplaceova transformacija na sustav (3-25), iz čega se algebarskom manipulacijom dobije karakteristična jednađba

$$\det(\mathbf{A} - \lambda \mathbf{I}) = 0 \quad (3-27)$$

čiji su korijeni svojstvene vrijednosti matrice \mathbf{A} . Općenito rješenje svojstvene vrijednosti je

$$\lambda = \sigma \pm j\omega, \quad (3-28)$$

gdje je σ konstanta prigušenja u Neperima po sekundi (Np/s), a ω kutna frekvencija moda u radijanima po sekundi (rad/s). Oscilatorni mod je prirodni odziv sustava na mali poremećaj te se njegova jednadžba u vremenskoj domeni, koja odgovara svojstvenoj vrijednosti λ , dobije inverznom Laplaceovom transformacijom:

$$y(t) = e^{\sigma t} \sin(\omega t + \theta) \quad (3-29)$$

Prema Ljapunovljevom prvom postulatu iz stabilnosti, nelinearan sustav je stabilan u točki \mathbf{x}_0 ako je linearizirani model sustava stabilan, što vrijedi kada je realni dio svake od svojstvenih vrijednosti manji od nule — a to je slučaj vladanja sustava iščezavajuće oscilatorne prirode. Ukupni prirodni odziv linearnog vremenski invarijantnog sustava dobije se superponiranjem svih modova.

Matematički model za simulaciju modalne analize

U karakterističnoj matricnoj jednadžbi

$$\mathbf{A}\boldsymbol{\phi}_i = \lambda_i \boldsymbol{\phi}_i \quad (3-30)$$

vrijedi da je skalar λ_i i -ta svojstvena vrijednost kvadratne matrice \mathbf{A} , a vektor-stupac $\boldsymbol{\phi}_i \neq \mathbf{0}$ dimenzije $n \times 1$ desni svojstveni vektor matrice \mathbf{A} [12]. Na sličan način definiran je i lijevi svojstveni vektor — vektor-redak $\boldsymbol{\psi}_i$ dimenzije $1 \times n$ [12]:

$$\boldsymbol{\psi}_i \mathbf{A} = \lambda_i \boldsymbol{\psi}_i \quad (3-31)$$

te su lijevi i desni i -ti svojstveni vektor normirani tako da vrijedi da je njihov produkt jednak jedinici. Pri postavljanju sustava za modalnu analizu, korištene su, uz vektore $\boldsymbol{\phi}_i$ i $\boldsymbol{\psi}_i$, i sljedeće matrice:

$$\boldsymbol{\Lambda} = \text{diag} (\lambda_1, \dots, \lambda_n) \quad (3-32)$$

$$\Phi = [\phi_1 \quad \dots \quad \phi_n] \quad (3-33)$$

$$\Psi = [\psi_1^T \quad \dots \quad \psi_n^T]^T \quad (3-34)$$

Λ je dijagonalna matrica svojstvenih vrijednosti, a Φ i Ψ su matrice desnih i lijevih svojstvenih vektora. Iz svojstva da je $\Lambda = \Phi^{-1} \mathbf{A} \Phi$ te uvođenjem pomoćne varijable $\mathbf{z} = \Phi^{-1} \Delta \mathbf{x}$ može se dobiti izraz za reakciju dinamičkog sustava, odnosno za promjenu vektora stanja [1], [6]:

$$\Delta \mathbf{x} = \sum_{i=1}^N c_i \phi_i e^{\lambda_i t} \quad (3-35)$$

U kontekstu oscilatorne stabilnosti EES-a, u jednadžbu (3-35) se supstituira kut rotora ili kutna brzina rotora kao varijabla stanja te se za proračun prepušta računalnom programu da primjenom algoritma iterativnim postupkom prikaže oscilogramе odabranih varijabli. Ukratko, algoritam koji koriste programski alati za simulacije elektroenergetskog sustava (*DIGSILENT*, *NEPLAN*, *ETAP*, ...) slijedi nekoliko općih koraka:

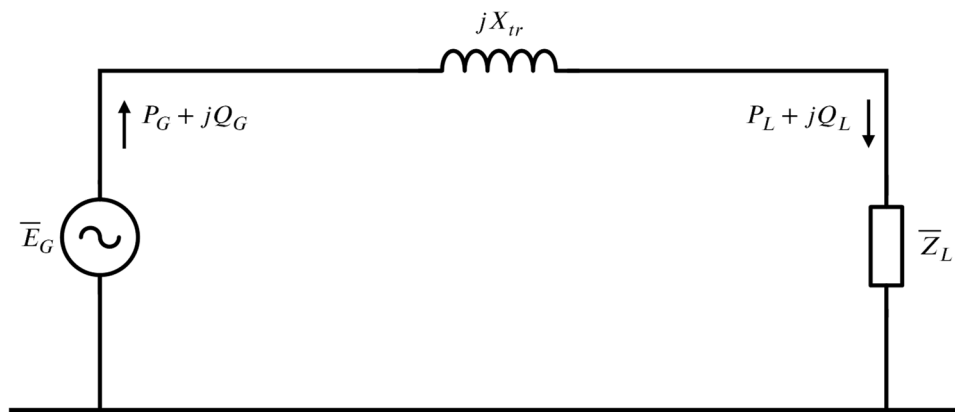
- Određivanje stacionarne radne točke \mathbf{x}_0 , koja je početni uvjet za simulaciju, proračunom tokova snaga
- Linearizacija jednadžbi stanja svih elemenata sustava
- Određivanje matrice \mathbf{A}
- Određivanje svojstvenih vrijednosti matrice \mathbf{A} .

3.2. Naponska stabilnost i *PV* krivulje

Kao što je ukratko rečeno u uvodu rada, naponi svih sabirnica u sustavu moraju biti unutar propisanog intervala u normalnim pogonskim uvjetima rada. Naponska stabilnost je stoga sposobnost sustava da nakon poremećaja održi napon unutar dozvoljenog raspona. Promjene napona, koje mogu biti nagle, događaju se kada se u sustavu dogodi promjena potrošnje ili proizvodnje, a glavni direktni uzrok naponske nestabilnosti je izražena neusklađenost između proizvodnje i potrošnje jalove snage.

Kao što će kasnije u radu u simulacijskom modelu biti napravljeno, pri analizi prijenosne mreže, podređene (distribucijske) mreže tretiraju se kao potrošač djelatne i jalove snage, odnosno kao ekvivalentni kompozitni teret. Kada se vrši analiza naponske stabilnosti prijenosne mreže, promatraju se potrošačke sabirnice tako da se grafički prikaže ovisnost djelatne snage i napona sabirnice pomoću PV krivulja (krivulja djelatna snaga-napon).

Izvod familije PV krivulja za potrošačku sabirnicu dobije se iz pojednostavljene mreže u kojoj se ostatak podređene mreže „iza“ sabirnice prikazuje kao impedancija \bar{Z}_L s pripadajućim tokom snage $P_L + jQ_L$, a dio prijenosne mreže koji napaja taj teret se radi jednostavnosti prikaže kao ekvivalentni generator i transferna reaktancija (slično kao kod postavljanja elementarnog modela za tranzijentnu stabilnost).



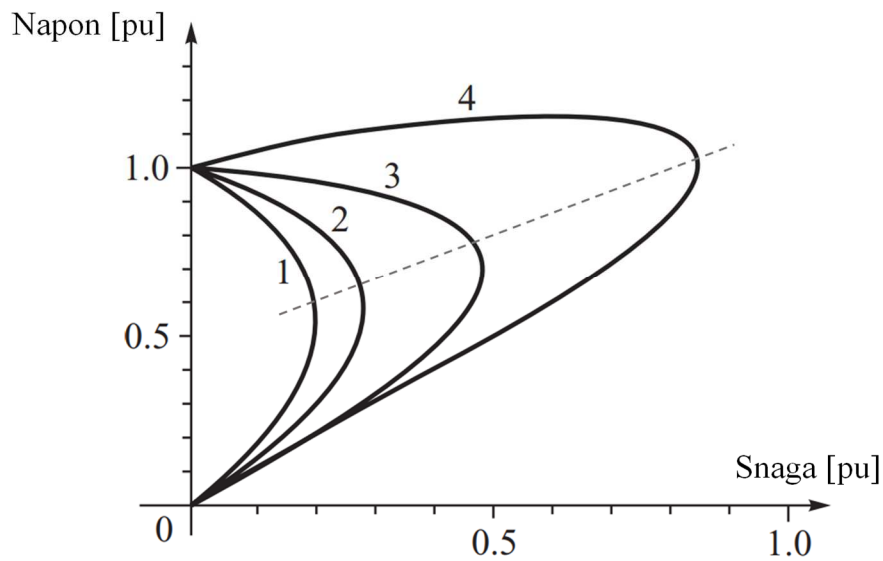
Slika 3.5: Ekvivalentna shema prijenosne mreže koja napaja nadomjesni teret

Prema Machowskom i ostalima [2] može se izvesti matematički izraz za familiju PV krivulja potrošačke sabirnice za ovaj jednostavan primjer, uz ograničenja da je $P_L(U) = P_n$ i $Q_L(U) = Q_n$:

$$p = -u^2 \sin(\phi) \cos(\phi) + u \cos(\phi) \sqrt{1 - u^2 \cos^2(\phi)}, \quad (3-36)$$

gdje je $p = \frac{P_n}{E_G^2/X_{tr}}$, $u = U/E$, a $\cos(\phi)$ faktor snage tereta. Grafički je jednadžba (3-36) familija nivo krivulja u $P-V$ ravnini za različite vrijednosti parametra ϕ , što je prikazano **Slikom 3.6**. Na slici su istaknute kritične točke na svakoj od krivulja povučenom isprekidanom linijom koja ih spaja. Sve točke iznad kritične točke na PV krivulji ispunjavaju uvjete stabilnosti, no treba u obzir uzeti da se pogon u bliskoj stabilnoj okolini kritične točke (koljeno krivulje) izbjegava

kako bi se smanjio rizik od mogućnosti naponskog sloma i time osigurala dovoljna sigurna rezerva za zadovoljavajuć rad.



Slika 3.6: Familija PV krivulja za različite faktore snage tereta: $\cos(\phi_1) \approx 0,71$ ind., $\cos(\phi_2) \approx 0,87$ ind., $\cos(\phi_3) \approx 1$, $\cos(\phi_4) \approx 0,87$ kap. [2]

Iako se radi o vrlo jednostavnom sustavu ekvivalentnog izvora i trošila, znanja iz ovog poglavlja primjenjiva su na velike sustave s mnogo generatora i potrošača. Prema tome, oblik krivulja kakav je prikazan na **Slici 3.6**, isti je i u tim složenim sustavima koji se analiziraju pomoću softvera specijalne namjene, što će kasnije u ovom radu i biti urađeno.

4. VISOKONAPONSKI ISTOSMJERNI PRIJENOS (HVDC PRIJENOS)

Razvojem pretvarača energetske elektronike pojavilo se novo relevantno komercijalno tehničko rješenje s velikim potencijalom za primjenu u unaprjeđenju elektroenergetskog sustava; taj sustav je visokonaponski istosmjerni prijenos ili HVDC prijenos. Prvi HVDC sustav prijenosne snage 320 MW koji je povezivao dva 230-kV postrojenja izrađen koristeći pretvarače s tiristorskim ventilima pušten je u pogon 1972. godine kao interkonekcija New Brunswick – Hydro Quebec (veza između dva dijela elektroenergetskog sustava u Kanadi) [13], [14]. Od tada je za određene primjene u praksi korišten HVDC prijenos umjesto konvencionalnog AC prijenosa snage; tradicionalno su HVDC sustavi korišteni u sljedećim specijalnim okolnostima: [15]

- Za povezivanje udaljenih sustava putem podvodne kabela veze, HVDC veza između tih sustava tehnički je najbolje rješenje; AC veza je u takvim slučajevima nepraktična zbog velike vrijednosti kapacitivnosti AC kabela, što bi zahtijevalo kompenzaciju jalove snage; a uz to je za naveden slučaj HVDC i ekonomski prihvatljivije rješenje za udaljenosti veće od oko 30 kilometara.
- Za prijenos velike količine snage na duge udaljenosti — ekonomski kompetitivna alternativa AC prijenosu za udaljenosti veće od oko 500 kilometara u slučaju nadzemnih vodova te oko 50-100 kilometara u slučaju podzemnih kabela.

U ovom poglavlju bit će dan uvid u osnovnu teoriju poluupravljivih tiristorskih ventila te će biti analiziran njihov rad pri implementaciji u elektroničke energetske pretvarače koji su osnovni dio HVDC sustava. Kroz rad će razmatran biti samo LCC tip HVDC veze, odnosno HVDC sustav kojeg čine mrežom komutirani pretvarači koji je, zbog već sada visokog stupnja razvijenosti, smatran kao konvencionalan.

Osim LCC tipa, postoji VSC⁶ HVDC veza koja se zasniva na punoupravljivim ventilima, IGB tranzistorima, a uobičajeno se koristi za asinkrono povezivanje vjetroparkova na moru s elektroenergetskom mrežom. Karakterističan sustav upravljanja kod ovih sustava je sinusna pulsno-širinska modulacija (PWM) i visoka sklopna frekvencija (do oko 2 kHz) [16], [17].

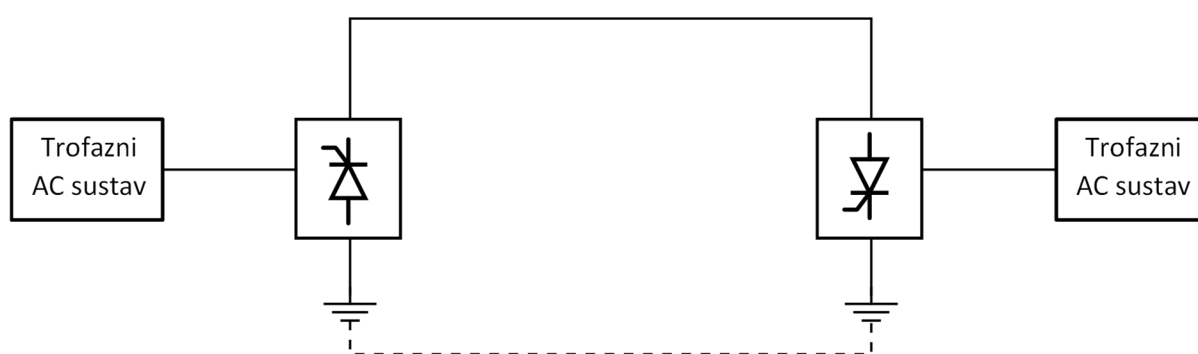
⁶ Kratica od *Voltage source converter* — autonomni pretvarač s naponskim ulazom

4.1. Osnovne konfiguracije visokonaponskog istosmjernog prijenosa

Prema topologiji električne mreže, istosmjerni prijenos ili HVDC veza može se klasificirati u dvije osnovne kategorije: jednopolni i dvopolni sustav⁷. U oba sustava s jedne strane veze nalazi se ispravljač, a s druge strane izmjenjivač, te su oni povezani istosmjernim dalekovodom ili kabelom.

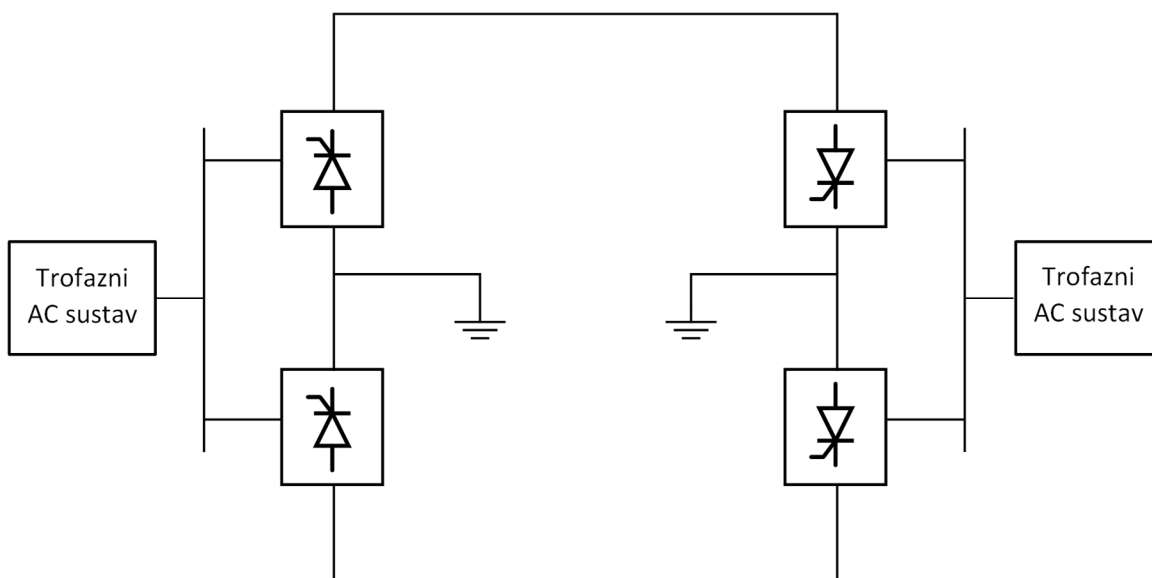
Jednopolni sustav sastoji se od dva pretvarača i jednog vodiča koji ih povezuje, a koji može biti pozitivnog ili negativnog polariteta, te je uzemljavanjem obje strane veze osiguran povrat kroz zemlju (ili kroz vodu u slučaju podvodne kableske HVDC veze). U slučaju kada je tlo visoke specifične otpornosti, ili u iznimnim situacijama kada je moguća interferencija s metalnim podzemnim ili podvodnim konstrukcijama, osiguran je metalni povrat. [5]

Dvopolni sustav sastoji se od dva vodiča gdje je jedan pozitivan pol, a drugi kao negativan pol. Dva vodiča su potrebna s obzirom na to da sa svake strane HVDC-a ima dva AC prilaza, svaki za jedan pretvarač — što znači da se u ovoj konfiguraciji koristi četiri umjesto dva pretvarača. Par pretvarača na istoj strani veze istog je nazivnog napona te su u normalnim uvjetima rada ta dva pretvarača u seriji na DC strani. Srednja točka između pretvarača je kruto uzemljena te u normalnom pogonu, kada su struje obaju polova jednake, kroz zemlju ne teče struja. Prednost dvopolnog sustava/veze u odnosu na jednopolni je povećana pouzdanost rada: u slučaju ispada jednog pola iz pogona, drugi pol neometano nastavlja s radom jer mu je pružen povrat kroz zemlju.



Slika 4.1: Konfiguracija jednopolnog HVDC sustava

⁷ Engl. *The monopolar link* i *The bipolar link*

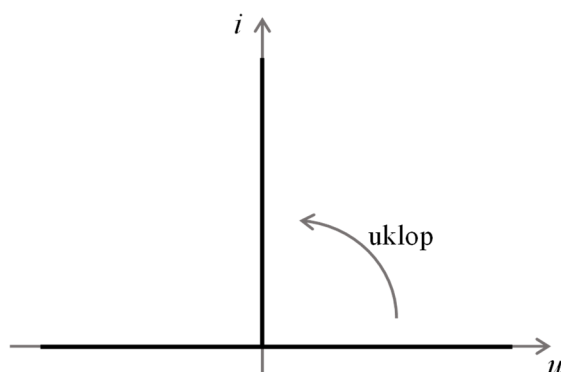


Slika 4.2: Konfiguracija dvopolnog HVDC sustava

4.2. Rad elektroničkih energetskih pretvarača u HVDC sustavu

4.2.1. Poluupravljiva strujno jednosmjerna sklopka — energetski tiristor

U primjeni elektroničkih energetskih pretvarača koji su osnovni dio HVDC sustava osnovne poluvodičke naprave su tiristori. Na razini modela tiristor se najčešće opisuje kao idealna poluupravljiva strujno jednosmjerna sklopka/ventil. Idealizirani model u kontekstu energetske elektronike znači da je trenutna snaga ventila $p_V = u_V \cdot i_V$ u svakom trenutku jednaka nuli — to znači da je napon na ventilu jednak nuli kada on vodi, a može biti različit od nule kada on ne vodi [3]. Pretvaračka svojstva strujno jednosmjerne sklopke prikazana su u - i karakteristikom na Slici 4.3.



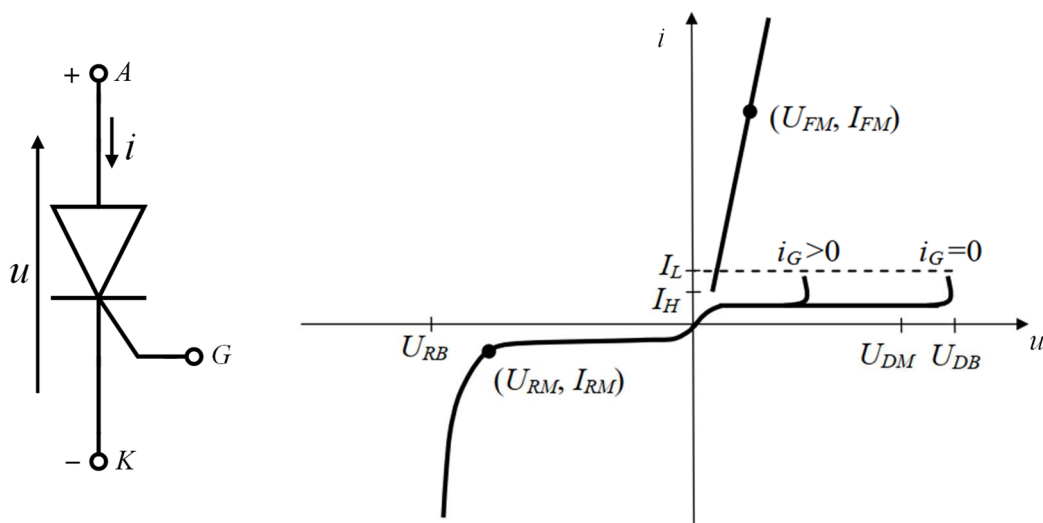
Slika 4.3: Karakteristika poluupravljive strujno jednosmjerne sklopke

Navedena komponenta ima mogućnost vođenja samo pozitivne struje, preciznije struje jednog smjera, a napon može biti pozitivan ili negativan. Kao što je ilustrirano na **Slici 4.3**, moguće je upravljati samo uklopom (uključenjem sklopke) uz prethodno narinuti pozitivan napon. Isklopom (isključenjem) nije moguće upravljati te je uvjet isklopa isti kao i za neupravljivu sklopku, a trenutak isklopa t_{iskl} ovisan je o ulaznom naponu i ostatku mreže: [3]

$$i_V(t_{\text{iskl}}^-) = 0 ; \quad \frac{di_V}{dt}(t_{\text{iskl}}^-) = 0 \quad (4-1)$$

Iz karakteristike sklopke proizlazi da je njena srednja vrijednost struje $I_V(0)$ uvijek pozitivna, a srednja vrijednost napona $U_V(0)$ je proizvoljnog predznaka (određeno upravljanjem). Iz toga slijedi da istosmjerna komponenta djelatne snage $P_V(0) = U_V(0) \cdot I_V(0)$ može biti pozitivna ili negativna — to znači da se pomoću ovih komponenata mogu izraditi i ispravljači i izmjenjivači. Zbog ove dvosmjernosti toka energije, tiristorski pretvarači nazivaju se usmjerivači koji mogu raditi u ispravljačkom ($P_V(0) > 0$) ili izmjenjivačkom režimu rada ($P_V(0) < 0$).

U realnosti, na tiristoru postoje gubici vođenja, odnosno gubici djelatne snage, ali su oni relativno mali — to je pogotovo izraženo u njihovoj implementaciji u elektroenergetskoj mreži (vrlo) visokog napona gdje su naponi nekoliko stotina kilovolti, a struje i do nekoliko kiloampera. Iz tog razloga je za analizu razumno i prihvatljivo uzeti tiristore kao idealne učinske ventile. Simbol energetskog tiristora te prikaz njegove karakteristike kao stvarne elektroničke komponente dani su na **Slici 4.4**.



Slika 4.4: Simbol i tipična u - i karakteristika energetskog tiristora [3]

Tiristor je bistabilna komponenta⁸ te ima tri priključka: anodu (A) kao pozitivan priključak, katodu (K) kao negativan priključak, te treći priključak — *gate* (G) — koji ima ulogu upravljačkog priključka. Na *gate* se putem vanjskog upravljačkog kruga dovode strujni impulsi koji djeluju na uklop tiristora. Tiristor, za razliku od diode, može primiti i pozitivan napon uz zanemarivo malu struju vođenja — prema tome on je u stanju nevođenja opisan s dvije karakteristike — u I. (zaporna karakteristika) i III. kvadrantu (blokorna karakteristika) $u-i$ ravnine. Tiristor regularno prelazi iz stanja nevođenja u stanje vođenja pobudom struje *gate*-a uz uvjet prethodno osiguranog pozitivnog napona na njemu [3]:

$$u_V(t_{\text{ukl}}^-) > 0 ; \quad i_G(t_{\text{ukl}}^-) > 0 \quad (4-2)$$

Prema karakteristici sa **Slike 4.4** izdvojene važne karakteristične vrijednosti su:

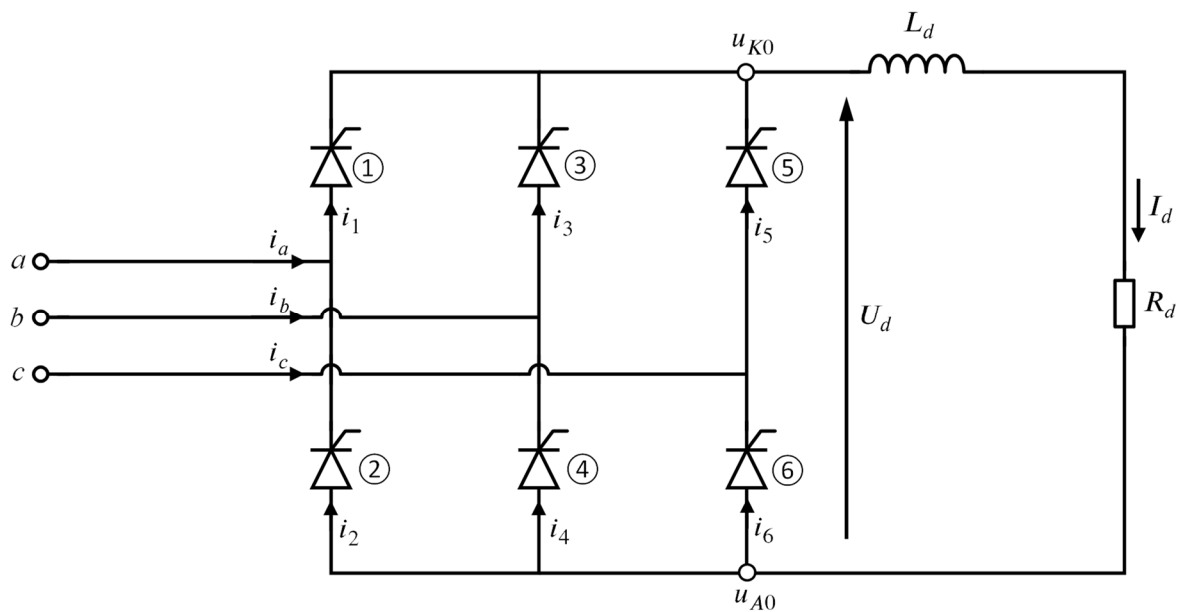
- U_{RM} — maksimalni repetitivni napon
- I_{FM} — maksimalna propusna struja
- U_{DM} — napon pokretanja — napon pri kojem tiristor provede neregularno (bez pobude struje *gate*-a)
- I_L — struja prihvaćanja — početna struja vođenja
- I_H — struja držanja — minimalna struja vođenja ispod čije je vrijednosti tiristor u stanju nevođenja.

4.2.2. Trofazni mosni spoj — ispravljač

Osnovni model pretvarača u HVDC-u jest djelatno-induktivno opterećen trofazni mosni spoj koji za rad zahtijeva šest tiristora, odnosno serijski spoj dva tropulsna pretvarača. Referentni smjer toka snage je iz mreže, odnosno referentni režim rada usmjerivača je ispravljački. Načelna shema topologije ove električke mreže pretvarača dana je na **Slici 4.5**. Pretpostavlja se da pretvarač napaja trošilo djelatne snage — na razini modela to je otpor R_d ; nadalje, zbog zahtjeva glatke struje I_d , u seriju s otporom dodaje se prigušnica induktiviteta L_d [1]. Taj serijski RL spoj predstavlja pasivni strujni filter — u teorijskim razmatranjima prigušnica je beskonačnog induktiviteta ($L_d = \infty$), što znači da je u harmonijskom sastavu struje tereta samo

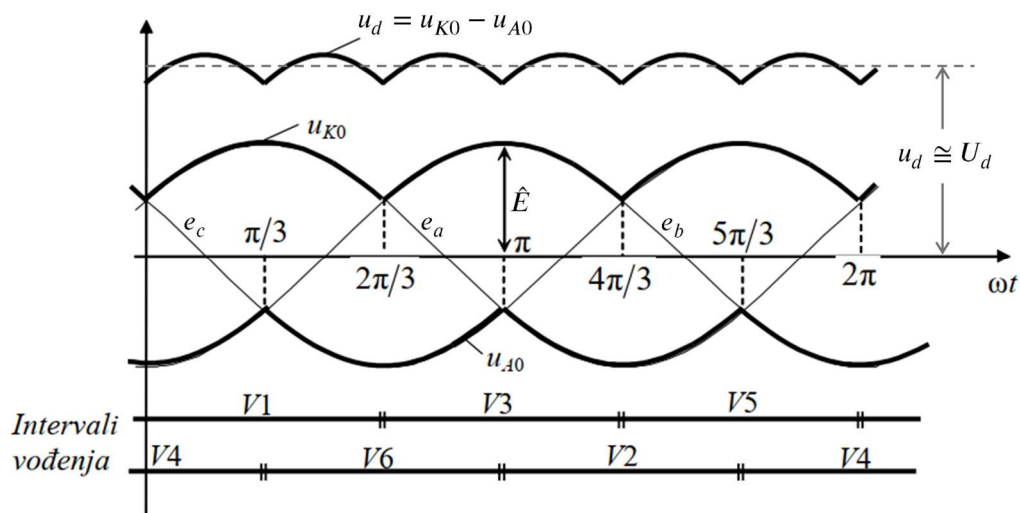
⁸ Bistabilna komponenta može biti u samo dva stanja: u stanje vođenja (*ON state*) ili stanju nevođenja (*OFF state*)

njezina istosmjerna komponenta. Za primjenu u HVDC-u, tiristorima se upravlja simetrično, tako da se za kut α , koji se naziva kut kašnjenja okidanja ispravljača ili kut upravljanja, odgodi trenutak početka vođenja tiristora u odnosu na trenutak kada bi dioda provela. Upravljanjem kutom okidanja, upravlja se iznosom pozitivnih volt-sekundi tiristora, a time se regulira istosmjerna vrijednost izlaznog napona za koju je već rečeno da može biti proizvoljnog predznaka.



Slika 4.5: Topologija trofaznog pretvarača u mosnom spoju

Primjenom KZN-a može se pokazati da će u katodnoj skupini (ventili ①, ③ i ⑤) voditi ventil s najvećim naponom anode, a u anodnoj skupini (②, ④ i ⑥) s najnižim naponom katode. Prema tome je valni oblik napona na trošilu u slučaju kada nema kašnjenja okidanja dan likom.



Slika 4.6: Valni oblik napona trošila za slučaj $\alpha = 0$ [3]

Implementacijom šest tiristora dobije se šesteropulsni valni oblik napona tereta zbog čega se ovi pretvarači često nazivaju šesteropulsni usmjerivači.

Istosmjerni napon na izlazu za slučaj kada je $\alpha = 0$ ($U_{d0}(0)$) dobije se korištenjem matematičke definicije srednje vrijednosti:

$$U_{d0}(0) = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} u_d(t) d(\omega t) = \frac{\pi}{3} \int_0^{\frac{\pi}{3}} (e_a(t) - e_b(t)) d(\omega t). \quad (4-3)$$

Rješenje ovog integrala daje izraz

$$U_{d0}(0) = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} U_{LL} \approx 1,35U_{LL}, \quad (4-4)$$

gdje je U_{LL} linijski napon mreže.

Upravljanjem pomoću struje *gate*-a može se odgoditi trenutak prorade svakog od ventila za $t_\alpha = \alpha/\omega$. Za vrijeme trajanja tog intervala na tiristoru je pozitivan napon⁹, što je u praktičnim primjerima i nužan uvjet za njegovo pobuđivanje. Srednja vrijednost izlaznog napona ispravljača također se dobije primjenom integrala za srednju vrijednost napona tereta, a rezultat je

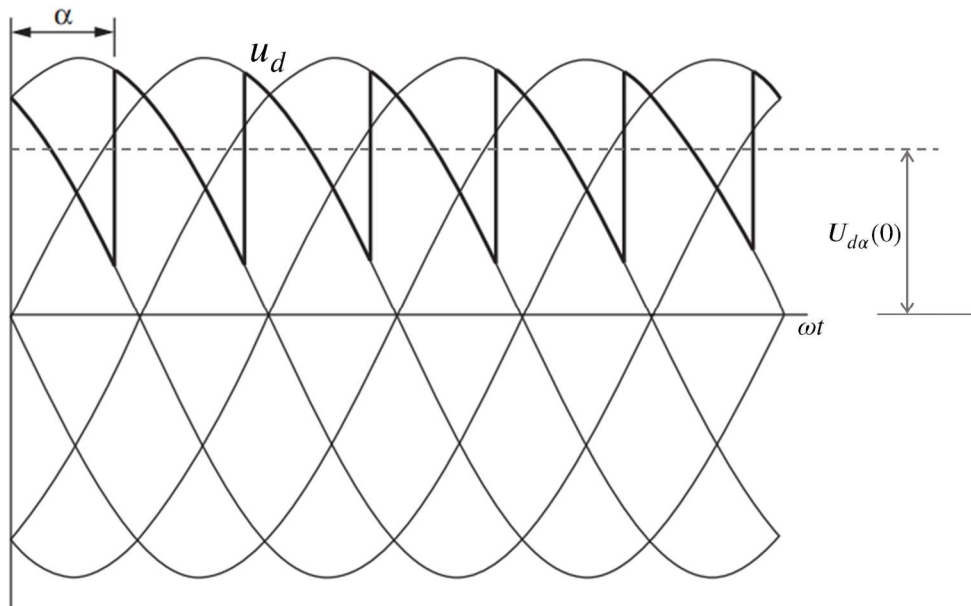
$$U_{d\alpha}(0) = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} U_{LL} \cdot \cos(\alpha) = U_{d0}(0) \cdot \cos(\alpha). \quad (4-5)$$

Iz jednadžbe se jasno vidi da je $U_{d\alpha}(0) = v(\alpha)$,¹⁰ odnosno potvrđen je iskaz da se upravljanjem kutom kašnjenja regulira izlazni napon, čija srednja vrijednost teoretski može biti u intervalu $[-U_{d0}(0), U_{d0}(0)]$, jer je $-1 \leq \cos(\alpha) \leq 1$. Uobičajen raspon za α u praksi je $10^\circ \leq \alpha \leq 150^\circ$ [18].

Na temelju jednadžbe izlaznog napona može se ustvrditi da ovaj trofazni usmjerivač radi u ispravljačkom režimu rada za $0^\circ \leq \alpha < 90^\circ$. Na **Slici 4.7** je prikazan valni oblik izlaznog napona pretvarača koji radi kao ispravljač ($\alpha = 45^\circ$), prema čemu je očito da je $U_{d\alpha}(0) > 0$, odnosno da je djelatna snaga pozitivna što indicira tok snage prema teretu.

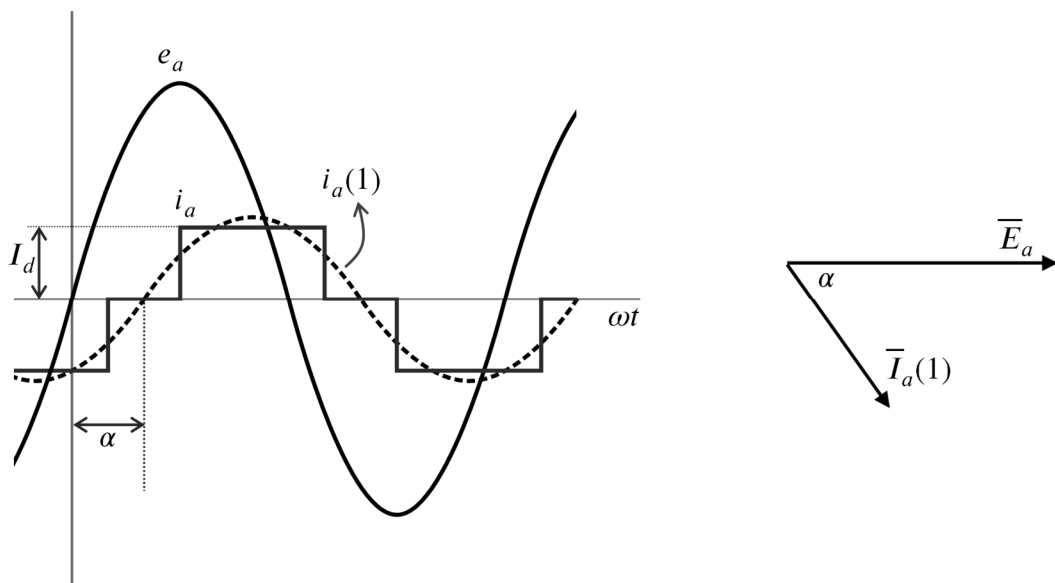
⁹ Izraz za pozitivne volt-sekunde tiristora (kada je napon tiristora pozitivan): $\int_{t_0}^{t_0+t_\alpha} u_V(t) dt$; t_0 = trenutak kada bi dioda na mjestu tiristora provela

¹⁰ Funkcija $v(\alpha)$ je upravljačka karakteristika usmjerivača



Slika 4.7: Valni oblik napona trošila za slučaj $\alpha = 45^\circ$ [4]

Treba napomenuti da se provođenjem upravljanja ventila na opisan način uvodi fazni pomak između faznog napona i struje mreže kao što je prikazano na **Slici 4.8**.



Slika 4.8: Valni oblici napona i struje mreže pri kutu upravljanja $\alpha = 60^\circ$

Kada je kut upravljanja jednak nuli, fazni napon mreže i osnovni harmonik linijske struje mreže su u fazi, no povećavanjem kuta α , povećava se i fazni pomak (kut impedancije) na osnovnom

harmoniku. Valni oblik struje jedne faze, prikazane na **Slici 4.8**, dobije se rastavom u Fourierov red [4]:

$$i_a(t) = \frac{2\sqrt{3}}{\pi} I_d \left[\sin(\omega t - \alpha) - \frac{1}{5} \sin 5(\omega t - \alpha) + \frac{1}{7} \sin 7(\omega t - \alpha) - \frac{1}{11} \sin 11(\omega t - \alpha) + \frac{1}{13} \sin 13(\omega t - \alpha) - \frac{1}{15} \sin 15(\omega t - \alpha) + \dots \right]. \quad (4-6)$$

Iz toga slijedi da je efektivna vrijednost linijske struje osnovnog harmonika sve tri faze simetričnog sustava jednaka te iznosi

$$I(1) = \frac{\sqrt{6}}{\pi} I_d \approx 0,78 I_d. \quad (4-7)$$

Fazori linijskih struja na osnovnoj frekvenciji su onda:

$$\begin{aligned} \bar{I}_a(1) &= \frac{\sqrt{6}}{\pi} I_d \angle(-\alpha) \\ \bar{I}_b(1) &= \frac{\sqrt{6}}{\pi} I_d \angle(-\alpha - 120^\circ) \\ \bar{I}_c(1) &= \frac{\sqrt{6}}{\pi} I_d \angle(-\alpha + 120^\circ). \end{aligned} \quad (4-8)$$

Djelatna snaga koju mreža predaje usmjerivaču jednaka je zbroju djelatnih snaga svake od tri faza. Pod pretpostavkom da je valni oblik napona mreže monoharmonijski (što je opravdano kada se za AC izvor promatra kruta mreža), ukupna djelatna snaga jednaka je djelatnoj snazi osnovnog harmonika:

$$P_{AC} = 3E_{LN}I(1) \cos(\phi_1) = \sqrt{3}U_{LL}I(1) \cos(\phi_1) = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} U_{LL}I_d \cos(\phi_1), \quad (4-9)$$

gdje je E_{LN} efektivna vrijednost faznog napona mreže, a $\cos(\phi_1)$ faktor snage na osnovnom harmoniku. Djelatna snaga tereta usmjerivača dana je izrazom

$$P_d = \frac{1}{T} \int_0^T u_{d\alpha}(t) I_d dt = U_{d\alpha}(0) I_d, \quad (4-10)$$

te se ta snaga, uz zanemarene gubitke vođenja i prijenosa snage DC vodičem, može izjednačiti s djelatnom snagom izmjenične mreže:

$$\sqrt{3}U_{LL}I(1) \cos(\phi_1) = U_{d\alpha}(0) I_d. \quad (4-11)$$

Iz izraza (4-9) i (4-11) proizlazi da je $\cos(\phi_1) = \cos(\alpha)$, odnosno zaključuje se da je kut snage na osnovnom harmoniku jednak kutu upravljanja; što je vidljivo i na **Slici 4.8** gdje je prikazan fazorski dijagram na osnovnoj frekvenciji. Jalova snaga osnovnog harmonika¹¹ koju mreža predaje usmjerivaču je prema tome dana sljedećim izrazom:

$$Q(1) = 3E_{LN}I(1)\sin(\alpha) = \sqrt{3}U_{LL}I(1)\sin(\alpha) = \frac{3\sqrt{2}}{\pi}U_{LL}I_d\sin(\alpha). \quad (4-12)$$

Prema (4-12) jasno je da se upravljanjem u mrežu unosi značajna jalova snaga na osnovnoj frekvenciji što je nepoželjno s gledišta kvalitete električne energije, i često može biti potrebno na ispravljačkim (i/ili izmjenjivačkim) sabirnicama ugrađivati sustav za kompenzaciju jalove snage. Za kut $\alpha = 0$, što odgovara neupravljivom diodnom pretvaraču, jalova snaga osnovnog harmonika jednaka je nuli. Na temelju toga slijedi zaključak da se (polu)upravljivošću ventila postiže bolji učinak u prijenosu snage, ali se stvaraju negativni povratni utjecaji na izmjeničnu mrežu.

4.2.3. Trofazni mosni spoj u izmjenjivačkom režimu rada

Jednadžbom (4-5) pomoću koje je opisan izlazni napon usmjerivača, jasno je iskazano da je $U_{d\alpha}(0)$ negativan kada je kut okidanja ispravljača $\alpha > 90^\circ$. Struja tereta usmjerivača I_d uvijek je pozitivna i smjera kao na **Slici 4.5**, zbog velikog iznosa induktiviteta L_d koji onemogućuje promjenu struje¹². Tada je snaga tereta usmjerivača negativna:

$$P_d = \underbrace{U_{d\alpha}(0)}_{<0} \underbrace{I_d}_{>0} < 0, \quad (4-13)$$

što znači da je tok snage suprotan od referentnog — u izmjenjivačkom režimu rada tok snage je, dakle, od nadomjesnog tereta prema izmjeničnoj mreži.

Uobičajena praksa je uvesti pojam kut prethođenja okidanja izmjenjivača β koji se mjeri relativno prema kutu $\omega t = 180^\circ$ te je sukladno s tim definiran na sljedeći način [1]:

$$\beta = 180^\circ - \alpha. \quad (4-14)$$

¹¹ Jalova snaga osnovnog harmonika često se naziva i jalova snaga upravljanja jer je njen iznos izravno ovisan o kutu upravljanja: $Q(1) \propto \sin(\alpha)$ [3]

¹² Promjena struje u graničnom slučaju: $\Delta i_d = \frac{1}{L_d} u_{L_d} \Delta t = \frac{1}{\infty} u_{L_d} \Delta t = 0$

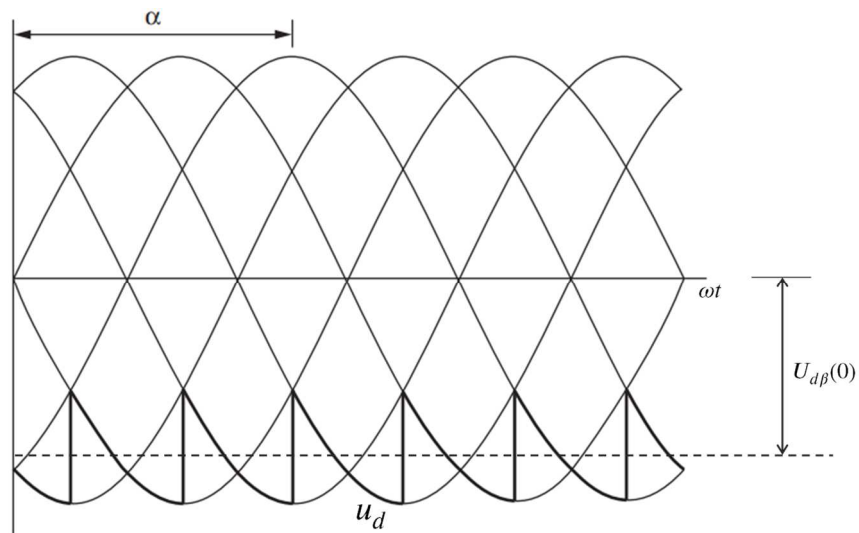
Kako bi se napravila razlika između ispravljačkog i izmjenjivačkog načina rada, definiira se pozitivan izlazni napon u izmjenjivačkom načinu rada:

$$U_{d\beta} = U_{d0} \cos(\beta) , \quad (4-15)$$

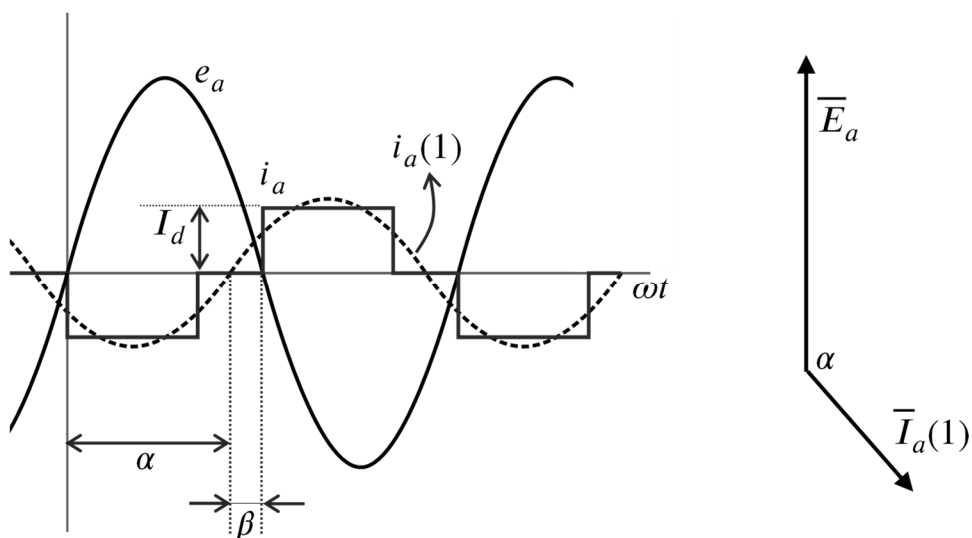
te se primjenom trigonometrijskog identiteta $\cos(180^\circ - \alpha) = -\cos(\alpha)$ potvrđuje da je

$$U_{d\beta} = -U_{d\alpha} . \quad (4-16)$$

Prema jednadžbi (4-12) te trigonometrijskom svojstvu da je $\sin(180^\circ - \alpha) = \sin(\alpha)$, proizlazi da je izmjenjivač trošilo pozitivne (induktivne) jalove snage, kao i ispravljač. Karakteristični valni oblik napona i struje mreže pri izmjenjivačkom radu pretvarača prikazani su na **Slici 4.9**.



Slika 4.9: Valni oblik napona trošila pri kutu upravljanja $\alpha = 150^\circ$ [4]

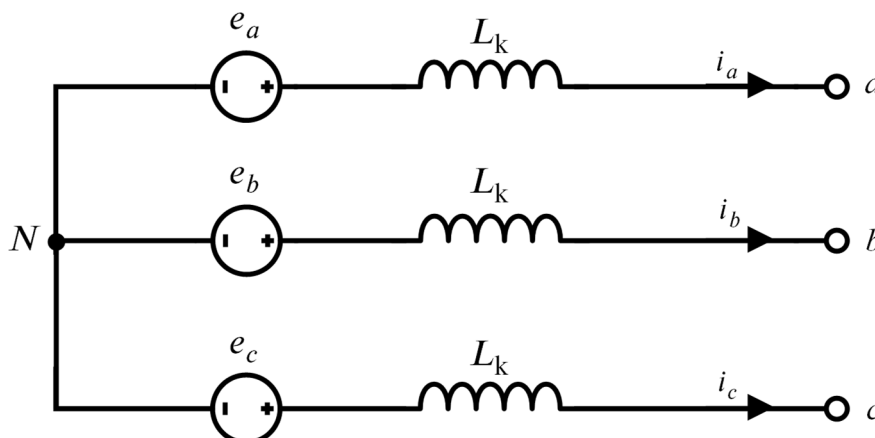


Slika 4.10: Valni oblici napona i struje mreže pri kutu upravljanja $\alpha = 150^\circ$

4.2.4. Utjecaj komutacijskog induktiviteta na rad HVDC pretvarača

Često se, zbog traženog visokog istosmjernog napona za prijenos snage, kaskadno s pretvaračem spaja regulacijski transformator koji služi za podizanje izmjeničnog napona vanjskog AC sustava (najčešće je raspon regulacije napona na takvom transformatoru $U_n \pm 0,1$ pu [19]). U takvoj konfiguraciji je pretvarač spojen na prilaz sekundara regulacijskog transformatora te se zbog toga u modelu na AC stranu u seriju s izmjeničnim naponskim izvorom (e_a, e_b, e_c) mora dodati nadomjesni komutacijski induktivitet L_k kojim se u obzir uzima rasipni induktivitet priključenog transformatora (**Slika 4.11**). Ulazni AC napon svake od faza je tada:

$$\begin{aligned} u_a &= e_a - L_k \frac{di_a}{dt} \\ u_b &= e_b - L_k \frac{di_b}{dt} \\ u_c &= e_c - L_k \frac{di_c}{dt} \end{aligned} \quad (4-17)$$



Slika 4.11: Električna shema sekundara regulacijskog transformatora (AC strane) pomoću kojeg se napaja pretvarač

Zbog svojstva induktiviteta da se opire promjeni struje, nemoguća je trenutna promjena linijskih struja mreže, kao što je to bio slučaj prikazan na **Slici 4.8** i **Slici 4.10**. Posljedica toga je odgoda trenutne komutacije (skokovite promjene linijske struje), između dva ventila za vrijeme t_k čiji je kutni ekvivalent $\mu = \omega t_k$. Taj kut naziva se kut komutacije ili kut preklapanja. U normalnom režimu rada, raspon je $0^\circ < \mu < 60^\circ$, a najčešći je slučaj, pri nazivnom opterećenju da je μ manji od 25° [1]. Uvođenjem kuta komutacije, potrebno je definirati sljedeće kutove za opis rada ispravljača i izmjenjivača:

$$\begin{aligned} \delta &= \alpha + \mu \\ \gamma &= \beta - \mu = 180^\circ - \delta, \end{aligned} \quad (4-18)$$

gdje je δ kut kašnjenja ekstinkcije (kod ispravljača), a γ kut prethođenja ekstinkcije (kod izmjenjivača).

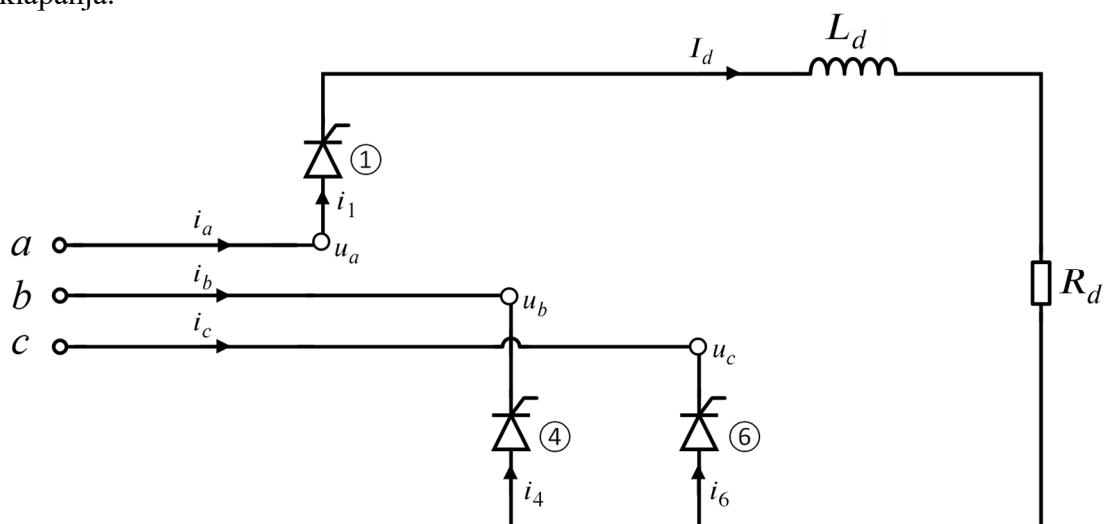
Najjednostavniji način za objašnjenje pojave kuta komutacije je da se uzme da je $\alpha = 0$. Prema **Slici 4.6**, fazni naponi su

$$\begin{aligned} e_a(t) &= \sqrt{2}E_{LN} \cos(\omega t - 60^\circ) \\ e_b(t) &= \sqrt{2}E_{LN} \cos(\omega t - 180^\circ) \\ e_c(t) &= \sqrt{2}E_{LN} \cos(\omega t + 60^\circ) \end{aligned} \quad (4-19)$$

te u prvom intervalu periode ($0 < \omega t < \frac{\pi}{3}$) vode ventili ① i ④, a u trenutku $t = \frac{\pi/3}{\omega}$ treba se dogoditi komutacija između ventila ④ i ⑥. Pri kutu $(\frac{\pi}{3})^-$ vrijedi da je $i_4 = -i_b = I_d$ te zbog svojstva neprekidnosti struje induktiviteta je

$$i_b\left(\frac{\pi}{3} +\right) = i_b\left(\frac{\pi}{3} -\right) = -I_d, \quad (4-20)$$

što nije bio slučaj kada u analizu nije bio uključen komutacijski induktivitet. Iz toga slijedi da će ventil ④ nastaviti voditi sve dok ne bude ispunjen uvjet njegovog isklopa (jednačba (4-1)): upravo taj vremenski interval — kada vode tri ventila — odgovara kutu komutacije ili preklapanja.



Slika 4.12: Ekvivalentna električka mreža pretvarača za interval $\frac{\pi}{3} < \omega t < \frac{\pi}{3} + \mu$

KZN za petlju koja sadrži ventile ④ i ⑥ za $(\frac{\pi}{3})^+ \leq \omega t < \frac{\pi}{3} + \mu$ glasi:

$$e_b + L_k \frac{di_4}{dt} - L_k \frac{di_6}{dt} - e_c = 0 \implies e_c - e_b = L_k \left(\frac{di_4}{dt} - \frac{di_6}{dt} \right). \quad (4-21)$$

Uvrštavanjem (4-19) u (4-21) uz primjenu KZS-a $i_4 + i_6 = I_d$ dobije se

$$\sqrt{2}U_{LL} \cos(\omega t + 30^\circ) = 2L_k \frac{di_4}{dt}. \quad (4-22)$$

Za rješavanje diferencijalne jednačbe (4-22) potrebno je uvrstiti početni uvjet $i_4(\frac{\pi}{3}^+) = I_d$:

$$\int_{I_d}^t di_4 = \frac{\sqrt{2}U_{LL}}{2\omega L_k} \int_{\frac{\pi}{3}^+}^t \cos\left(\omega t + \frac{\pi}{6}\right) d(\omega t). \quad (4-23)$$

Iz toga se dobije funkcija struje na odsječku $(\frac{\pi}{3}, \mu + \frac{\pi}{3})$:

$$i_4(t) = I_d + \frac{\sqrt{2}U_{LL}}{2\omega L_k} \left[\sin\left(\omega t + \frac{\pi}{6}\right) - 1 \right]. \quad (4-24)$$

Kada završi interval komutacije, struja i_4 bit će nula, tako da se u gornju jednačbu može uvrstiti $i_4(\omega t = \mu + \frac{\pi}{3}) = 0$ da bi se dobio izraz za kut komutacije μ :

$$\mu = \arccos\left(1 - \frac{\sqrt{2}\omega L_k I_d}{U_{LL}}\right) = \arccos\left(1 - \frac{\sqrt{2}X_k I_d}{U_{LL}}\right). \quad (4-25)$$

S obzirom na to da je ulazni AC napon umanjn za napon komutacijskog induktiviteta, očekivano je da će se srednja vrijednost izlaznog napona pretvarača promijeniti u tom slučaju. Može se pokazati da će se izlazni napon usmjerivača promijeniti za iznos ΔU_d koji je dan izrazom [3], [20]:

$$\Delta U_d = 6f L_k I_d = \frac{3}{\pi} X_k I_d = R_k I_d, \quad (4-26)$$

gdje se produkt $6f L_k$ svede na nadomjesni otpor R_k . Komutacijska reaktancija X_k se da izračunati kao [21]

$$X_k = \frac{u_{ks}\%}{100} \cdot \frac{U_n^2}{S_n}, \quad (4-27)$$

gdje je u_{ks} % napon kratkog spoja regulacijskog transformatora u postotnoj vrijednosti, U_n nazivni napon sekundara i S_n nazivna snaga.

Linijska struja AC mreže važan je podatak kod planiranja HVDC sustava te se često uvodi aproksimacija da je

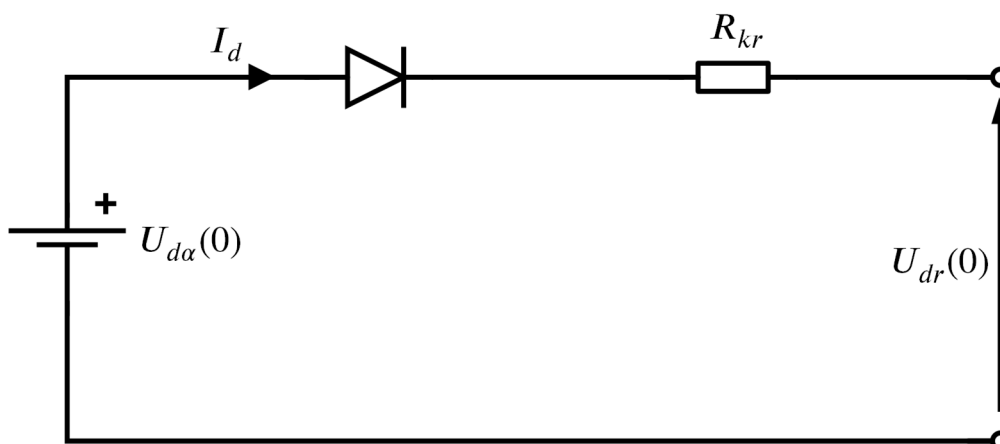
$$I(1) \approx \frac{\sqrt{6}}{\pi} I_d, \quad (4-28)$$

što odgovara rezultatu dobivenom u relaciji (4-7) u poglavlju 4.2.2, gdje u obzir nije bio uzet učinak komutacijskog induktiviteta. Validnost ove aproksimacije očituje se u tome da greška iznosi manje od 1,1% za kut $\mu < 30^\circ$, što odgovara normalnim vrijednostima u pogonu; a čak i ako je kut komutacije 60° , pogreška je relativno mala — 4,3% [5].

4.3. Vođenje i upravljanje HVDC sustavom

4.3.1. Ekvivalentna električka mreža HVDC veze

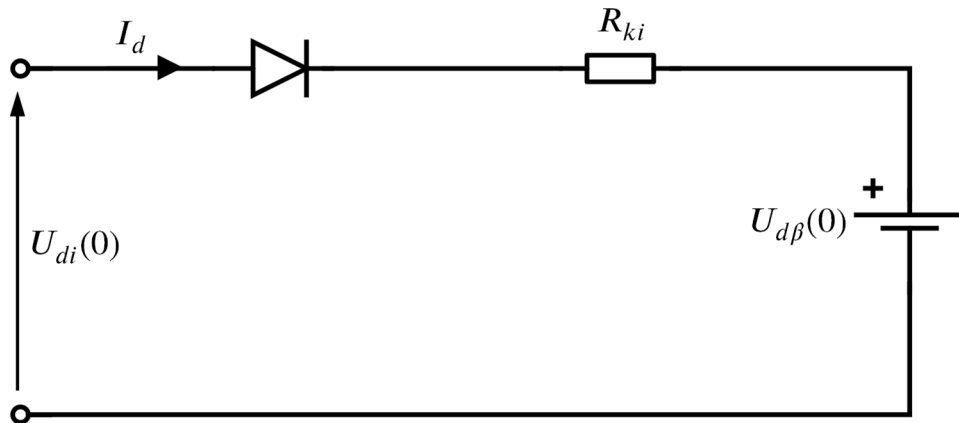
Kada se uzme u obzir relacija (4-26) te izrazi za izlazni napon ispravljača i izmjenjivača, (4-5) i (4-15), dobiju se električke mreže ispravljača i izmjenjivača koje su prikazane na Slici 4.13 i Slici 4.14.



Slika 4.13: Ekvivalentna mreža ispravljača za istosmjerne vrijednosti

Na obje slike je dodana strujno jednosmjerna sklopka kako bi se indicirala jednosmjernost struje u oba slučaja, a oznake s prethodne dvije slike su:

- $U_{dr}(0)$ — istosmjerna vrijednost izlaznog napona ispravljača
- R_{kr} — nadomjesni komutacijski otpor ispravljača
- $U_{di}(0)$ — istosmjerna vrijednost izlaznog napona izmjenjivača
- R_{ki} — nadomjesni komutacijski otpor izmjenjivača.



Slika 4.14: Ekvivalentna mreža izmjenjivača za istosmjerne vrijednosti

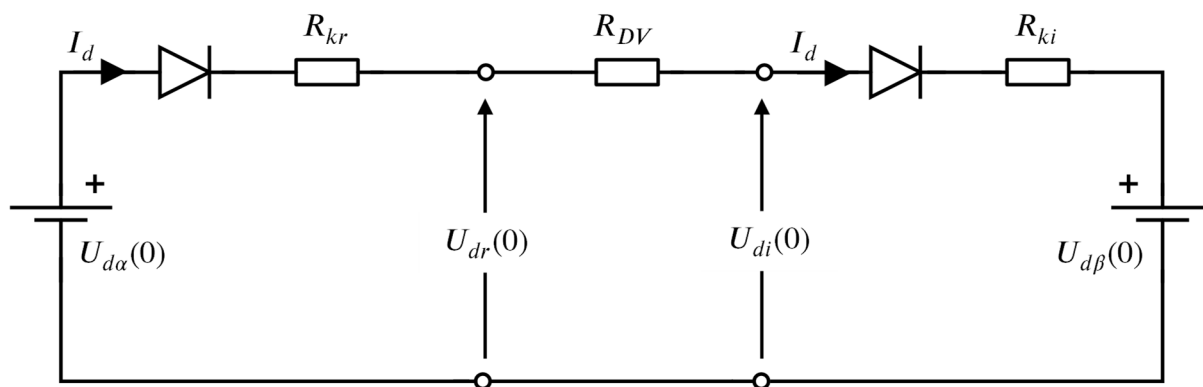
Primjenom KZN-a na mreže ispravljača i izmjenjivača dobije se:

$$U_{dr}(0) = U_{d\alpha}(0) - \Delta U_{dr} = U_{d\alpha}(0) - R_{kr} I_d \quad (4-29)$$

$$U_{di}(0) = U_{d\beta}(0) + \Delta U_{di} = U_{d\beta}(0) + R_{ki} I_d, \quad (4-30)$$

Budući da se izlazni naponi ispravljača i izmjenjivača u slučaju kada komutacijski kut nije zanemaren ($U_{dr}(0)$, $U_{di}(0)$) razlikuju od inicijalno definiranih napona $U_{d\alpha}(0)$ i $U_{d\beta}(0)$, onda se ti naponi — $U_{d\alpha}(0)$ i $U_{d\beta}(0)$ — nazivaju naponi praznog hoda ispravljača i izmjenjivača.

Ispravljač i izmjenjivač međusobno su povezani istosmjernim dalekovodom; za istosmjerne vrijednosti je induktivnost dalekovoda jednaka nuli, stoga se u obzir uzima samo jedinični otpor dalekovoda kao relevantan parametar kod proračuna srednjih vrijednosti struja i napona. Prema tome, cjelovita električka mreža LCC HVDC veze može se prikazati kao kaskadni spoj mreže ispravljača, otpora dalekovoda R_{DV} i mreže izmjenjivača.



Slika 4.15: Ekvivalentna mreža LCC HVDC sustava za istosmjerne vrijednosti

Istosmjerna struja prijenosa (I_d) se izračuna iz sheme na slici:

$$I_d = \frac{U_{d\alpha}(0) - U_{d\beta}(0)}{R_{kr} + R_{DV} + R_{ki}} \quad (4-31)$$

Djelatni gubitci prijenosa putem HVDC veze, uzrokovani padom napona na otporu dalekovoda, izračunaju se kao:

$$\Delta P_d = R_{DV} I_d^2. \quad (4-32)$$

Iz dobivenog rezultata jasno je kako su pri jedнопolnom sustavu prijenosa gubitci tri puta manji u odnosu na AC prijenos pri istoj pogonskoj struji i otporu dalekovoda, što je iskaz dugoročne financijske isplativosti na troškovima gubitaka u mreži. Iako nema jalovih gubitaka na istosmjernom dalekovodu (ili kabelu), pretvarači koji se koriste su značajan potrošač jalove snage, što je i potkrijepljeno relacijom (4-12) u poglavlju 4.2.2.

4.3.2. Rad HVDC LCC sustava integriranog u elektroenergetsku mrežu

Mrežom komutirani pretvarači u HVDC sustavu koriste algoritme upravljanja za regulaciju istosmjerne struje i napona. Ukoliko su pretvarači priključeni na mrežu posredstvom regulacijskog transformatora, kombiniran je učinak regulacijske preklopke i upravljanja tiristorima pomoću struje *gate*-a. [1], [22]

Ključni pokazatelji dobro projektiranog HVDC sustava su:

- Minimiziranje fluktuacija istosmjerne struje prijenosa;
- Održavanje istosmjernog napona HVDC veze u okolini zadane radne točke;
- Odabir parametara tako da ne dolazi do neuspjeha komutacije;
- Održavanje što većeg faktora snage.

Slijedi da su moguća dva načina upravljanja svakim pretvaračem:

- 1) Održavanje konstantne istosmjerne struje (CC način rada) dok snaga prijenosa varira;
- 2) Održavanje konstantnog istosmjernog napona (CV način rada) dok snaga prijenosa varira.

Kako bi pretvarači radili tehnički ispravno te istovremeno održavali što viši faktor snage u mreži, potrebno je pravilno udesiti nominalni kut kašnjenja okidanja α_n (kod ispravljača) te nominalni kut prethođenja ekstinkcije γ_n (kod izmjenjivača). Za slučaj ispravljača najmanji dozvoljeni kut okidanja iznosi 5° kako bi se osigurao minimalan iznos pozitivnih volt-sekundi na svakom tiristoru za ispunjenje nužnog uvjeta za ponovni uklop¹³. Uobičajeno je podesiti nominalni kut kašnjenja okidanja između 15° i 20° — tako je osigurana dovoljno velika kutna rezerva u stacionarnom stanju, a da ne dolazi do značajnog smanjenja istosmjernog napona¹⁴, a taj istosmjerni napon se u dinamičkim uvjetima i dalje može povećati regulacijom u svrhu upravljanja tokom istosmjerne snage dok se ne dosegne kritični kut od 5° [9], [23]. Pretvarač koji radi kao izmjenjivač podložniji je komutacijskim neuspjesima (neuspjehu u komutaciji između ventila) te je stoga nužno osigurati izvršenje komutacije uz zadovoljavajuću rezervu. Preporuča se osigurati kut prethođenja ekstinkcije iznosa 15° za sustave nominalne frekvencije 50 Hz te 18° za sustave nominalne frekvencije 60 Hz kako bi se izvršila deionizacija tiristora prije ponovnog uklopa, odnosno prije invertiranja komutacijskog napona koje nastupa za $\alpha = 180^\circ$ ili $\gamma = 0^\circ$ [24], [25].

Jačina elektroenergetskog sustava u koji se razmatra integrirati HVDC ima značaj utjecaj na mogućnost integracije HVDC-a te na podešenje nazivne vrijednosti istosmjerne prijenosne snage (a time i struje i napona). Iz tog razloga se kao bitna fizikalna veličina za procjenjivanje jačine sustava uzima subtranzijentna snaga kratkog spoja koja je dana izrazom: [26]

¹³ Jednadžba (4-2) u poglavlju 4.2.1

¹⁴ Prema jednadžbi (4-5) je $U_{d\alpha} = U_{d0} \cos(\alpha)$, te je $\cos(20^\circ) \approx 0,94$

$$S_k'' = \sqrt{3} U_n I_k'' , \quad (4-33)$$

gdje je U_n nazivni linijski napon mreže, a I_k'' subtranzijentna struja trofaznog kratkog spoja koja se može izračunati kao:

$$I_k'' = \frac{E_n}{Z_{ekv}} = \frac{U_n}{\sqrt{3} Z_{ekv}} . \quad (4-34)$$

Subtranzijentna snaga u fizikalnom smislu nema značaja, jer je napon za vrijeme kratkog spoja približno jednak nuli, no usprkos tome subtranzijentna snaga je jedan od ključnih parametara, kako kod proračuna kratkih spojeva, tako i kod procjene jačine (krutine) sustava [26]. Mreža se prema Theveninovom teoremu u svakoj točki može nadomjestiti serijskim spojem naponskog izvorom nazivnog faznog napona E_n i ekvivalentne impedancije do te točke (Z_{ekv}) koja se da izraziti iz relacija za subtranzijentnu snagu i struju kao: [26]

$$Z_{ekv} = \frac{U_n^2}{S_k''} . \quad (4-35)$$

Može se zaključiti da što je veća subtranzijentna snaga, odnosno što je manja ekvivalentna impedancija do mjesta kvara, to je sustav jači ili krući. Kao značajna mjera relativne jačine AC sustava s integriranim HVDC sustavom uvodi se tzv. efektivni kratkospojni omjer snaga (ESCR¹⁵) definiran kao omjer subtranzijentne snage i nazivne istosmjerne snage HVDC pretvarača [1]:

$$ESCR = \frac{S_k''}{P_{d,n}} . \quad (4-36)$$

Prema autoru u [27], konvencionalna klasifikacija jačine sustava je kako slijedi:

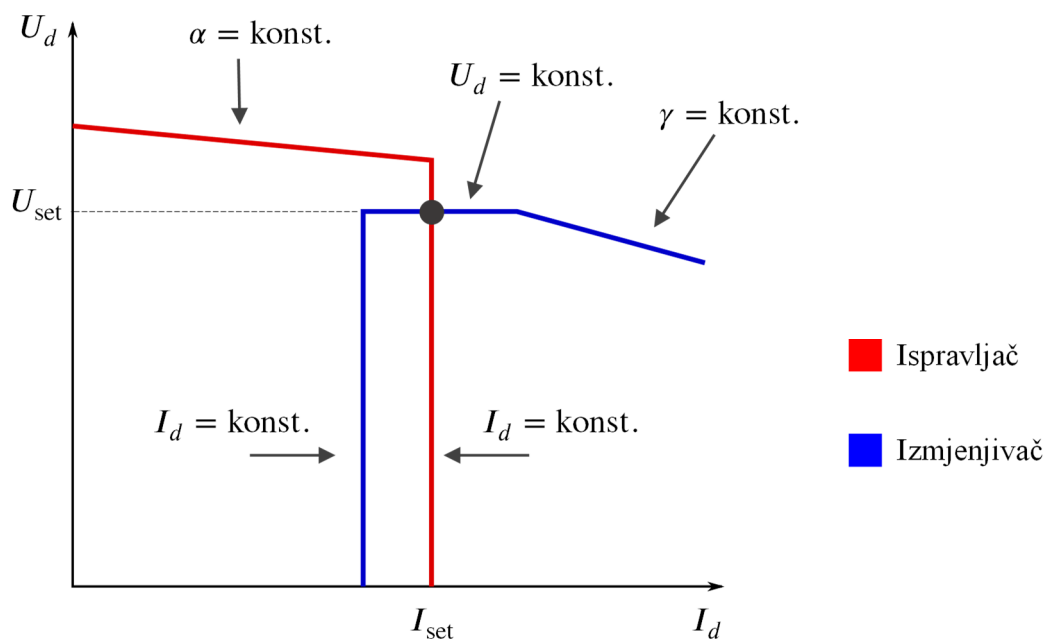
- Jačina sustava je visoka ako je $ESCR > 5$
- Jačina sustava je umjerena ako je $3 < ESCR < 5$
- Jačina sustava je niska ako je $ESCR < 3$.

Iz toga proizlazi kako je pri planiranju potrebno odabrati parametre HVDC sustava tako da se postigne što veći efektivni kratkospojni omjer snaga (5 ili više) kako bi sustav što blaže reagirao na poremećaje.

¹⁵ Engl. *Effective short-circuit ratio*

4.3.3. Upravljačke karakteristike pretvarača (usmjerivača)

Najčešća je praksa da jedan od pretvarača ima implementiran algoritam održavanja istosmjernje struje u zadanoj radnoj točki (CC način rada), dok drugi pretvarač ima implementiran algoritam za održavanje napona u zadanoj radnoj točki (CV način rada). U normalnim pogonskim uvjetima, uobičajeno je da ispravljač radi u CC načinu rada, a izmjenjivač u CV načinu rada. [18], [19]. Ukoliko su uvjeti takvi da izmjenjivač ne može održavati napon u zadanoj radnoj točki, on se prebacuje u γ_{\min} -način rada — to se dogodi kada kut prethođenja ekstinkcije padne na minimalnu podešenu vrijednost; takav način rada smanjuje mogućnost komutacijskih neuspjeha održavanjem adekvatne kutne rezerve [18]. Ako ispravljač ne može zbog nepogodnih uvjeta održavati istosmjernu struju u zadanoj radnoj točki, on se prebacuje u α_{\min} -način rada — to je slučaj kada kut kašnjenja okidanja padne na minimalnu podešenu vrijednost. Na Slici 4.16 prikazana je upravljačka karakteristika usmjerivača u stacionarnom stanju [18].

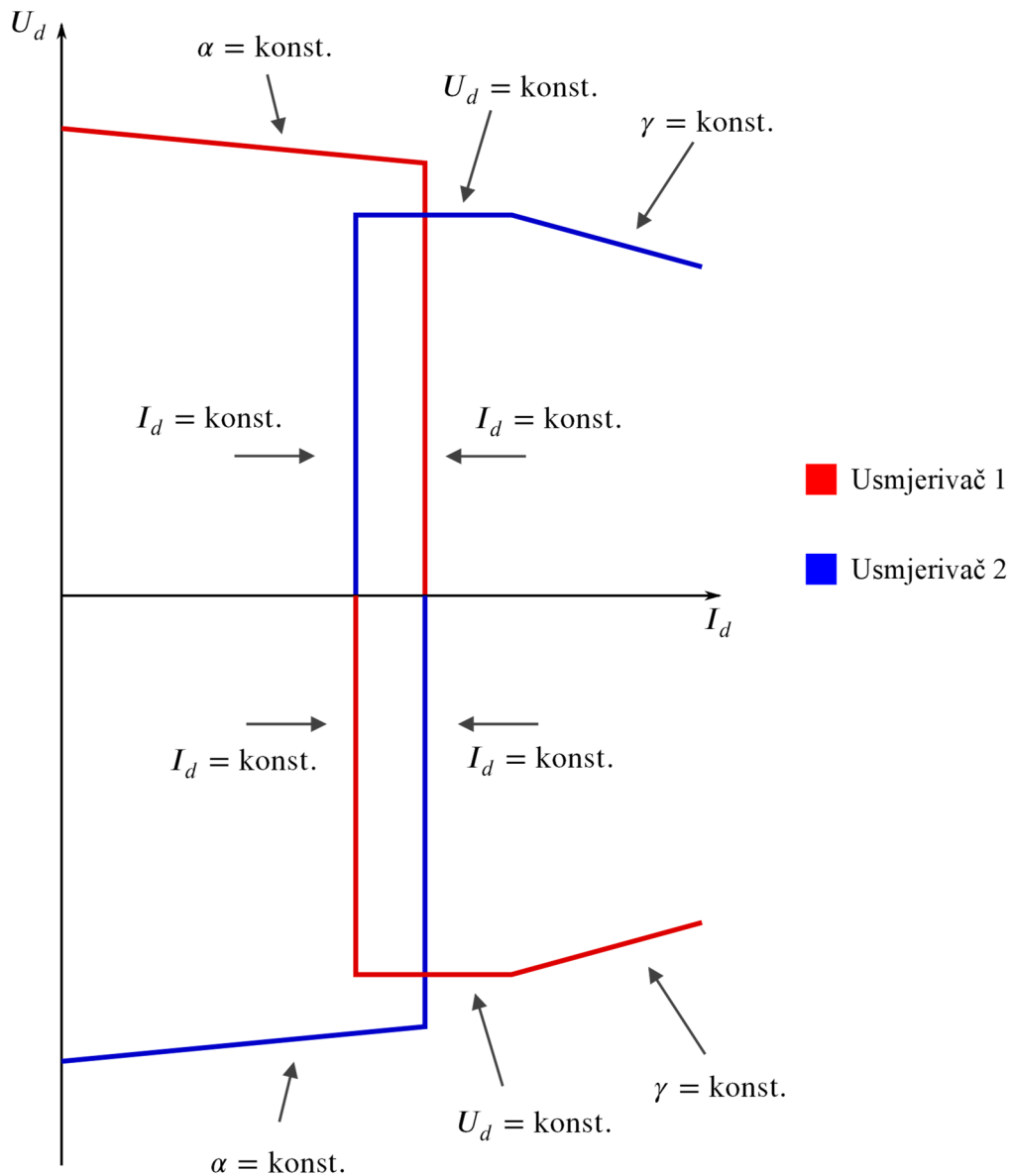


Slika 4.16: Upravljačka karakteristika usmjerivača u stacionarnom stanju za slučaj kada je tok snage pozitivan

Na karakteristici sa slike jasno se vidi kako je ispravljač u CC, a izmjenjivač u CV načinu rada; podešena radna točka grafički je predložena kao sjecište krivulje ispravljača i pretvarača te su

njene koordinate U_{set} i I_{set} . Iz koordinata radne točke odredi se snaga prijenosa kao $P_{d \text{ set}} = U_{\text{set}} I_{\text{set}}$.

Svaki pretvarač može raditi i kao ispravljač i kao izmjenjivač. Kada bi se obrnule uloge svakog od pretvarača došlo bi do mijenjanja smjera toka snage u HVDC-u. Prema svim prijašnjim zaključcima, u modelu je to zadovoljeno kada je $U_{\text{set}} < 0$ i $I_{\text{set}} > 0$. Iz toga se može izvesti cjelovita upravljačka karakteristika koja uračunava moguć obrat toka snage.

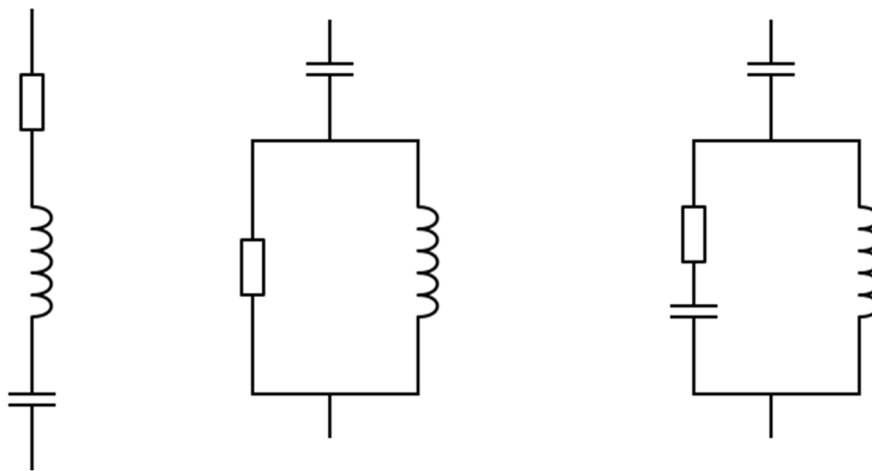


Slika 4.17: Cjelovita upravljačka karakteristika usmjerivača u stacionarnom stanju

U prvom kvadrantu usmjerivači rade regularno — tako da je tok snage pozitivan; usmjerivač 1 radi kao ispravljač, a usmjerivač 2 kao izmjenjivač. U trećem kvadrantu predznak snage je negativan, tj. tok snage je suprotan od referentnog te za to područje usmjerivač 1 radi kao izmjenjivač, a usmjerivač 2 radi kao ispravljač.

4.3.4. Kvaliteta električne energije i filtriranje višeharmonijskih veličina

Osim uređaja za kompenzaciju jalove snage koji su često potrebni u HVDC postrojenjima kako bi se nadomjestio „gubitak“ jalove snage uzrokovan nelinearnim trošilima (energetskim pretvaračima), često su prisutne okolnosti koje zahtijevaju ugradnju AC filtara za održavanje fizikalnih veličina kojima se opisuje kvaliteta električne energije u propisanim granicama. AC harmonijski filtri služe za apsorpciju generiranih viših harmonika, a ugrađuju se na isti način kao i kompenzatori jalove snage — na pretvaračkim sabirnicama poprečno su spojeni i uzemljeni. Tipični pasivni filtri koji se koriste u primjeni su serijski RLC filtar u kombinaciji s prigušnim visokopropusnim filtrom (engl. *damped high-pass filter*). [9]



Slika 4.18: Pasivni filtri: serijski filtar (lijevo), visokopropusni filtar drugog reda (u sredini) i visokopropusni filtar trećeg reda (desno)

Za optimalni dizajn harmonijskih filtara provodi se harmonijska analiza — određivanje impedancije sustava do pedesetog harmonika te se onda, uspoređujući dobivene rezultate-pokazatelje kvalitete s referentnim vrijednostima, prema potrebi podešavaju parametri filtara za poništavanje impedancije na dominantnim višim harmonicima.

Glavni indikator koji se koristi u harmonijskoj analizi jest harmonijska distorzija napona na h -tom harmoniku (D_h) te ukupna harmonijska distorzija napona (D_{eff}): [9]

$$D_h = \frac{\text{efektivna vrijednost napona na } h\text{-tom harmoniku}}{\text{efektivna vrijednost napona na osnovnom harmoniku}} = \frac{U(h)}{U(1)} \cdot 100 \quad [\%] \quad (4-37)$$

$$D_{\text{eff}} = \sqrt{\sum_{h=2}^{50} D_h^2} \quad [\%] \quad (4-38)$$

Prema ANSI/IEEE standardu 1030 za rad HVDC sustava, D_h treba bit manji od 1% za svaki harmonik, a D_{eff} manji od 5% pri normalnim pogonskim uvjetima¹⁶.

4.3.5. Utjecaj kvarova u mreži na rad HVDC veze

Kvarovi, kao što su kratki spojevi na AC dalekovodima i sabirnicama, imaju nezanemariv utjecaj na performanse HVDC sustava: nagle dinamičke promjene u sustavu mogu uzrokovati komutacijske neuspjehe i nemogućnost ustaljenja fizikalnih veličina HVDC sustava, a i drugih elemenata mreže, u stabilnu radnu točku. Prema tome je analiza i razumijevanje utjecaja kvarova u mreži nužna kod planiranja integracije HVDC sustava. Kada je kvar električki blizu izmjenjivačkoj sabirnici, dolazi do naglog smanjenja napona, što je upravo uzrok mogućih komutacijskih neuspjeha koji onemogućuju prijenos snage putem HVDC veze. Nakon prolaska ili čišćenja kvara, težnja je da se istosmjerni sustav ustali u (novu) stabilnu radnu točku kako bi se izbjegla tranzijentna nestabilnost i ispad sinkronih generatora u sustavu.

U jakim (krutim) sustavima, propadanje napona za vrijeme kvara je sporije i umjerenije pa je prema tome i oporavak i ustaljenje sustava nakon AC kvara puno vjerojatnije za jake sustave (sustavi s visokim ESCR). Slabi AC sustavi, naročito na strani izmjenjivača, često ne mogu priskrbiti dostatnu jalovu snagu potrebnu za održavanje HVDC prijensa, a time i za stabilnost cijelog sustava. Ukoliko je kvar prolaznog karaktera (karakteristično za prijenosnu mrežu visokog napona), ili pod pretpostavkom da sustav nadzora i zaštite očisti kvar dovoljno brzo, vrijeme potrebno da se sustav vrati u blisku okolinu svoje početne radne točke je u rasponu 100-500 ms [1]. Najvažnije utjecajne karakteristike AC sustava su ESCR, impedancija na višim harmonicima (do petog), inercija sustava i karakteristike tereta u neposrednoj blizini HVDC sustava [10].

¹⁶ Prema standardima, harmonijska analiza se izvršava samo do pedesetog harmonika

Zbog kompleksnosti velikih i jakih prijenosnih sustava, u koje se najčešće HVDC integrira, nužno je korištenje simulacijskih programa za proračune tokova snaga i analizu dinamičkih odziva i stabilnosti sustava. Dodavanjem pretvarača, istosmjernih vodova i potrebnih reaktivnih komponenti, koje su dio HVDC veze, mijenja se cjelokupna topologija mreže ili njena nadomjesna Theveninova shema, odnosno mijenjaju se parametri koji imaju utjecaj na dinamičke odzive cijelog analiziranog sustava. Tako da je za očekivati da će sustav drugačije reagirati na isti poremećaj ili kvar kada se u njega ugradi visokonaponski istosmjerni prijenos snage.

5. SIMULACIJSKI MODEL HVDC-LCC SUSTAVA U PRIJENOSNOJ MREŽI

U ovom poglavlju rada bit će, uz pomoć iznesene teorije u poglavlju 4, napravljena sinteza potpunog HVDC sustava LCC tipa koji se sastoji od dva šesteropulsna usmjerivača u jednopolnoj konfiguraciji, istosmjernog dalekovoda, prigušnica za izravnavanje struje te, dodatno, kondenzatora kao istosmjernog međukruga za izravnavanje i stabilizaciju napona. Model tog sustava bit će integriran u model stvarne prijenosne mreže vrlo visokog napona. Računalni program korišten za praktični dio ovog rada i provođenje simulacija je njemački *DIgSILENT PowerFactory* čija je namjena analiza proizvodnje, prijenosa i distribucije električne energije u elektroenergetskom sustavu. Konačni cilj praktičnog dijela je pomoću računalnih simulacija procijeniti stabilnost sustava prije i nakon integracije istosmjernog prijenosa te usporediti dobivene rezultate.

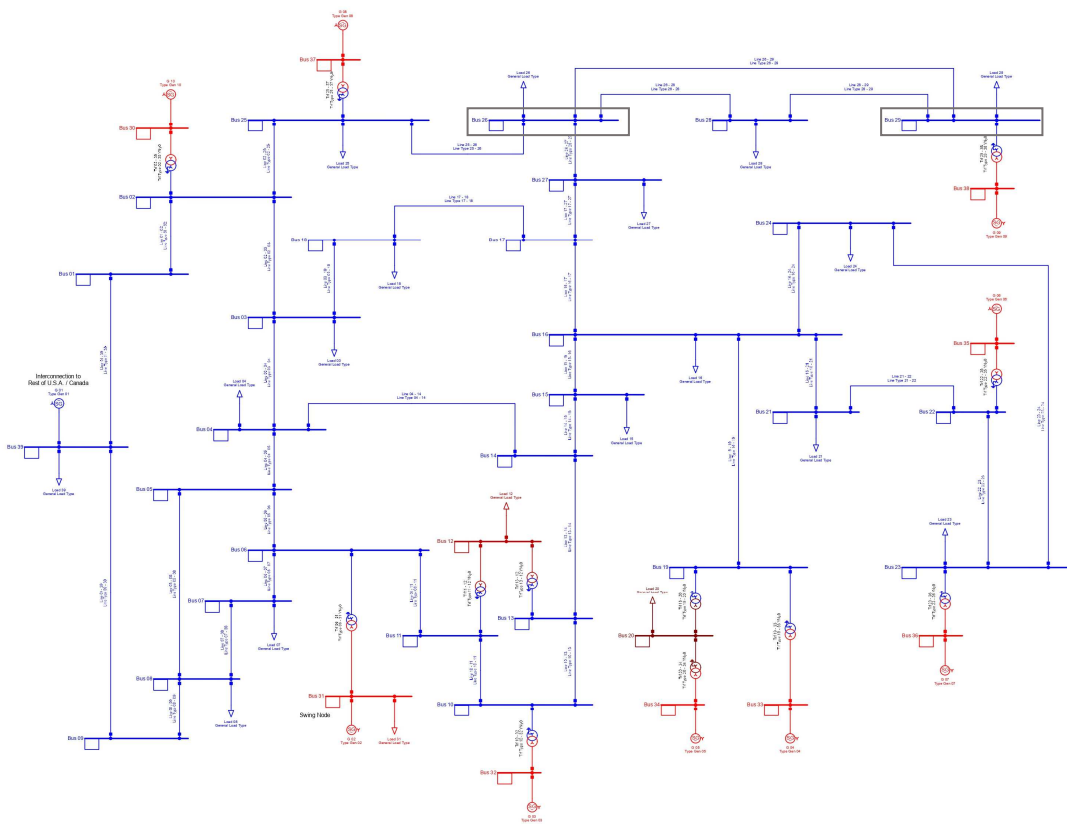
5.1. IEEE sustav s 39 sabirnica

IEEE sustav s 39 sabirnica (engl. *IEEE 39-Bus System*) je sustav poznat znanstvenoj i inženjerskoj zajednici, razvijen za testiranje i evaluaciju stabilnosti elektroenergetskog sustava, a prvi puta je, za studije tranzijentne stabilnosti, opisan 1979. godine [28]. Sustav predstavlja pojednostavljen model stvarne visokonaponske prijenosne mreže u regiji Nova Engleska (engl. *New England region*) na sjeveroistoku Sjedinjenih Američkih Država; sustav se sastoji od 10 sinkronih generatora, 39 sabirnica, 12 transformatora, 34 dalekovoda i 19 trošila. Nominalna frekvencija sustava je 60 Hz, a nominalni napon 345 kV [7]. Jednopolna električka shema ovog opisanog sustava u *DIgSILENT*-u prikazana je na **Slici 5.1**.

5.1.1. Sinkroni generatori

Generator G01 predstavlja interkonekciju ostatka prijenosnog sustava SAD-a s razmatranim sustavom te je kao takav najveće nazivne snage. Generator G02 je referentni stroj sustava, a sabirnica na koju je on spojen (*Bus 31*) je referentni čvor za koji je napon podešen na $0,982\angle 0^\circ$ pu [7]. Parametri sinkronih generatora, a i ostalih elemenata sustava, već su dani u

DIgSILENT-ovom modelu i dokumentaciji. Veličine relevantne za daljnja podešenja u ovom radu, vezane uz generatore, nalaze su u **Tablici 5.1**.



Slika 5.1: IEEE sustav s 39 sabirnica u *DIgSILENT*-u

Tablica 5.1: Podaci sinkronih generatora [7]

	S_n [MVA]	H [s]	X_d [pu]	X_q [pu]	X'_d [pu]	X'_q [pu]	X'' [pu]
G01	10000	5,000	2,0000	1,9000	0,6000	0,8000	0,4000
G02	700	4,329	2,0650	1,9740	0,4879	0,19000	0,35000
G03	800	4,475	1,9960	1,8960	0,4248	0,7008	0,3600
G04	800	3,375	2,0960	2,0640	0,3488	1,3280	0,2800
G05	300	4,333	2,0100	1,8600	0,3960	0,4980	0,2670
G06	800	4,350	2,0320	1,9280	0,4000	0,6512	0,3200

G07	700	3,771	2,0650	2,0440	0,3430	1,3020	0,3080
G08	700	3,471	2,030	1,9600	0,3990	0,6377	0,3150
G09	1000	3,450	2,1060	2,0500	0,5700	0,5870	0,4500
G10	1000	4,200	1,0000	0,6900	0,3100	0,5000	0,2500

Oznake fizikalnih veličina iz tablice su:

- S_n — nazivna (prividna) snaga
- H — inercijska konstanta
- X_d — reaktancija d -osi
- X_q — reaktancija q -osi
- X'_d — tranzijentna reaktancija d -osi
- X''_q — tranzijentna reaktancija q -osi
- $X'' = X'_d = X''_q$ — subtranzijentna reaktancija.

Svi generatori u sustavu, osim G01, opremljeni su automatskom regulacijom napona (AVR — *Automatic voltage regulator*) i primarnom regulacijom brzine turbine (engl. *Speed governor*); na taj način se vlada generatorom kako bi on, u kontekstu stabilnosti, imao što bolji dinamički odziv na promjene. AVR je sistem uzbude IEEE tip 1 čija je blokovska shema i opis dan u [29]. Primarni regulator za generatore G02-G09 je IEEE tip G1 (parna turbina), a za generator G10 IEEE tip G3 (hidro turbina) [7], [30]. Primarni regulator upravlja protokom radnog medija na rotor — u slučaju poremećaja će se promijeniti protok kako bi se u što boljoj mjeri neutralizirale promjene u mreži koje uzrokuju mijenjanje električnog momenta na rotor. AVR djeluje tako da se mijenjanjem uzbude generatora nastoji održavati napon na nekoj od sabirnica „iza“ generatora, ili na generatorskoj sabirnici.

5.1.2. Trošila

Kod proračuna tokova snaga, za terete se u simulaciji pretpostavlja idealno kruta naponska karakteristika — smatra se da su djelatna i jalova snaga tereta neovisne o naponu. No, za potrebe dinamičkih simulacija u kojima su prisutne jake fluktuacije napona pri poremećajima,

tereti (trošila) u mreži modeliraju se kao naponski ovisan potrošač — na taj način se osiguravaju realniji odzivi u prijenosnoj mreži gdje se ekvivalentni potrošač tretira kao ostatak izvoda mreže u kojem je kombinacija rezistivnih i motornih trošila. Jednadžbe tereta su dakle: [2]

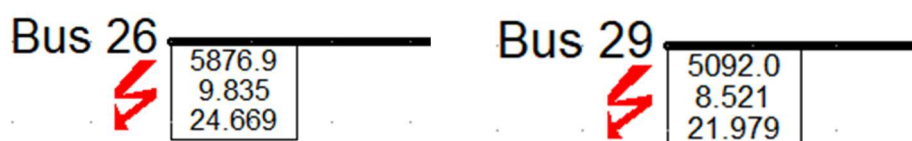
$$P = P_0 \left(\frac{U}{U_0} \right)^{k_{PU}} \quad (5-1)$$

$$Q = Q_0 \left(\frac{U}{U_0} \right)^{k_{QU}}, \quad (5-2)$$

gdje su P_0 i Q_0 djelatna i jalova snaga u stacionarnoj radnoj točki u početnom stanju — one se, uz U_0 , lako dobiju pokretanjem naredbe za proračun tokova snaga u softveru (*Calculate Load Flow*) ili kalkulaciju početnih uvjeta (*Calculate Initial Conditions*). U modelu mreže je postavljeno $k_{PU} = 1$ i $k_{QU} = 2$ čime se prezentira strujno-nepromjenjiv režim za djelatnu snagu i impedancijsko-nepromjenjiv režim za jalovu snagu. Iz toga slijedi kako je djelatna snaga linearna, a jalova snaga kvadratna funkcija napona.

5.2. Selekcija čvorova izvorne mreže prema uvjetima za integraciju HVDC prijenosa

U mreži koja je predmet istraživanja, plan je povezati dvije udaljene sabirnice pomoću HVDC veze koju će činiti dva pretvarača i istosmjerni dalekovod te reaktivne komponente za poboljšavanje harmonijskog spektra. Sabirnice od interesa su sabirnica 26 i sabirnica 29 nominalnog napona 345 kV (uokvirene sivim okvirom na **Slici 5.1**), kao dvije najudaljenije sabirnice izravno povezane AC dalekovodom. Pokretanjem naredbe za proračun trofaznog kratkog spoja na sabirnicama prema IEC 60909 standardu, dobiju se sljedeći rezultati: za sabirnicu 26 subtranzijentna snaga iznosi 5876,9 MVA, a za sabirnicu 29 5092 MVA (vidljivo na isječcima zaslona na **Slici 5.2**).



Slika 5.2: Rezultati proračuna kratkog spoja za sabirnice 26 i 29

Osim subtranzijentne snage kratkog spoja, važan pokazatelj u planiranju ugradnje HVDC prijenosa je inercija sustava. Ukupna ili ekvivalentna inercijska konstanta izmjeničnog sustava da se izračunati kao kvocijent ukupne kinetičke energije rotacije svih generatora i sume nazivnih snaga generatora. U ovom slučaju gdje je 10 generatora u sustavu, bit će

$$H_{uk} = \frac{\sum_{i=1}^{10} H_i S_i}{S_{uk}} \quad (5-3)$$

Uvrštavanjem vrijednosti iz tablice dobije se:

$$H_{uk} = \frac{751222,1 \text{ MVA}\cdot\text{s}}{16800 \text{ MVA}} = 4,47155 \text{ s} \quad (5-4)$$

Kod sustava s integriranim istosmjernim prijenosom, uvodi se nova fizikalna veličina — ekvivalentna inercijska konstanta DC sustava:

$$H_{DC} = H_{uk} \frac{S_{uk}}{P_{d,n}} \quad (5-5)$$

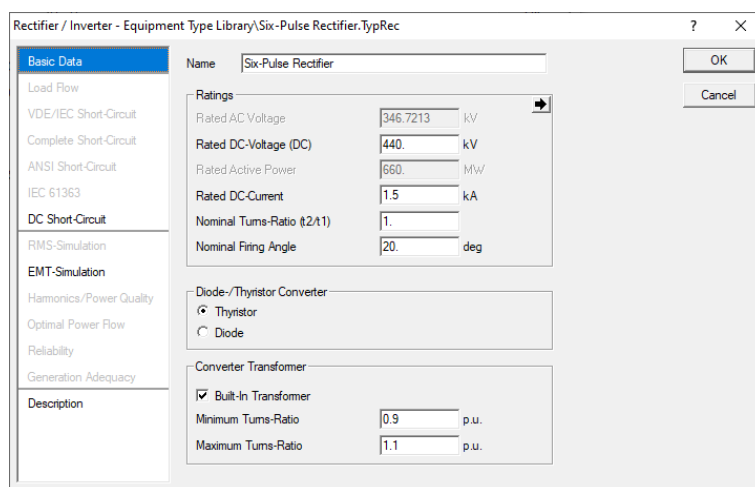
Ona se definira kao omjer ukupne kinetičke energije sustava i nazivne istosmjerne snage pretvarača. Težnja je, naravno, realizirati što veću DC inercijsku konstantu, odnosno imati sustav u kojem je nazivna istosmjerna snaga višestruko manja od ukupne snage sinkronih generatora. Slabim i nepovoljnim sustavom za integraciju smatra se onaj koji ima DC inercijsku konstantu manju od 2,5-3.

Kratkospojni omjer snaga SCR¹⁷ početni je pokazatelj koji se razmatra kada se procjenjuje pogodnost sustava za integraciju HVDC-a. On je na električkoj lokaciji mreže definiran kao omjer subtranzijentne snage kratkog spoja i nazivne istosmjerne snage. S obzirom na to da se uvođenjem HVDC-a mijenjaju parametri mreže, kratkospojni omjer snaga treba u početnoj pretpostavci biti veći nego što bi ESCR bio, kako bi se osigurao adekvatan rad pretvarača zbog mogućnosti smanjenja subtranzijentne snage. Prema rezultatima simulacije (**Slika 5.2**), subtranzijentna snaga sabirnice 29 manjeg je iznosa nego ona sabirnice 26, te je stoga sabirnica 29 uzeta kao referenca za daljnje planiranje integracije.

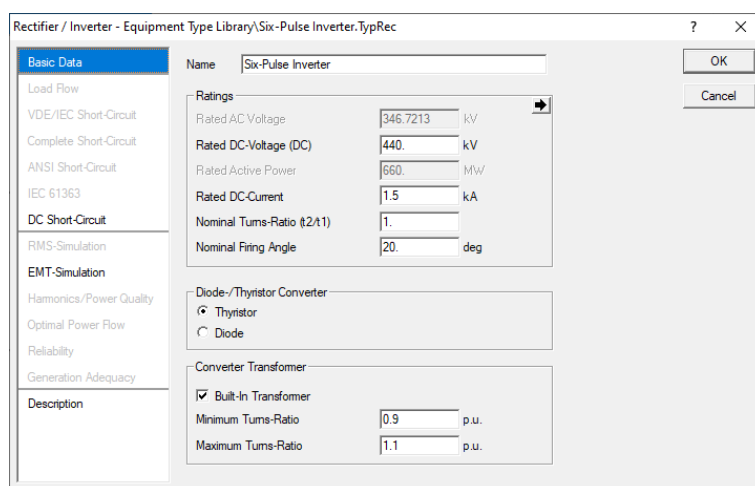
¹⁷ SCR nije ekvivalentan parametru ESCR. SCR uzima u obzir snagu kratkog spoja u originalnoj mreži (bez HVDC-a), dok se u formulu za ESCR unosi snaga kratkog spoja u promijenjenom sustavu (s HVDC-om)

5.3. Odabir parametara HVDC veze za simulaciju

Kao što je već spomenuto, u ovom radu, gdje se poglavito razmatra utjecaj HVDC-a na stabilnost sustava, bit će integrirana jednostavna jednopolna konfiguracija u kojoj će svaki pretvarač biti spojen na 345-kV AC sabirnicu. HVDC podrazumijeva prijenos na vrlo visokom naponu, kako bi se minimizirali gubitci na dalekovodu uzrokovani istosmjernom strujom; stoga će biti utvrđen napon od 440 kilovolti kao nazivni istosmjerni napon praznog hoda pretvarača. S obzirom na to da je potrebno osigurati omjer $ESCR > 5$, nazivna struja pretvarača uzeta je da bude 1,5 kA — što daje dovoljno velik SCR: $SCR \approx 7,4$.



Slika 5.3: Projektni tip šesteropulsnog ispravljača koji se dodjeljuje elementu pretvarača ispravljača u grafičkom prikazu mreže



Slika 5.4: Projektni tip šesteropulsnog izmjenjivača koji se dodjeljuje elementu pretvarača izmjenjivača u grafičkom prikazu mreže

Kao što se vidi na prethodne dvije slike, za oba pretvarača je, prema relacijama (4-5) i (4-15), odabran nominalni kut okidanja 20° ($\alpha_{nr} = \beta_{ni} = 20^\circ$), jer za određen istosmjerni napon od 440 kV kut okidanja mora biti definiran tako da podešenje (približno) odgovara nominalnom izmjeničnom naponu mreže — konkretno, dobije se 346,72 kV (vidljivo na prikazu na slikama), što je praktički zanemarivo odstupanje od 345 kV. Kod definiranja parametara za proračune u *DIGSILENT*-u, definiran je raspon kuta okidanja tako da je minimalni kut 10° , a maksimalan 150° ; što je sukladno teorijskim razmatranjima iz poglavlja 4.

Prema uzoru na HVDC LCC *Benchmark* model [8], [11], uzeti su sljedeći uzdužni jedinični parametri 450-kV istosmjernog dalekovoda¹⁸:

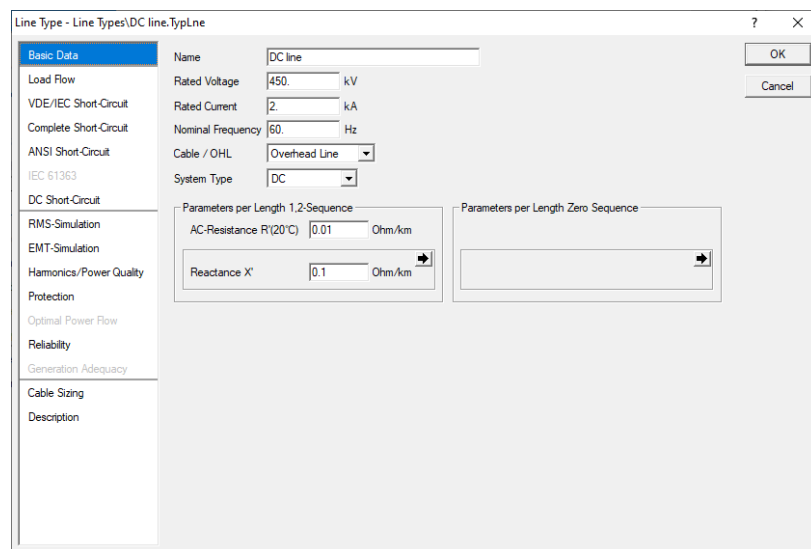
$$\begin{aligned} R_{1,DV} &= 0,01 \text{ } \Omega/\text{km} \\ X_{1,DV} &= 0,1 \text{ } \Omega/\text{km} \end{aligned} \quad (5-6)$$

Kako bi sustav bio što sličniji izvornom, duljina istosmjernog voda bit će 300 km, što daje ekvivalentni otpor i osnovnu reaktanciju:

$$\begin{aligned} R_{DV} &= 0,01 \text{ } \Omega/\text{km} \cdot 300 \text{ km} = 3 \text{ } \Omega \\ X_{DV} &= 0,1 \text{ } \Omega/\text{km} \cdot 300 \text{ km} = 30 \text{ } \Omega \end{aligned} \quad (5-7)$$

To znači da je direktna impedancija dalekovoda na osnovnom harmoniku jednaka

$$Z_{DV}(1) = \sqrt{R_{DV}^2 + X_{DV}^2} = 30,15 \text{ } \Omega, \quad (5-8)$$



Slika 5.5: Podešenje projektng tipa istosmjernog dalekovoda

¹⁸ Realan scenarij za prijenosnu mrežu vrlo visokog napona: $X/R \sim 10$.

a impedancija za istosmjerne vrijednosti:

$$Z_{DV}(0) = R_{DV} = 3 \Omega . \quad (5-9)$$

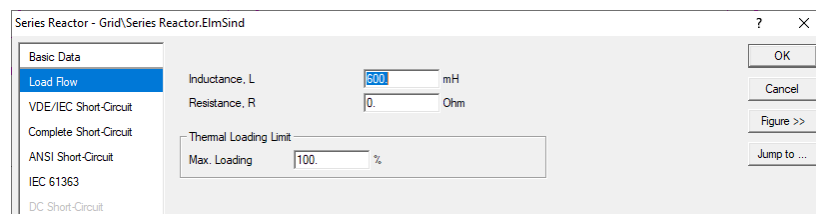
Nakon definiranja parametara pretvarača i istosmjernog voda, potrebno je uvesti reaktivne komponente — prigušnice za izravnavanje (engl. *smoothing reactors*) i kondenzator za stabilizaciju napona (engl. *shunt capacitor*). Budući da se sustav sastoji od dva pretvarača, bit će serijski integrirane dvije prigušnice, jedna na strani ispravljača i druga na strani izmjenjivača, kako bi se osiguralo filtriranje viših harmonika struje prijenosa, tj. kako bi se dobila glatka struja. U teorijskim razmatranjima uzimalo se da je prigušnica beskonačnog induktiviteta, no u praktičnoj primjeni iznos induktiviteta treba biti dovoljno velik, tako da su svi harmonici struje zanemarivi u odnosu na nulti. Impedancija prigušnice na h -tom harmoniku, uz pretpostavku zanemarivanja otpora namotaja, je:

$$\overline{Z}_L(h) = jh\omega L , \quad (5-10)$$

gdje je ω osnovna kutna frekvencija (376,8 rad/s u slušaju nominalne frekvencije 60 Hz), a L induktivitet prigušnice. Cilj je da induktivitet prigušnice budu takav da je njena impedancija na svakom harmoniku mnogo veća od impedancije dalekovoda za istosmjerne vrijednosti. Predložen induktivitet je 600 mH, što implicira:

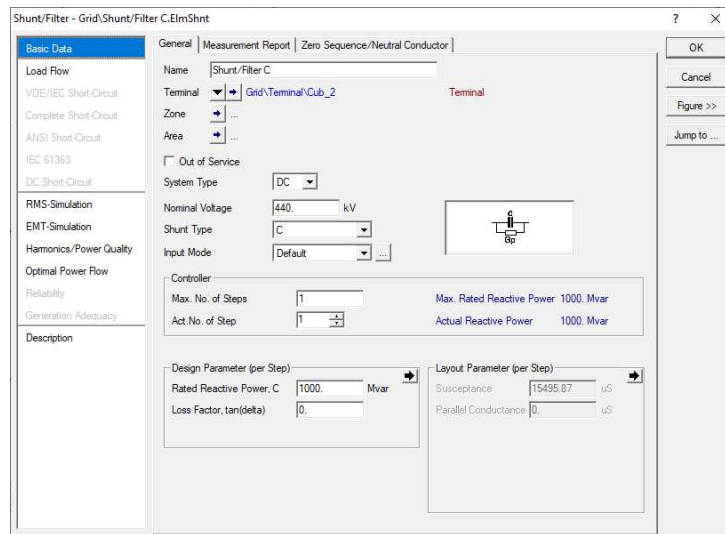
$$\overline{Z}_L(h) = jh226,08 \Omega . \quad (5-11)$$

Na osnovnom harmoniku, taj iznos je 226,08 Ω , a na svakom sljedećem harmoniku impedancija je odgovarajući višekratnik osnovne impedancije (452,16 Ω , 678,24 Ω , ...). Prema ovim brojčanim vrijednostima se vidi da su izneseni teorijski zahtjevi zadovoljeni.

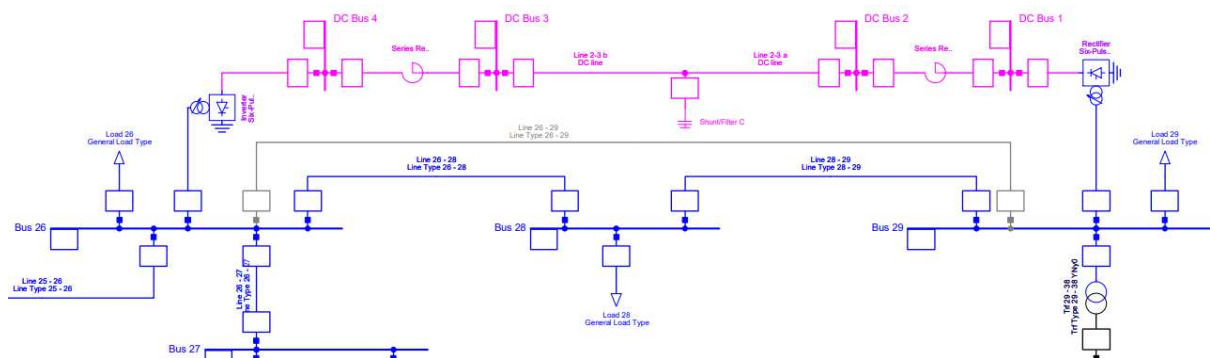


Slika 5.6: Podešenje parametara serijskih prigušnica: $L = 600$ mH, $R = 0 \Omega$

Poprečni kondenzator postavlja se na jednaku električnu udaljenost između ispravljačke i izmjenjivačke DC sabirnice — na sredinu dalekovoda, tj. na 150. kilometar. Za nominalni napon 440 kV i nazivnu jalovu snagu 1000 Mvar, odgovarajuća susceptancija je 15,5 mS.



Slika 5.7: Podešenje parametara poprečnog kondenzatora: $Q_{C,n} = 1000$ Mvar, $U_n = 440$ kV, $G = 0$ μ S



Slika 5.8: Grafički jednopolni prikaz dizajniranog sustava u *DIGSILENT*-u (istosmjerni dio je roze boje)

Nadalje je potrebno, na isti način kao i u izvornom sustavu, izvršiti proračun kratkih spojeva kako bi se dobila subtranzijentna snaga kratkog spoja kao mjerodavna fizikalna veličina za

evaluaciju jačine (krutine) sustava. Rezultati proračuna za sabirnice 26 i 29 nalaze se na sljedećoj slici.



Slika 5.9: Rezultati proračuna kratkog spoja za sabirnice 26 i 29 uz integrirani HVDC sustav

Uspoređujući **Sliku 5.2** i **Sliku 5.9** jasno je kako se subtranzijentna snaga kratkog spoja smanjila na 5339,5 MVA za sabirnicu 26 i na 4417,2 MVA za sabirnicu 29. Slijedi provjeriti hoće li ESCR biti dovoljno velik, tj. hoće li sustav biti dovoljno jak za integraciju HVDC sustava. Prema već definiranim relacijama, za sabirnicu 29 (gdje je sustav slabiji), dobije se

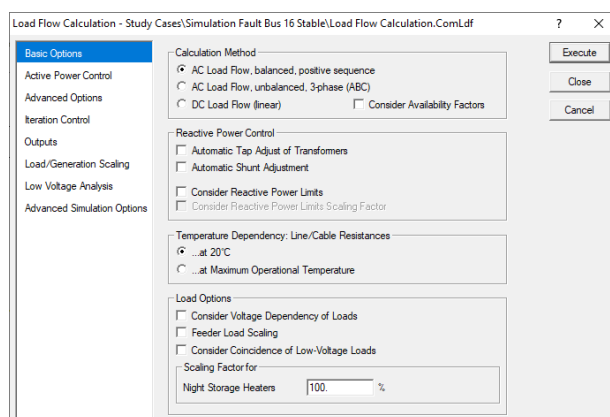
$$ESCR = \frac{4417,2 \text{ MVA}}{440 \text{ kV} \cdot 1,5 \text{ kA}} = 6,6926 \approx 6,7 . \quad (5-12)$$

Iz navedenog proizlazi da su odabrani parametri HVDC sustava prigodni s obzirom na stanje razmatrane prijenosne mreže, jer je ESCR veći od 5 uz dovoljno rezerve.

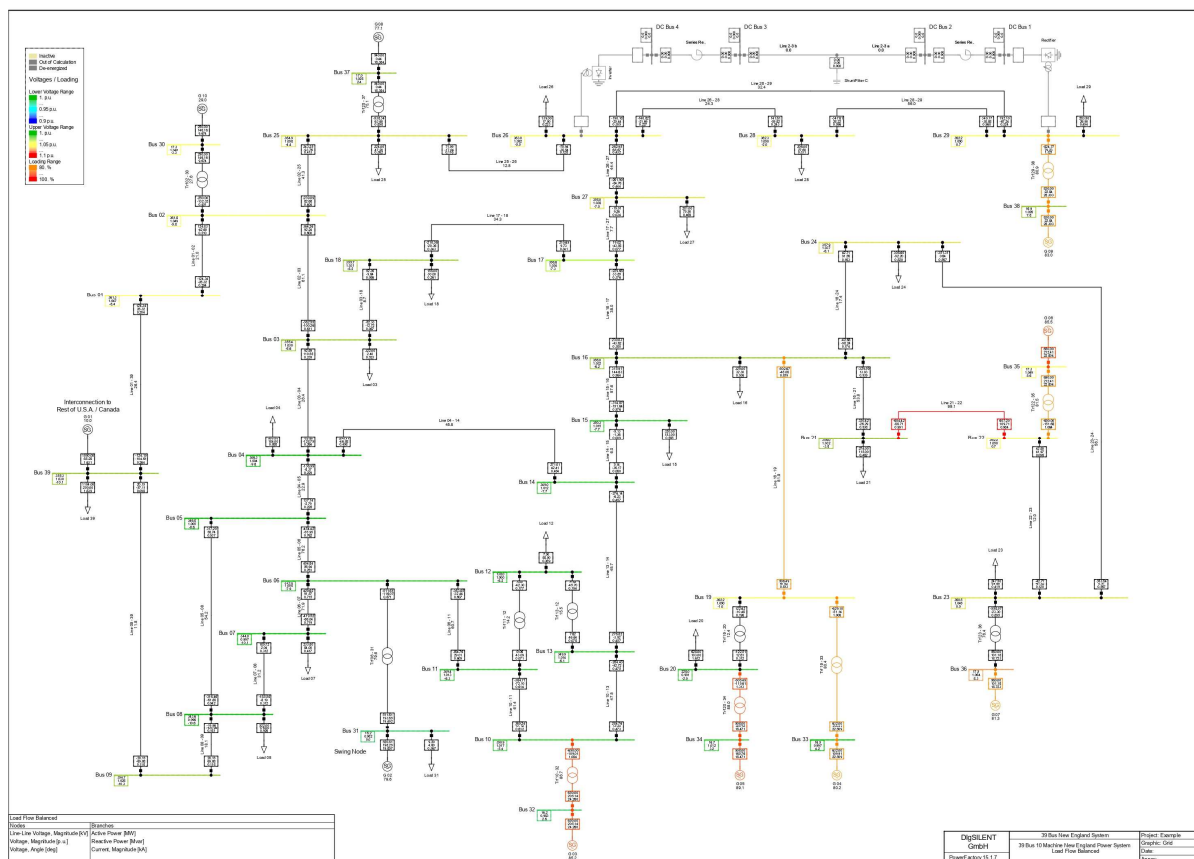
5.4. Tokovi snaga u mreži

5.4.1. Slučaj bez integriranog HVDC sustava — izvorna mreža

Prije same analize naponskih prilika u mreži uz integrirani HVDC, potrebno je izvršiti proračun tokova snaga za izvornu mrežu.

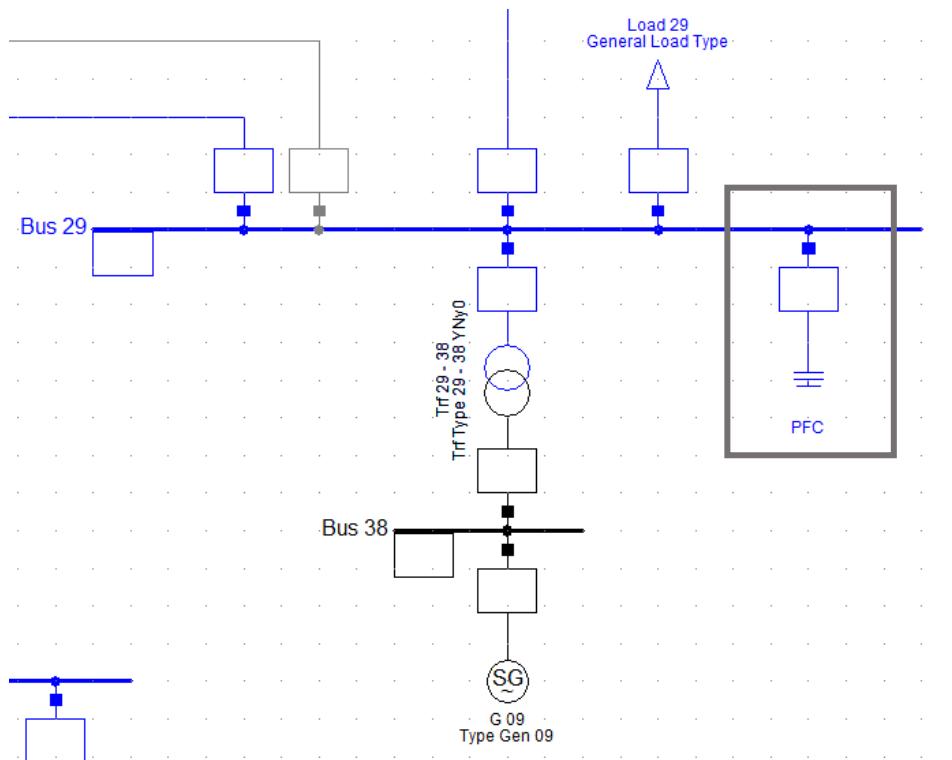


Slika 5.10: Izvršenje naredbe za proračun tokova snaga u mreži

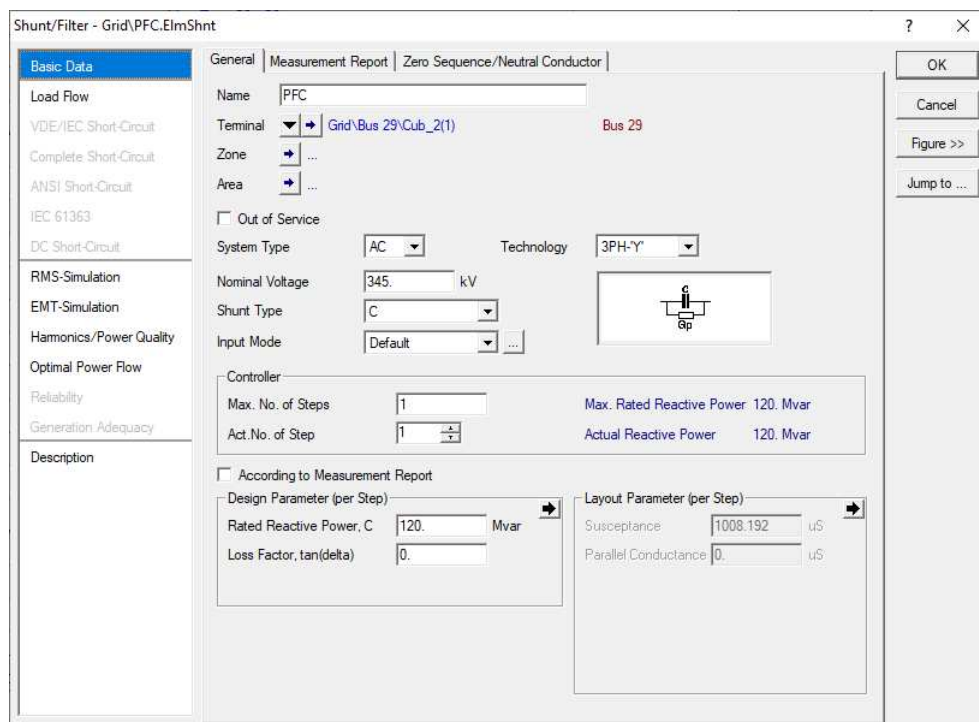


Slika 5.11: Rezultati proračuna tokova snaga u mreži bez HVDC sustava

Prema rezultatima na **Slici 5.11**, linijski naponi sabirnica 26 i 29 nešto su veći od nominalnog — 363,0 kV (1,052 pu) za sabirnicu 26 te 362,2 kV (1,050 pu) za sabirnicu 29; a opterećenje generatora G09, koji je električki najbliže HVDC-u je 83,0%. S obzirom na to da su HVDC pretvarači značajni potrošači induktivne jalove snage, njihova ugradnja promijenit će naponske prilike u bliskoj okolini, te će generator G09 raditi s većim opterećenjem kako bi priskrbio skok u potražnji induktivne jalove snage. Kako bi se to izbjeglo, odnosno kako bi se mreža dovela u radnu točku približnu onoj u slučaju bez HVDC-a, potrebno je ugraditi sustav kompenzacije jalove snage. Najjednostavniji način je pasivno trošilo kapacitivne jalove snage čije nazivno opterećenje odgovara potrošnji pretvarača. Iz toga slijedi da će na sabirnicu 29, na koju je posredstvom transformatora priključen generator G09, biti ugrađeni poprečni kondenzatori u Y-spoju. Pri određivanju nazivne jalove snage kompenzacijskog sustava treba primijeniti relaciju (4-12), što dovodi do podešenja od 120 Mvar.



Slika 5.12: Prikaz spajanja kompenzacije jalove snaga na sabirnicu 29 u grafičkom sučelju (uokvireno sivim okvirom)



Slika 5.13: Podešenje parametara kapacitivnog trofaznog sustava kompenzacije

Filtriranje viših harmonika koje nelinearni karakter HVDC sustava prouzrokuje još je jedan bitan razlog za ugrađivanje kondenzatorskog filtra.

5.4.2. Integriranje HVDC sustava u mrežu

Nakon proračuna tokova snaga i utvrđivanja nazivnih vrijednosti fizikalnih veličina istosmjerne veze, sljedeći korak je uvođenje komutacijskog induktiviteta, tj. kuta preklapanja u analizu. Cilj je izvršiti proračun tokova snaga za realan scenarij — prema obrađenoj literaturi, prikladan kut preklapanja je 10° pri nominalnom izmjeničnom naponu mreže. Za odabranu istosmjernu struju jakosti 0,8 kA kao radnu točku pretvarača te pretpostavljenu vrijednost kuta preklapanja, odgovarajući komutacijski induktivitet je prema relaciji (4-25)

$$X_k = \frac{U_{LL}[1 - \cos(\mu)]}{\sqrt{2}I_d} = 4,63 \Omega . \quad (5-13)$$

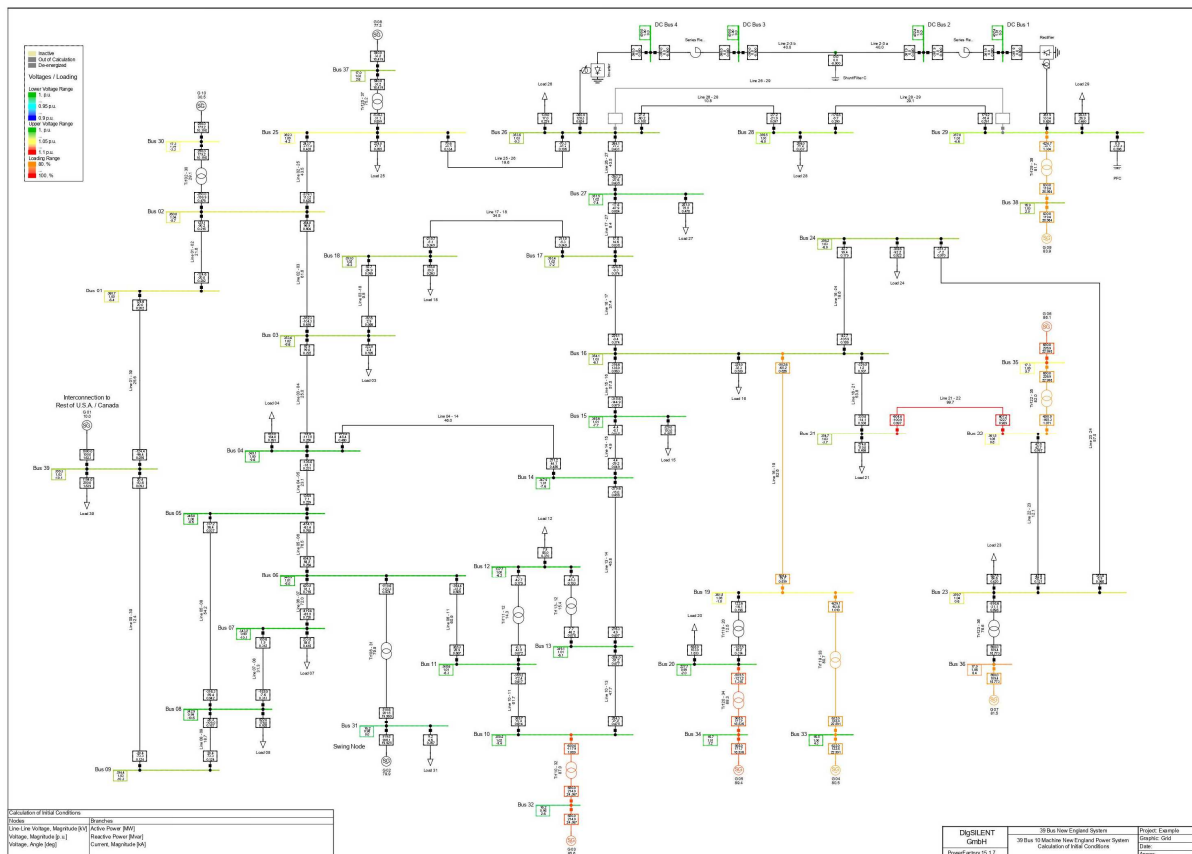
Prema teorijskom pregledu i analizi rada i regulacije tiristorskih pretvarača HVDC sustava (poglavlje 4.3.2), referentni ispravljač je podešen da radi u CC načinu rada, a referentni izmjenjivač da radi u CV načinu rada — to znači da integrirani sustav regulacije osigurava da izmjenjivač održava napon prema zadanoj radnoj točki koja odgovara nominalnom DC naponu izmjenjivačke sabirnice, a ispravljač održava istosmjernu struju podešene radne točke. S obzirom na povišene napone u mreži, nominalni istosmjerni napon izmjenjivačke sabirnice korigiran je na 450 kV, a nominalni kut okidanja ostavljen je na 20° za oba pretvarača (što odgovara linijskom AC naponu od 354,6 kV).

Uzevši u obzir podešenu statičku radnu točku HVDC veze (450 kV; 0,8 kA), istosmjerna snaga prijenosa u stacionarnom stanju bit će

$$P_d = U_d \cdot I_d = 450 \text{ kV} \cdot 0,8 \text{ kA} = 360 \text{ MW} . \quad (5-14)$$

Gubici prijenosa procjenjuju se prema djelatnim otporima HVDC sustava: oni se mogu izračunati samo kao pad napona na ekvivalentnom uzdužnom otporu dalekovoda, s obzirom na to da su gubici vođenja tiristora zanemareni u simulaciji:

$$\Delta P_d = R_{DV} \cdot I_d^2 = 3 \Omega \cdot (0,8 \text{ kA})^2 = 1,92 \text{ MW} . \quad (5-15)$$



Slika 5.14: Rezultati proračuna tokova snaga u mreži s HVDC sustavom

Prema proračunima tokova snaga, vidljivo je sljedeće: naponi izmjenjivačke (sabirnica 26) i ispravljačke AC sabirnice (sabirnica 29) su nešto većih iznosa od nazivnog — 1,03 pu; a opterećenje generatora G09 je samo nešto veće nego u prošlom scenariju — za 0,9%. Kao što je navedeno, upravljanje izmjenjivača je podešeno tako da on nastoji održavati zadani nominalni napon izmjenjivačke sabirnice na DC strani¹⁹, koji je u ovom slučaju 450 kV, te je proračunom to potvrđeno — na slici je vidljivo kako je napon DC sabirnice 4 jednak 1,00 pu, tj. 450 kV. Kako bi se to nadomjestilo, napon DC sabirnice ispravljača²⁰ mora biti nešto veći, zbog postojećih gubitaka prijenosa: on prema proračunu u softveru iznosi 1,01 pu, tj. 452,4 kV. Gubici su prema relaciji (5-15) procijenjeni na 1,92 MW, a to odgovara rezultatima dobivenima proračunom tokova snaga prema kojem je tok djelatne snage DC sabirnice 2 i DC sabirnice 3 jednak 361,9 MW i 360 MW, tim redoslijedom. Ta razlika u toku snage od 1,9 MW upravo odgovara razlici između napona DC sabirnice ispravljača i izmjenjivača: $\Delta U = \Delta P_d / I_d$. Iznos djelatne snage od 360 MW i jest podešena radna točka

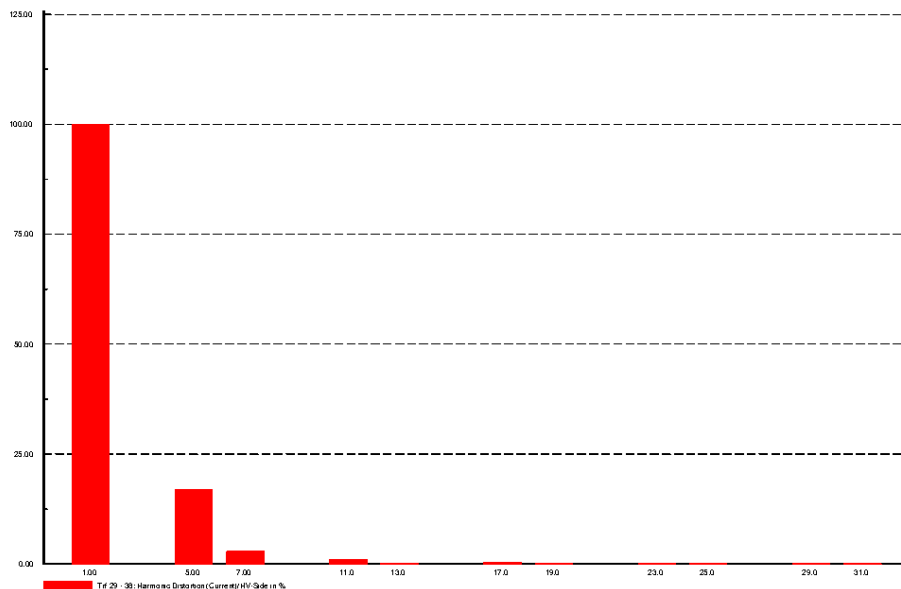
¹⁹ Sabirnica “DC Bus 4” na snimci zaslona

²⁰ Sabirnica “DC Bus 1” na snimci zaslona

HVDC sustava, a to je tok snage od izmjenjivača prema ostatku mreže. Kao što je već rečeno, pretvarači su zbog svog izraženog nelinearnog karaktera značajni potrošači induktivne (pozitivne) jalove snage — zbog toga je tok jalove snage iz mreže u ispravljač te iz mreže u izmjenjivač postojan, a nula u samom istosmjernom dijelu sustava (iako dalekovod/kabel DC veze ima uzdužni induktivitet). Još jedno opažanje vezano za proračun tokova snaga je efektivna vrijednost linijske struje na AC strani pretvarača: struja na AC strani svakog pretvarača je 0,624 kA, što potvrđuje aproksimaciju (4-28) koja nalaže da je omjer izmjenične i istosmjerne struje otprilike jednak 0,78: $0,624 / 0,8 = 0,78$

Kvaliteta električne energije — analiza harmonijskog spektra

Osim značajne potrošnje jalove snage, pretvarači kao nelinearni teret velike nazivne snage u mrežu unose više strujne harmonike harmonike i time narušavaju načela kvalitete električne energije, o čemu je raspravljano u poglavlju 4.3.4. Sabirnice koje su ponajviše zahvaćene utjecajem nelinearnosti ispravljača i izmjenjivača su, naravno, AC sabirnica ispravljača i AC sabirnica izmjenjivača. Pokretanjem funkcije za harmonijsku analizu (*Harmonic Load Flow*) može se dobiti grafički prikaz udjela pojedinačnih viših harmonika struje u odnosu na osnovni u obliku stupčastog dijagrama. Rastav u Fourierov red koji je dan relacijom (4-6) upućuje na to da će biti prisutni viši harmonici struje (dominantno peti i sedmi).



Slika 5.15: Harmonijski spektar struje VN strane transformatora 29-38

Uvidom u **Sliku 5.15** primjetni su rezultati kakvi su i očekivani: značajan doprinos imaju peti i sedmi harmonik te ih je potrebno isfiltrirati. Modernije napredne metode temelje se na

primjeni aktivnih filtara koji imaju sposobnost injekcije struje harmonika koje je u mreži potrebno filtrirati te je u *DIgSILENT*-u moguće to implementirati korištenjem aktivnog strujnog izvora. Budući da je područje aktivnog filtriranja signala vrlo opsežno, u ovom radu će biti ukratko pokazano kako se ugradnjom pasivnih elektroničkih RLC filtara može postići zadovoljavajući učinak apsorpcije viših harmonika u mreži. Još jedan razlog odabira pasivnog filtriranja kao metode je taj da u ovom projektu pri normalnom pogonskom radu ne dolazi do vremenskih oscilacija fizikalnih veličina od interesa vezanih za istosmjerni prijenos koji je uzrok harmonijske distorzije te stoga nisu potrebne napredne metode nadzora harmonijskog spektra i injekcije struja potrebnih viših harmonika. Potrebno je identificirati koji su harmonici prisutni pri radu pretvarača te projektirati pasivni filter tako da mu rezonancijska frekvencija odgovara redu harmonika kojeg treba filtrirati. Prema navedenom će biti poprečno na sabirnicu 29 ugrađeni rezonancijski pasivni filtri s rezonancijskom frekvencijom ugođenom na peti (300 Hz) te sedmi harmonik (420 Hz).

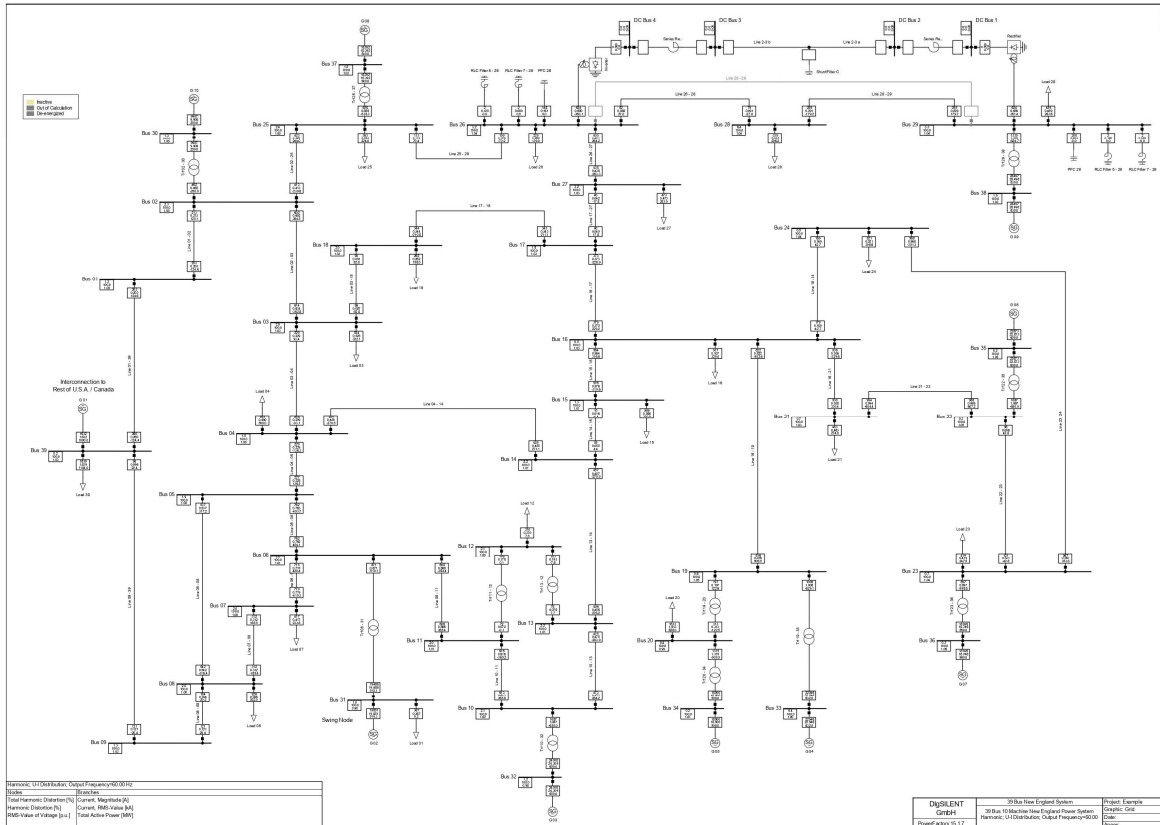


Slika 5.16: Harmonijski spektar struje VN strane transformatora 29-38 nakon ugrađivanja filtara

Na **Slici 4.16** vidljivo je kako se harmonijski spektar popravio ugradnjom filtara, odnosno kako se smanjila ukupna strujna distorzija uklanjanjem petog i sedmog harmonika.

Prema istim načelima, postupak je proveden i za sabirnicu 26 na koju je priključena AC strana drugog pretvarača — izmjenjivača, te je nakon toga pokrenut proračun za harmonijski

tok snaga (naredba *Calculate Harmonic Load Flow*) kako bi se utvrdilo jesu li nakon ugrađivanja filtara za sve sabirnice u mreži zadovoljeni kriteriji kvalitete energije vezane uz harmonijsku distorziju napona. Dobiveni konačni rezultati prikazani su na sljedećoj slici.



Slika 5.17: Rezultati za *Harmonic Load Flow*

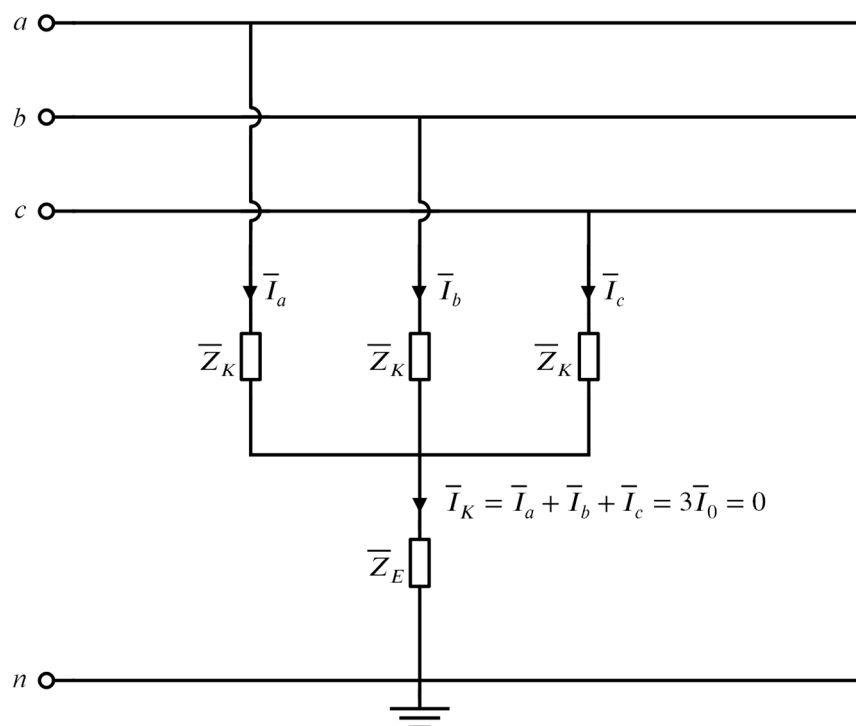
U sažetku koji se nalazi u donjem lijevom kutu snimke zaslona na Slici 5.17 istaknuto je kako je prva fizikalna veličina u kućici rezultata sabirnica ukupna harmonijska distorzija napona; uvidom u te rezultate na grafičkom prikazu mreže na slici, primjetno je kako je metodom pasivnog filtriranja ukupna harmonijska distorzija ispod granične vrijednosti ranije definiranih standarda na svakoj od sabirnica te je na taj način zadovoljen uvjet kvalitete napona u mreži.

5.5. Analiza tranzijentne stabilnosti sustava

5.5.1. Trofazni kratki spoj

U analizi tranzijentne stabilnosti, kao veliki poremećaj bit će uzet trofazni kratki spoj koji je najnepovoljniji kvar u sustavu jer se stvara prekid toka energije u sve tri faze te su, u pravilu,

struje trofaznog kratkog spoja najvećih iznosa. Također, ova vrsta kvara jedina je simetričnog karaktera — u rastavu na simetrične komponente, promatra se samo direktni sustav.



Slika 5.18: Općeniti prikaz trofaznog kratkog spoja u mreži

Direktna, inverzna i nulta komponenta struje kvara faze a mogu se izraziti kao:

$$\begin{aligned}\bar{I}_{a(1)} &= \frac{\bar{E}'}{\bar{Z}_{(1)} + \bar{Z}_K} \\ \bar{I}_{a(2)} &= \bar{I}_{a(0)} = 0.\end{aligned}\tag{5-16}$$

U slučaju da je impedancija kvara jednaka nuli, vektor fazora struja simetričnog sustava je

$$\bar{\mathbf{I}}_{abc} = \begin{bmatrix} \bar{I}_a \\ \bar{I}_b \\ \bar{I}_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \bar{a}^2 & \bar{a} \\ 1 & \bar{a} & \bar{a}^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ \bar{I}_{a(1)} \\ 0 \end{bmatrix},\tag{5-17}$$

a vektor fazora faznih napona

$$\bar{\mathbf{E}}_{abc} = \begin{bmatrix} \bar{E}_a \\ \bar{E}_b \\ \bar{E}_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \bar{a}^2 & \bar{a} \\ 1 & \bar{a} & \bar{a}^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ \bar{E}_{a(1)} \\ 0 \end{bmatrix};\tag{5-18}$$

gdje je kompleksni operator $\bar{a} = 1 \angle 120^\circ$, a direktni fazni napon faze a $\bar{E}_{a(1)} = \bar{Z}_K \bar{I}_{a(1)}$.

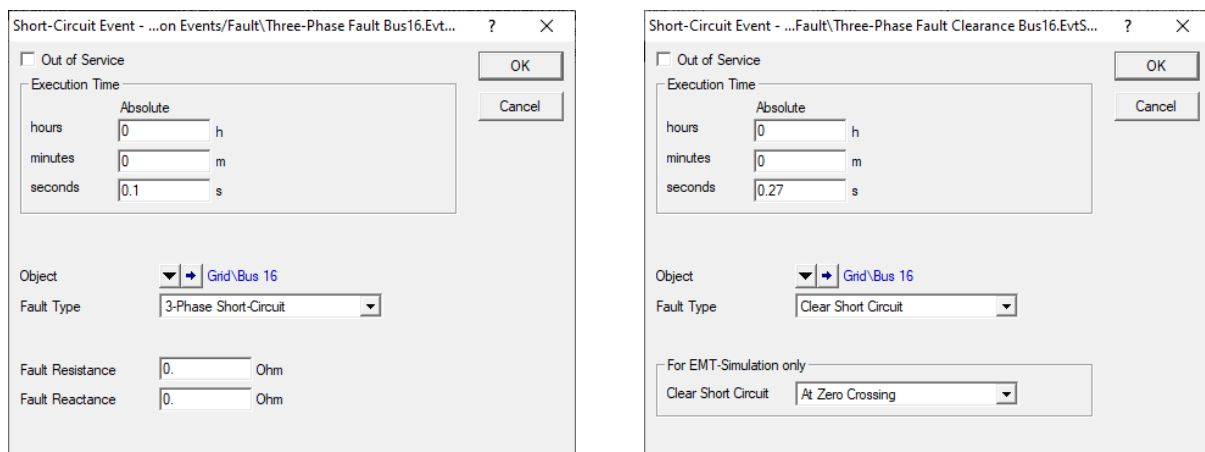
Kako bi se izračunali apsolutni iznosi efektivnih vrijednosti struja kratkog spoja za tranzijentni interval, potrebno je imati zadano podatak o tranzijentnom faznom naponu \bar{E}' i direktnoj impedanciji petlje kvara. U nastavku poglavlja, simulirani događaji bit će trofazni kratki spojevi zanemarene impedancije kvara (što rezultira najvećom mogućom strujom kvara pri zadanom naponu).

5.5.2. Tranzijentna stabilnost izvornog sustava

Za simulaciju trofaznih kratkih spojeva odabrano je nekoliko smislenih električnih lokacija u mreži s obzirom na mjesto ugradnje HVDC sustava. Kvarovi na sabirnicama su najteži jer su one napajane s više strana te će upravo iz tog razloga simulirani biti kvarovi izravno na sabirnicama. No prije nego se sami kvarovi simuliraju u mreži s integriranim istosmjernim prijenosom, potrebno je napraviti analizu stabilnosti u izvornom sustavu, kako bi se mogla izvršiti usporedba rezultata. Pri provođenju RMS simulacija u *DIgSILENT*-u, promatrani će biti oscilogrami sljedećih fizikalnih veličina:

- Kut rotora u el. stupnjevima
- Brzina rotora u *per-unit*-u
- Naponi sabirnica u *per-unit*-u.

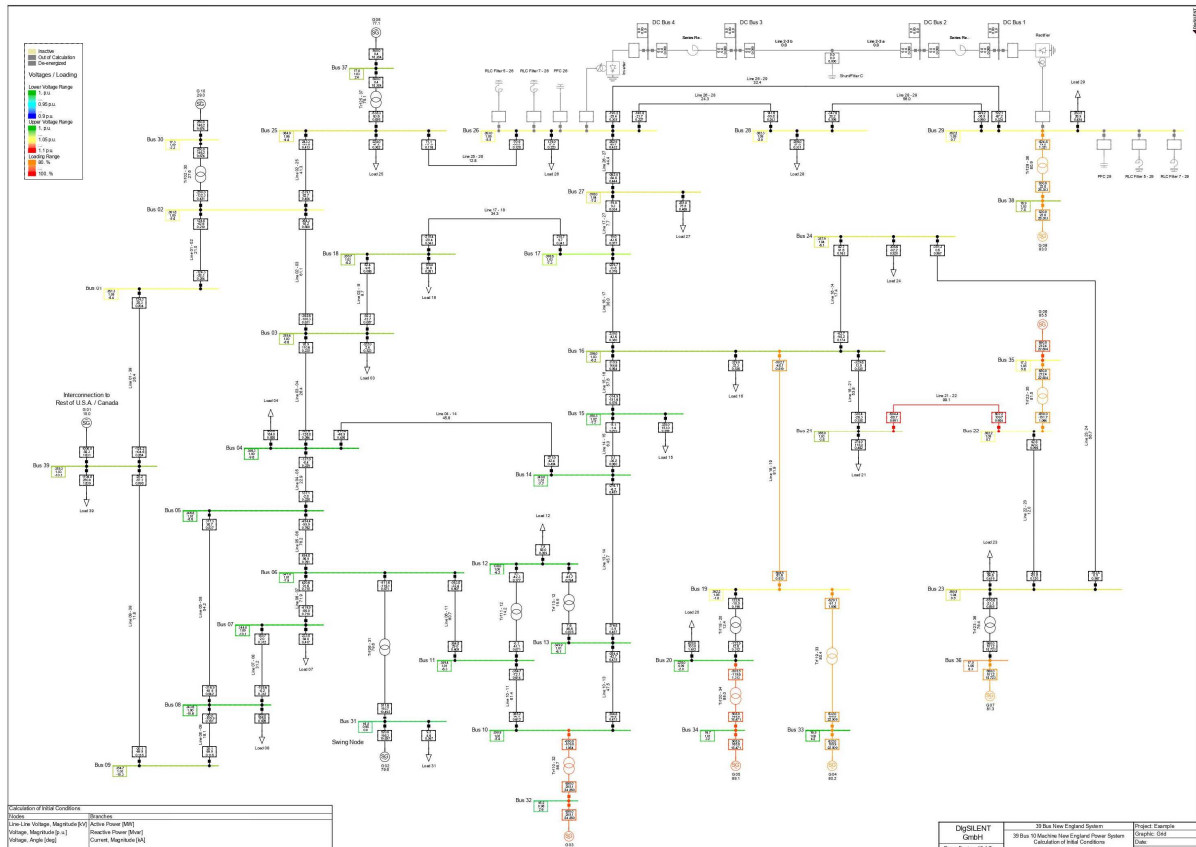
Kvar na lokaciji sabirnice 16



Slika 5.19: Događaji kratkog spoja u RMS simulaciji: nastanak kvara (lijevo) i čišćenje kvara (desno)

Slijedeći algoritam proračuna iz poglavlja 3.1.2, prvo je potrebno provesti kalkulaciju početnih uvjeta te nakon toga specificirati trajanje simulacije te ju provesti. Događaj nastanka kvara uzet je da nastupa u trenutku $t_{sc} = 0,1$ s od početka simulacije. Iterativnim postupkom provođenja RMS simulacija²¹ ustanovljeno je kako je kritični trenutak čišćenja u $t_{sc,off} = 0,27$ s od početka simulacije. Prema tome, kritično vrijeme čišćenja je

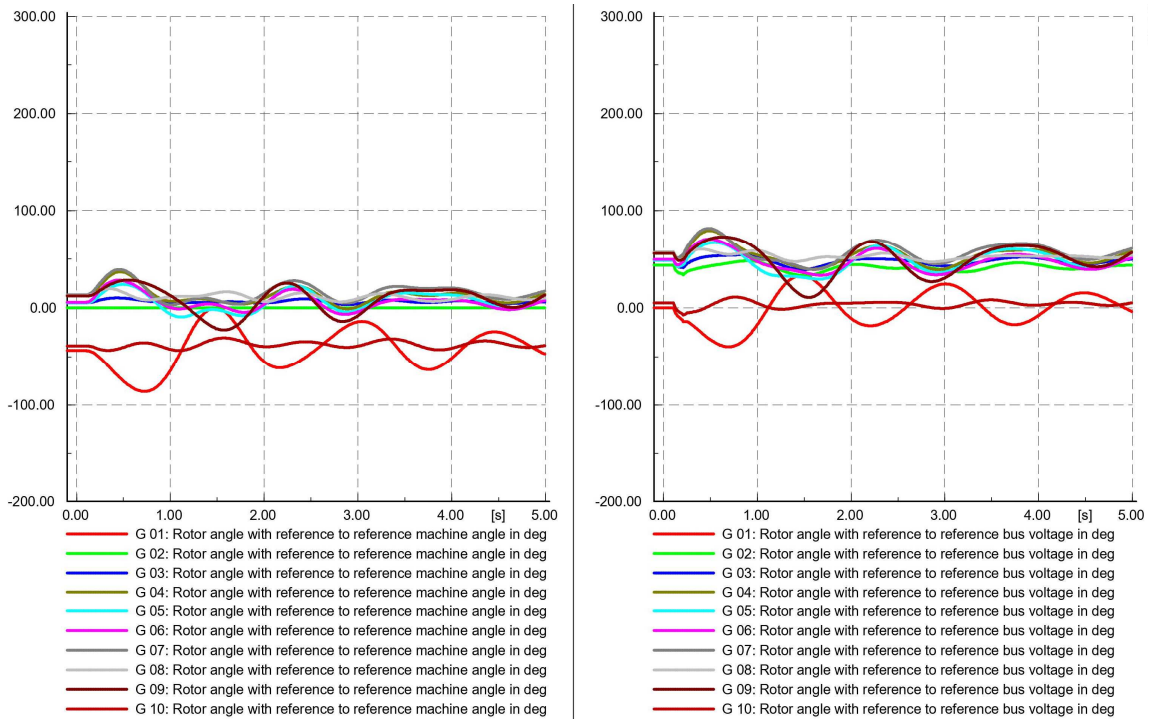
$$t_{c,cr} = t_{sc} - t_{sc,off} = 0,27 - 0,1 = 0,17 \text{ s} = 170 \text{ ms} . \quad (5-19)$$



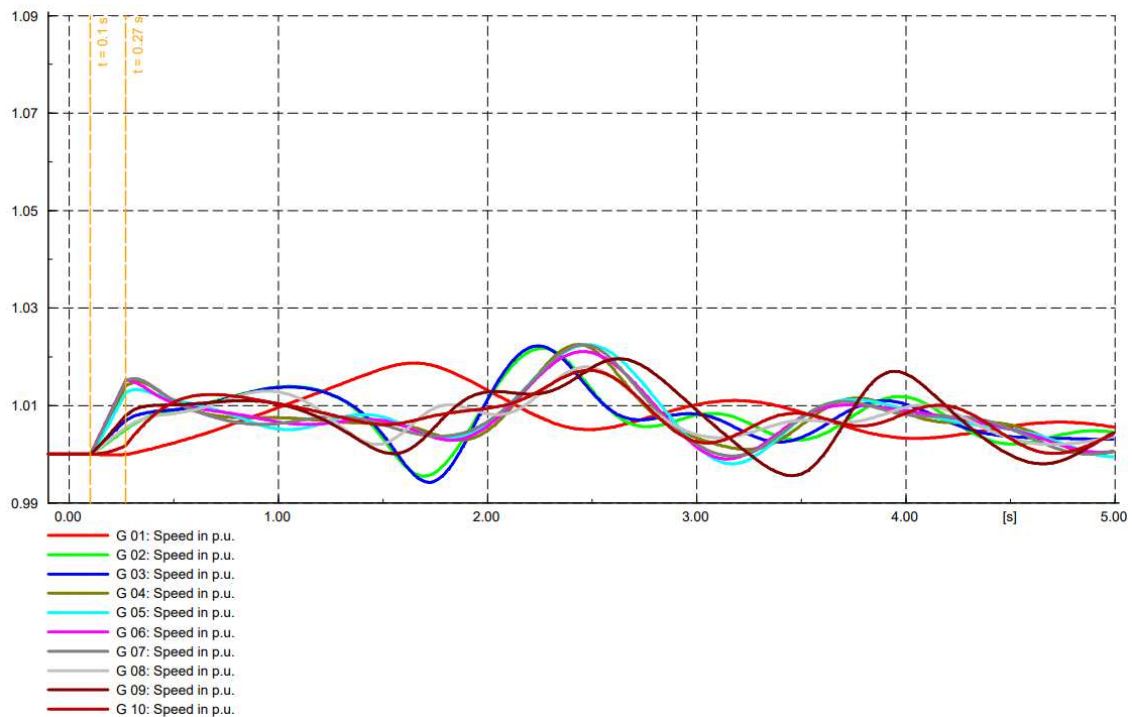
Slika 5.20: Rezultati proračuna početnih uvjeta — stacionarna radna točka u $t = 0$

Kao što je na **Slici 5.20** vidljivo, HVDC sustav, kao i sve njemu pripadajuće reaktivne komponente i filtri su neaktivni te je proračunom početnih uvjeta određena polazna radna točka za dinamičku simulaciju. Vrijeme simulacije podešeno je na pet sekundi, što je za analizu prijelaznih pojava u prijenosnoj mreži za vrijeme jakog poremećaja i više nego dovoljno.

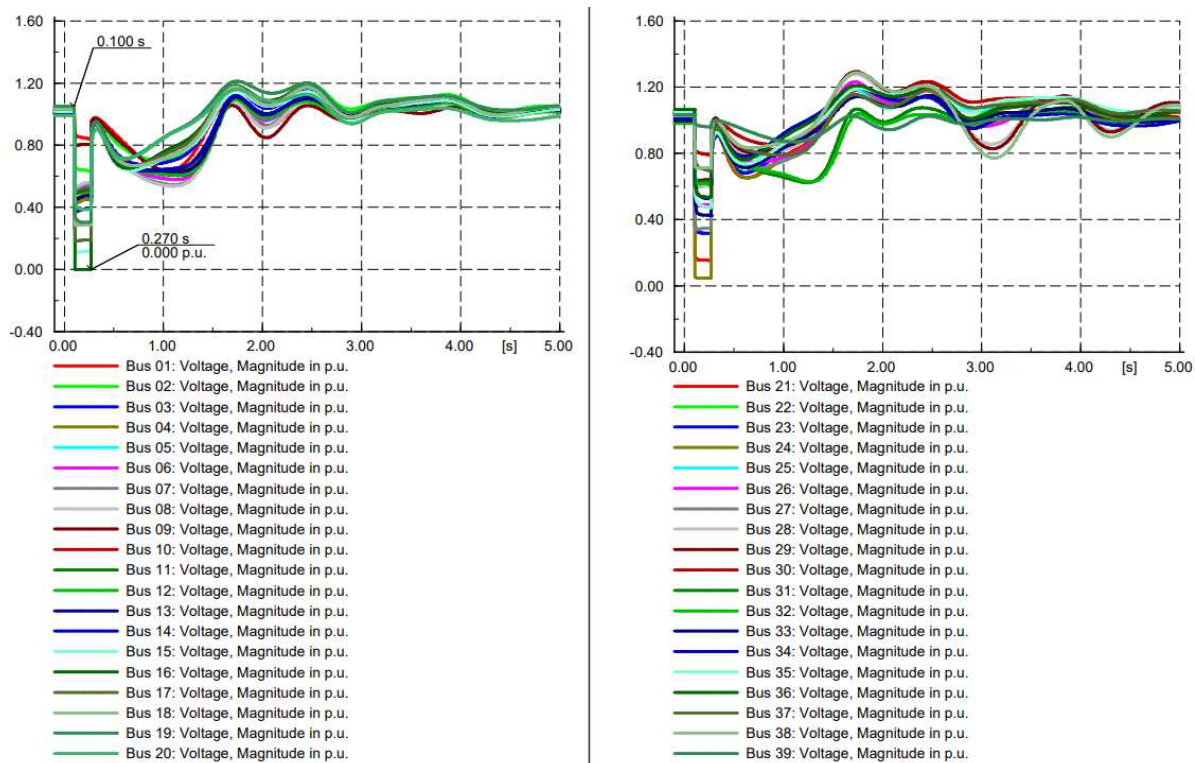
²¹ Za prvi (početni) korak uzme se proizvoljno kratko vrijeme čišćenja kvara (100 ms na primjer) te se ono postepeno povećava i uvidom u oscilogramе reakcije sustava se utvrđuje margina stabilnosti.



Slika 5.22: Trofazni kratki spoj na sabirnici 16 (stabilan slučaj). Oscilogram kuta rotora svakog generatora: u odnosu na ref. stroj (lijevo) i u odnosu na kut napona ref. sabirnice (desno)



Slika 5.21: Trofazni kratki spoj na sabirnici 16 (stabilan slučaj). Oscilogram kuta rotora svih generatora



Slika 5.23: Trofazni kratki spoj na sabirnici 16 (stabilan slučaj). Oscilogram napona svih sabirnica

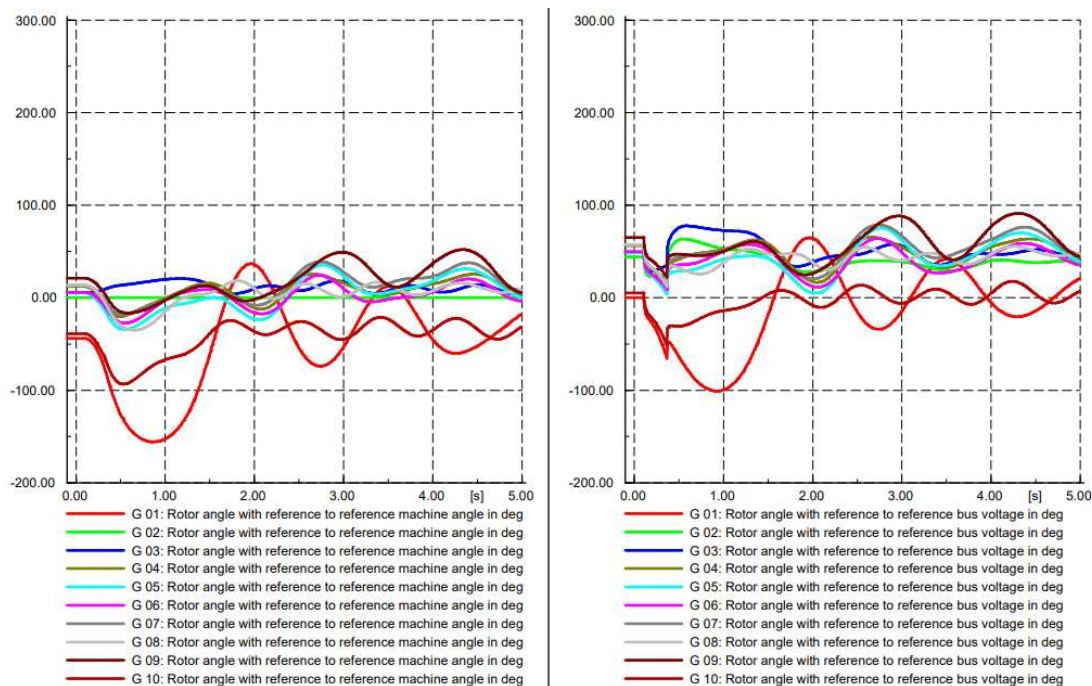
Uvidom u prethodne tri slike oscilograma iz *DIGSILENT*-a, može se zapaziti sljedeće:

- Do trenutka nastanka kvara ($t_{sc} = 0,1$ s), sustav je u stacionarnom stanju — sve fizikalne veličine (kutovi rotora, brzine rotora i naponi sabirnica) su konstantne, s tim da se svi rotori okreću sinkronom brzinom od 1,00 pu. Ono što se u trenutku nastanka kvara može primijetiti je da svi naponi imaju nagli pad, a napon sabirnice 16, zbog zanemarene impedancije kvara, padne na vrijednost 0 pu.
- U trenutku $t_{sc,off} = 0,27$ s, kada se kvar očisti, naponi bilježe skok vrijednosti te osciliraju s težnjom ustaljenja u novu stabilnu radnu točku.
- Priroda odziva kuta rotora na kvar je iščezavajuće oscilirajuće prirode — vidljivo je kako raspon oscilacije kuta rotora nije velik i kako su oscilacije prigušene te se kut svakog rotora ustaljuje u novu stacionarnu radnu točku. Najjače su oscilacije kod kuta rotora generatora G01, koji je ujedno i najveće izlazne snage, a za koji je simulacijama potvrđeno da ima tendenciju prvi ispasti iz sinkronizma te je kao takav od velike važnosti u analizi tranzijentne stabilnosti.

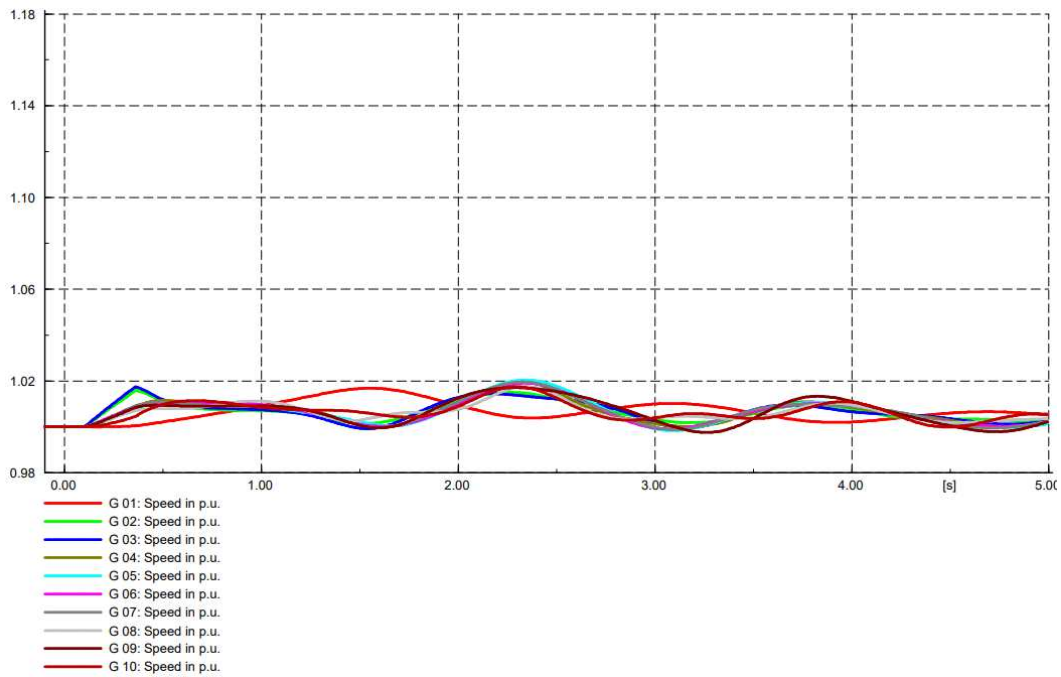
- Prema oscilogramu brzine kuta rotora, niti jedan rotor ne bilježi oscilacije brzine oko radne točke različite od ostalih rotora; drugim riječima — evidentno je da su svi generatori ostali u sinkronizmu.

Kvar na lokaciji sabirnice 4

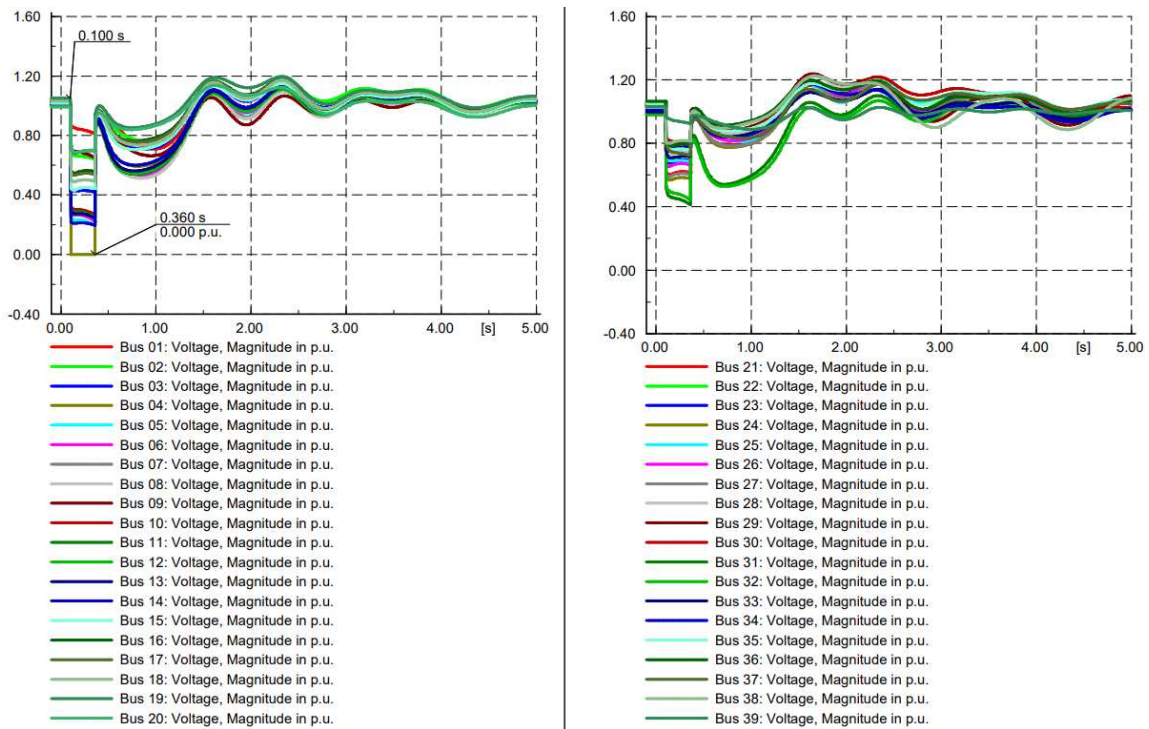
Druga sabirnica od interesa je sabirnica 4. Simulirani događaj je također trofazni kratki spoj impedancije nula koji nastupa 0,1 s nakon početka simulacije. Istim postupkom kao i za sabirnicu 16, dobiveno je kritično vrijeme čišćenje od 260 ms. Priroda promatranih odziva ista je kao i u slučaju kvara na sabirnici 16, odnosno valni oblici oscilograma iste su prirode, što je vidljivo na sljedeće tri slike.



Slika 5.24: Trofazni kratki spoj na sabirnici 4 (stabilan slučaj). Oscilogram kuta rotora svakog generatora: u odnosu na ref. stroj (lijevo) i u odnosu na kut napona ref. sabirnice (desno)



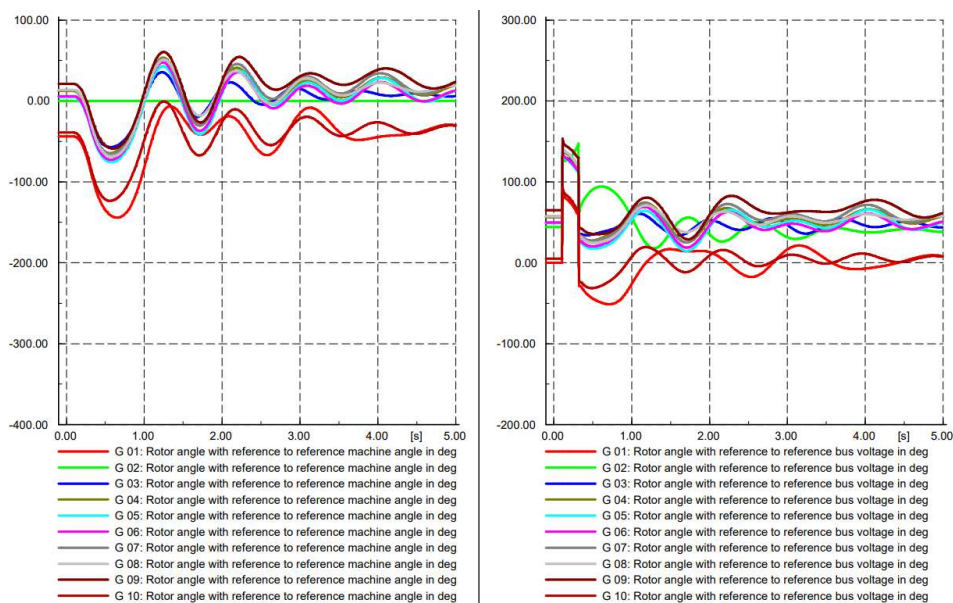
Slika 5.25: Trofazni kratki spoj na sabirnici 4 (stabilan slučaj). Oscilogram kuta rotora svih generatora



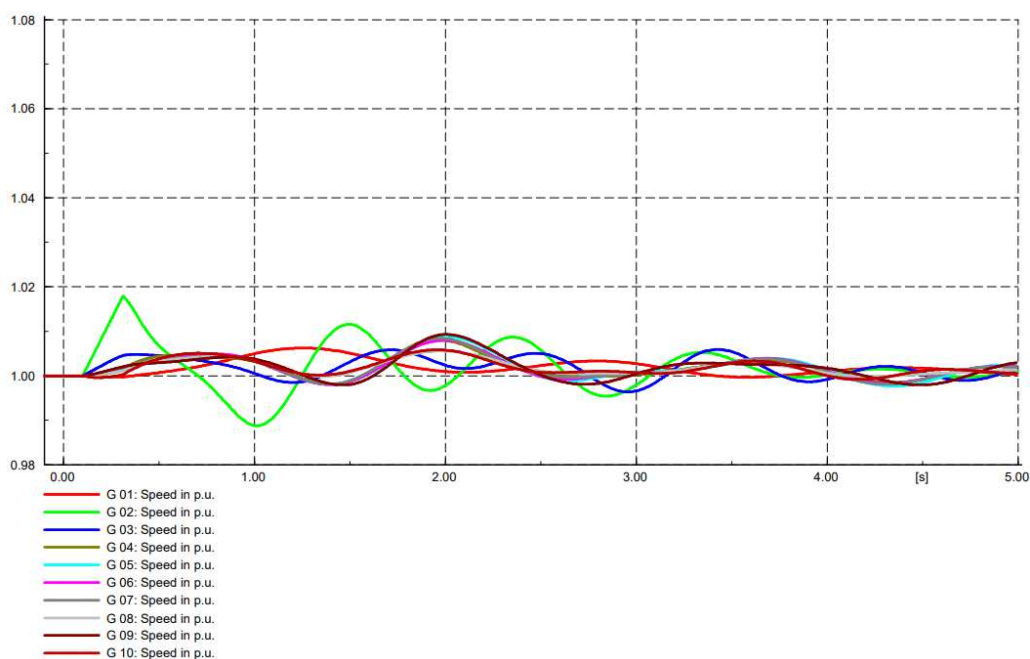
Slika 5.26: Trofazni kratki spoj na sabirnici 4 (stabilan slučaj). Oscilogram napona svih sabirnica

Kvar na lokaciji sabirnice 31

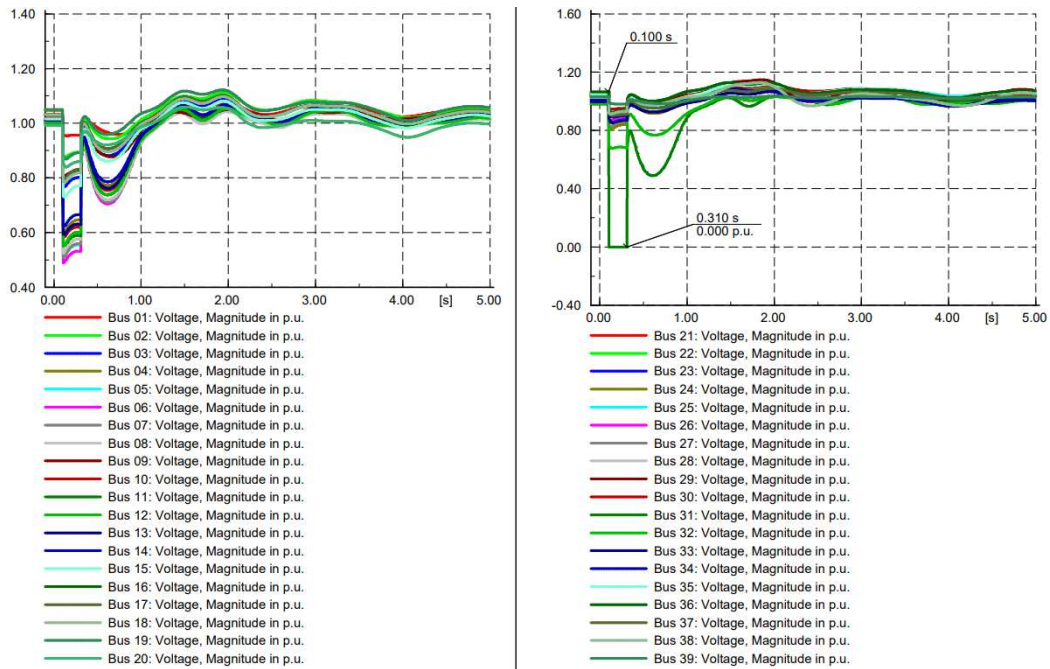
Sabirnica 31, koja je električki vrlo udaljena od HVDC sustava bit će treća odabrana lokacija za simulaciju trofaznog kratkog spoja. Postupak provođenja simulacije i sve konstatacije koje su donesene za prethodna dva slučaja vrijede i ovdje te je prema tome kritično vrijeme isključenja 210 ms za trofazni kratki spoj na sabirnici 31.



Slika 5.27: Trofazni kratki spoj na sabirnici 31 (stabilan slučaj). Oscilogram kuta rotora svakog generatora: u odnosu na ref. stroj (lijevo) i u odnosu na kut napona ref. sabirnice (desno)



Slika 5.28: Trofazni kratki spoj na sabirnici 31 (stabilan slučaj). Oscilogram kuta rotora svih generatora



Slika 5.29: *Trofazni kratki spoj na sabirnici 31 (stabilan slučaj).* Oscilogram napona svih sabirnica

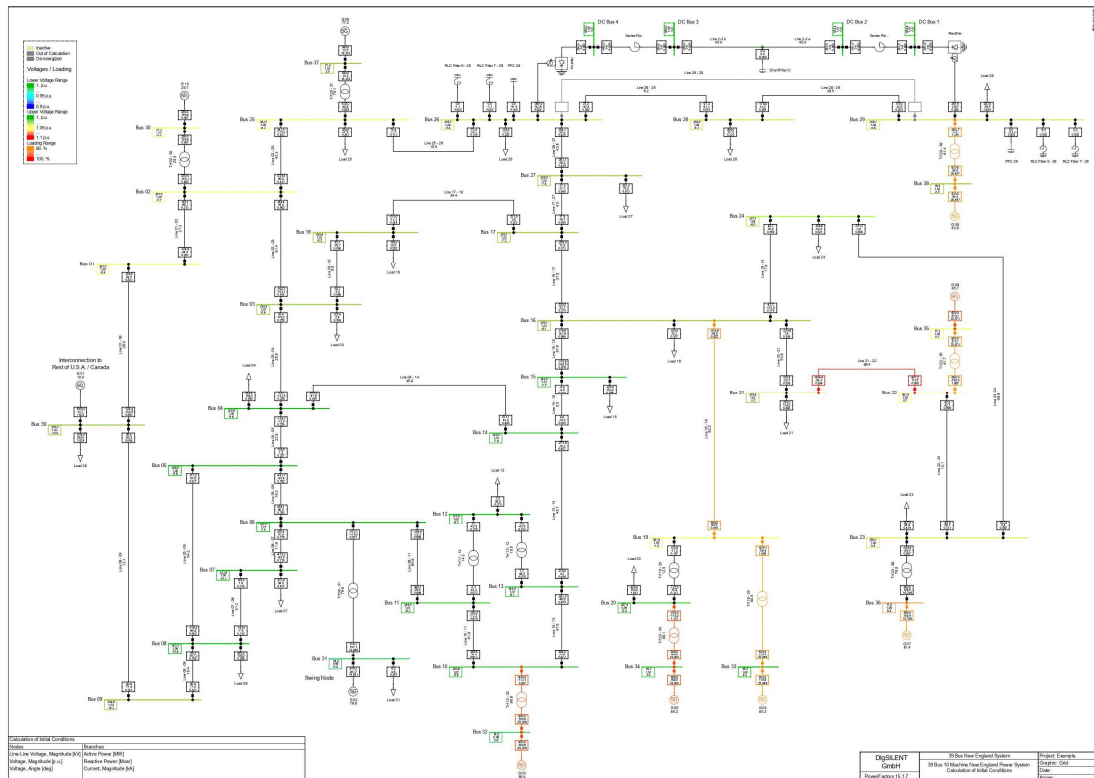
Sva opažanja i zaključci vezani za rezultate simulacije, opisani su za slučaj kvara na sabirnici 16 te su i ovdje validni, kao i za sabirnicu 4.

5.5.3. Tranzijentna stabilnost sustava s integriranim HVDC sustavom

U ovom poglavlju bit će napravljena simulacija trofaznog kratkog spoja impedancije kvara nula za sabirnice 16, 4 i 31. Sabirnica 16 električki je, od odabrane tri, najbliže HVDC sustavu, a sabirnica 31 najdalje. Provedbom simulacija potrebno je utvrditi kritično vrijeme isključenja te usporediti rezultate, tj. oscilogramе s onima iz prošlog poglavlja kada je HVDC sustav bio neaktivan.

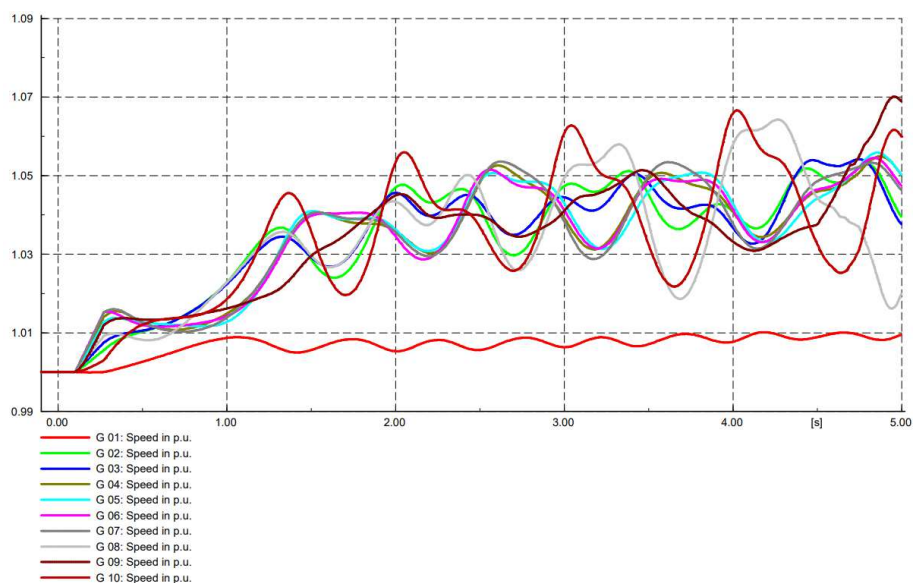
Kvar na lokaciji sabirnice 16

Kao i za prethodne scenarije, prije provedbe dinamičke RMS simulacije, pokreće se proračun početnih uvjeta te se nakon toga pokreće simulacija sa specificiranim vremenom trajanja.

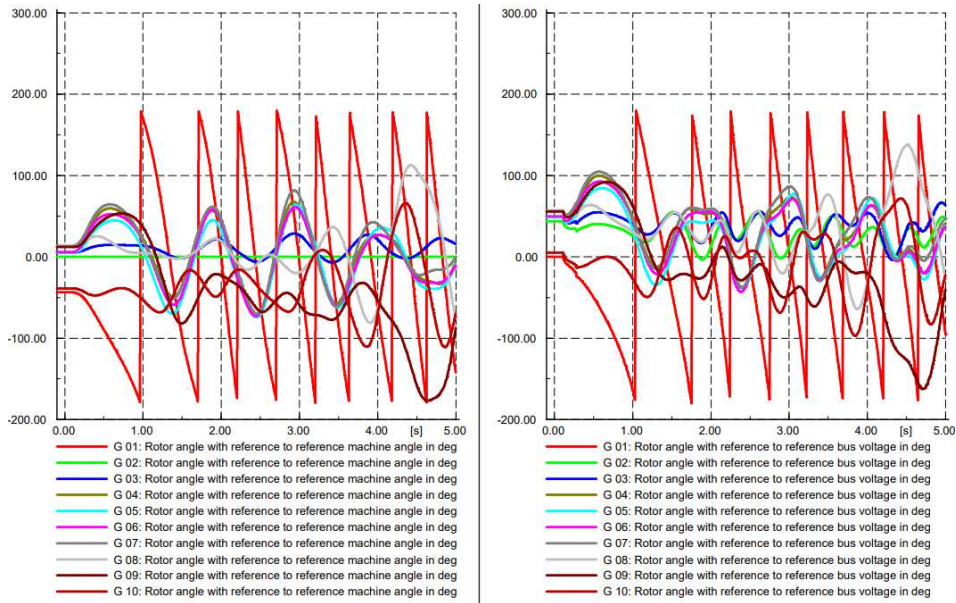


Slika 5.30: Rezultati proračuna početnih uvjeta za scenarij s HVDC-om — stacionarna radna točka u $t = 0$

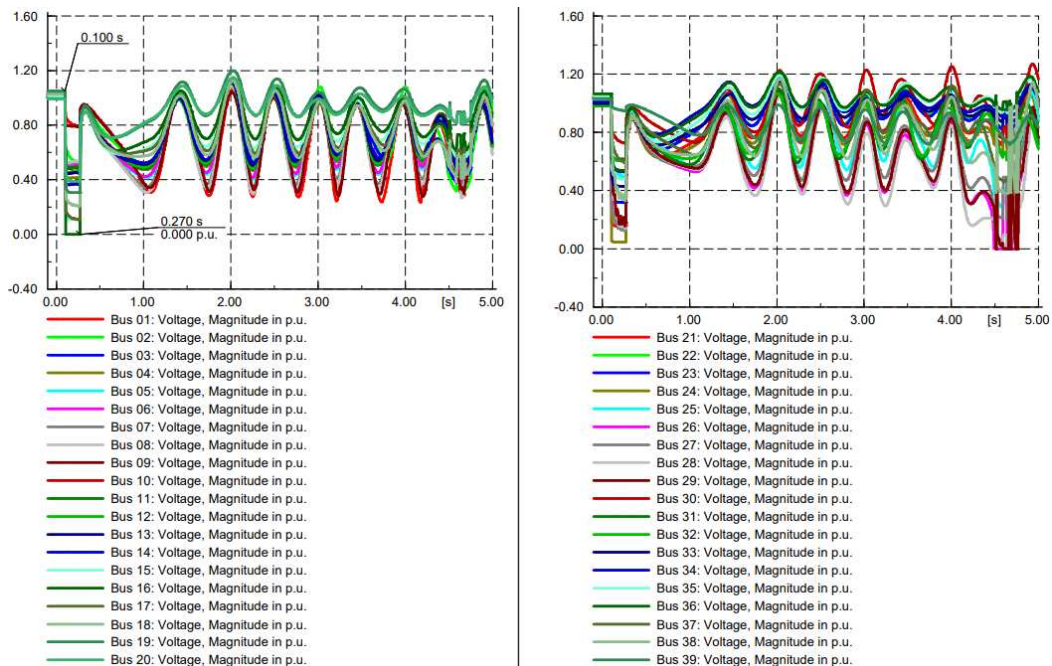
Rezultati proračuna početnih uvjeta daju polaznu radnu točku za dinamičku simulaciju. Prvo će simulirani biti događaji s podešenim kritičnim trenutkom čišćenja kao za slučaj u prošlom poglavlju ($t_{sc,off} = 0,27$ s) te će se usporediti rezultati.



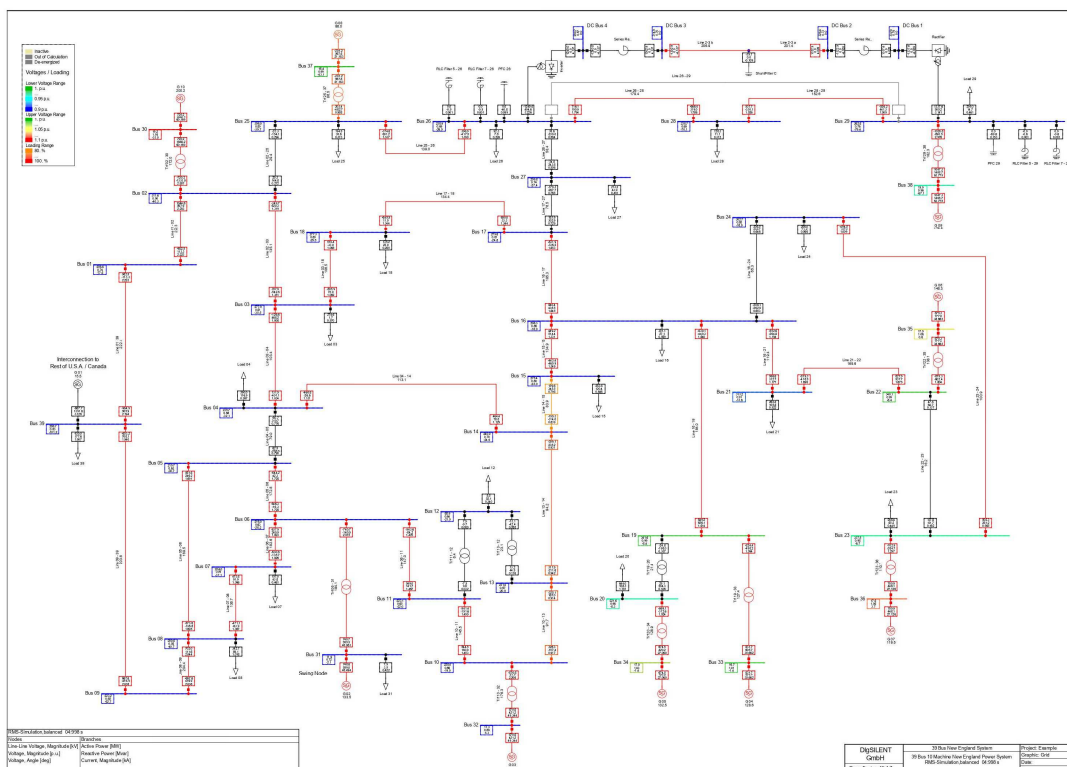
Slika 5.31: Trofazni kratki spoj na sabirnici 16, uz HVDC (nestabilan slučaj). Oscilogram kuta rotora svih generatora



Slika 5.32: Trofazni kratki spoj na sabirnici 16, uz HVDC (nestabilan slučaj). Oscilogram kuta rotora svakog generatora: u odnosu na ref. stroj (lijevo) i u odnosu na kut napona ref. sabirnice (desno)



Slika 5.33: Trofazni kratki spoj na sabirnici 16, uz HVDC (nestabilan slučaj). Oscilogram napona svih sabirnica

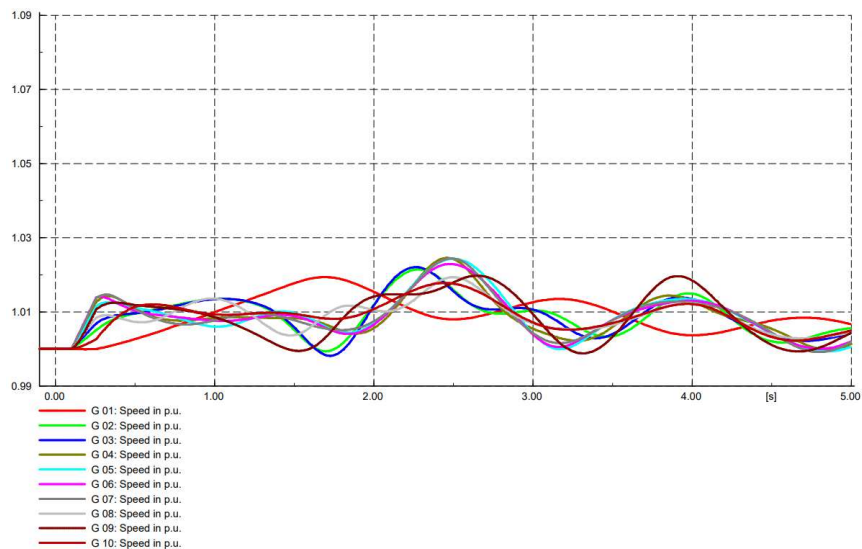


Slika 5.34: Trofazni kratki spoj na sabirnici 16, uz HVDC (nestabilan slučaj). Stanje u mreži na kraju RMS simulacije ($t = 4,998$ s)

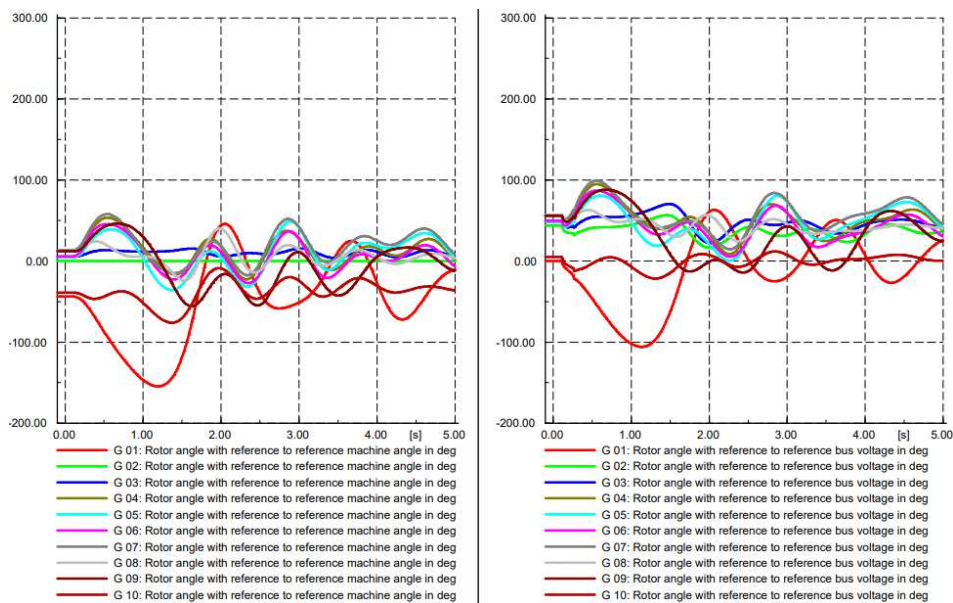
Analiza dobivenih simulacijskih rezultata upućuje na sljedeće zaključke.

- Prema **Slici 5.31** jasno je kako je generator G01 gotovo odmah (već nakon jedne sekunde) ispao iz sinkronizma, a oscilacije valnih oblika brzine ostalih generatora ne iščezavaju te je prema tome vidljivo kako sustav nije zadovoljio kriterije stabilnosti.
- **Slika 5.32** indikator je kutne nestabilnosti — raspon valnog oblika kuta rotora generatora G01 je od -180° do 180° te, osim toga, oscilacije ne pokazuju trend prigušivanja. U stvarnosti ovakve oscilacije koje nastaju kod nestabilnog sustava dovode do velike mehaničke štete i uništenja generatora. Valni oblici kuta rotora ostalih generatora su raspirujuće prirode (kut rotora ne teži ustaljenju u novu radnu točku) te je i to indikator kako se nestabilnost manifestirala na svaki od generatora.
- Nakon čišćenja kvara prisutne su jake fluktuacije napona (**Slika 5.33**) na svakoj od sabirnica, što je isto dovoljan pokazatelj da je sustav bio pod utjecajem većeg poremećaja koji nije bio na vrijeme saniran.

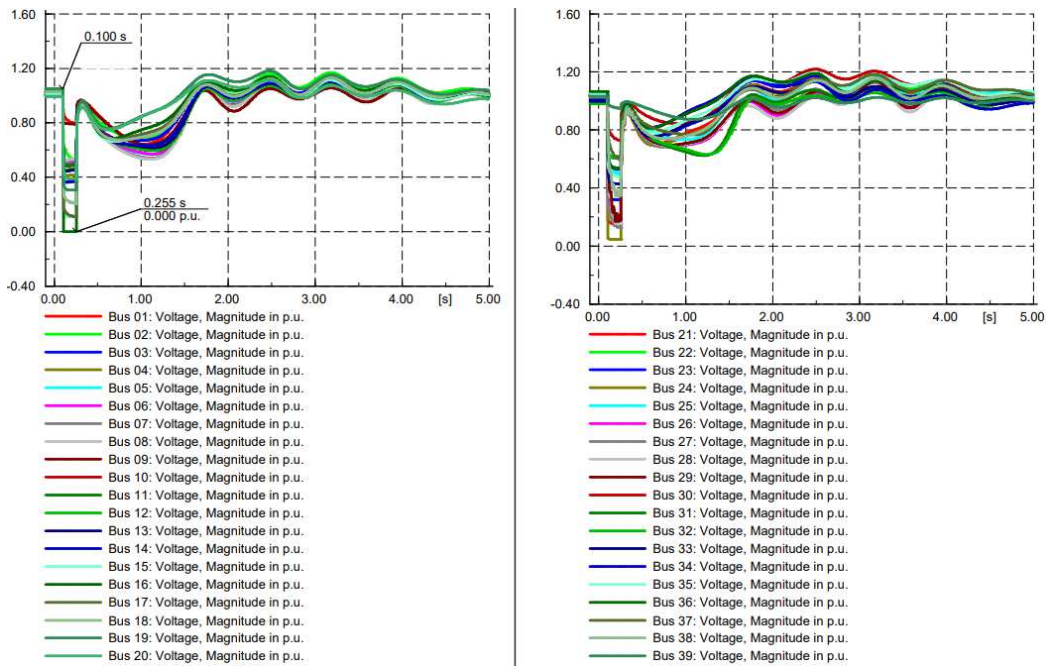
S obzirom na to da je očito da kritično vrijeme čišćenja od 170 ms, koje je dobiveno za slučaj bez HVDC sustava nije dovoljno nisko u ovom scenariju, potrebno je postepeno smanjivati trenutak čišćenja kvara te pronaći korigirano kritično vrijeme čišćenja. Slijedeći navedeni postupak, dobiveno je kritično vrijeme isključenja od 155 ms. To upućuje na apsolutnu vremensku razliku od 15 ms, odnosno relativnu postotnu razliku od 8,82%. U nastavku su prikazani relevantni oscilogrami za slučaj kada se trenutak isključenja korigirao na $t_{sc,off} = 0,255$ s. Grafički prikaz stabilnih odziva za sada navedeni slučaj na sljedeće su tri slike.



Slika 5.36: Trofazni kratki spoj na sabirnici 16, uz HVDC (stabilan slučaj). Oscilogram kuta rotora svih generatora



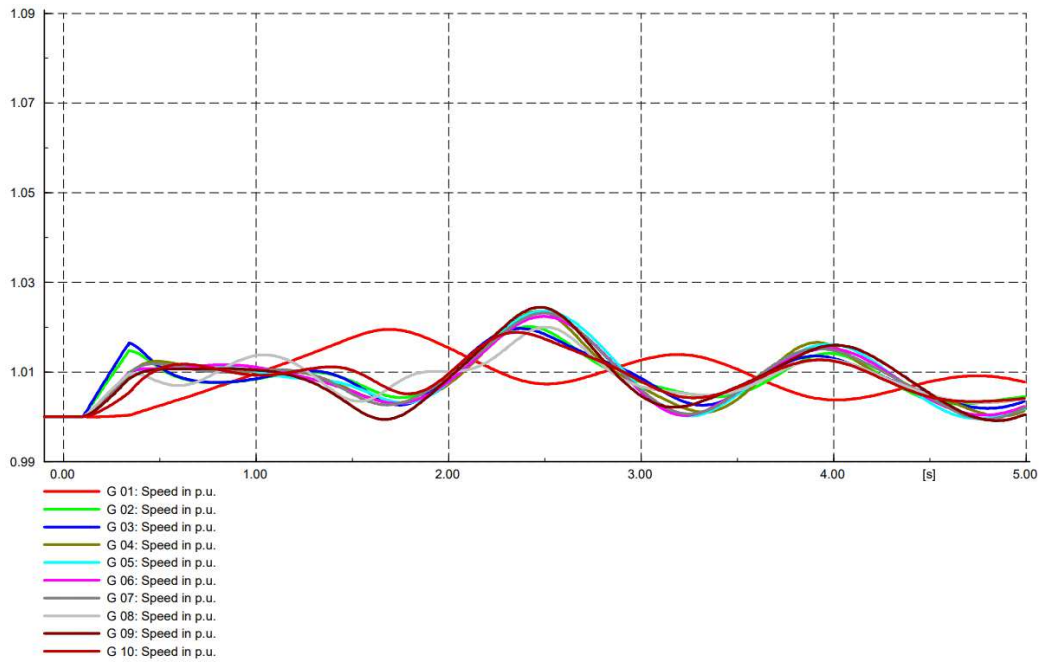
Slika 5.35: Trofazni kratki spoj na sabirnici 16, uz HVDC (stabilan slučaj). Oscilogram kuta rotora svakog generatora: u odnosu na ref. stroj (lijevo) i u odnosu na kut napona ref. sabirnice (desno)



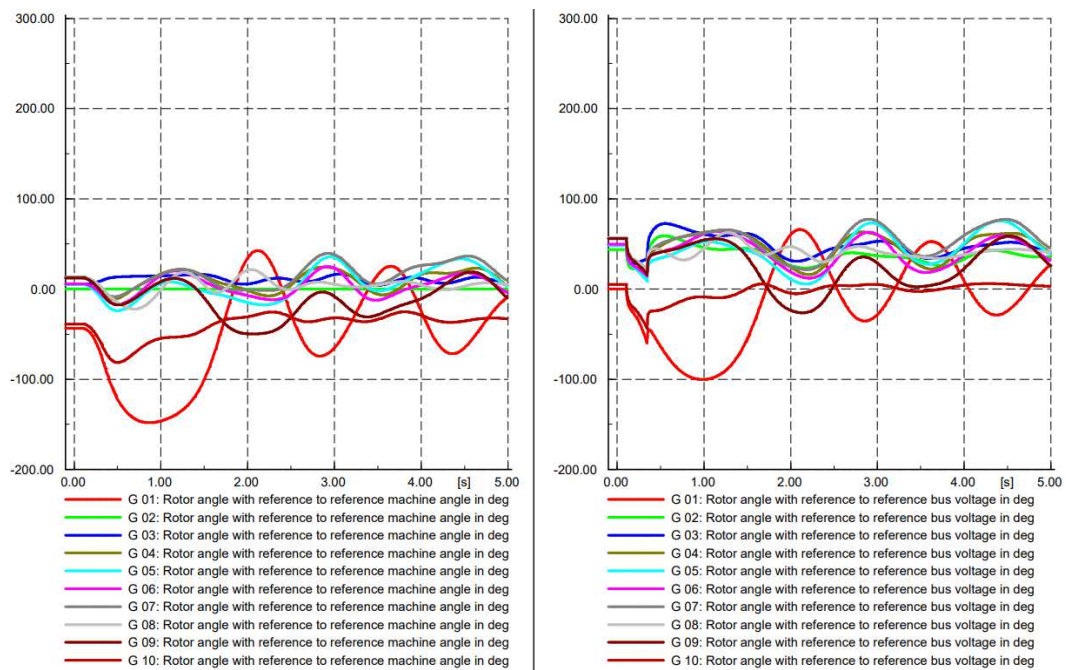
Slika 5.37: Trofazni kratki spoj na sabirnici 16, uz HVDC (stabilan slučaj). Oscilogram napona svih sabirnica

Kvar na lokaciji sabirnice 4

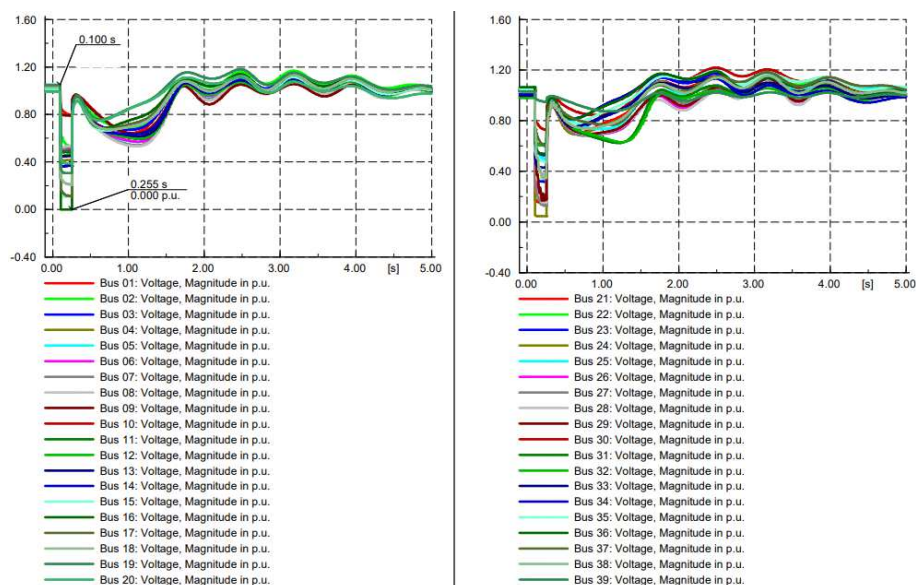
Slično kao i za sabirnicu 16, dobije se nestabilan sustav kada se kritično vrijeme čišćenja ostavi nepromijenjeno, a integrira se HVDC u mrežu i simulira se trofazni kratki spoj. Sljedeći je isti kao i za kvar na sabirnici 16: kritično vrijeme čišćenja smanjuje se korigiranjem trenutka isključenja u simulaciji i traži se nova margina stabilnosti. Dobiveno novo kritično vrijeme isključenja je $t_{c,cr} = 0,24 \text{ s} = 240 \text{ ms}$. Apsolutna vremenska razlika između dva slučaja — bez HVDC-a i s HVDC-om — je 20 ms, odnosno dobivena relativna postotna razlika je 7,69%. Sljedeće tri slike prikazuju oscilogramе fizikalnih veličina kada je kritično vrijeme čišćenja korigirano na 240 ms, što daje stabilan sustav.



Slika 5.38: Trofazni kratki spoj na sabirnici 4, uz HVDC (stabilan slučaj). Oscilogram kuta rotora svih generatora



Slika 5.39: Trofazni kratki spoj na sabirnici 4, uz HVDC (stabilan slučaj). Oscilogram kuta rotora svakog generatora: u odnosu na ref. stroj (lijevo) i u odnosu na kut napona ref. sabirnice (desno)

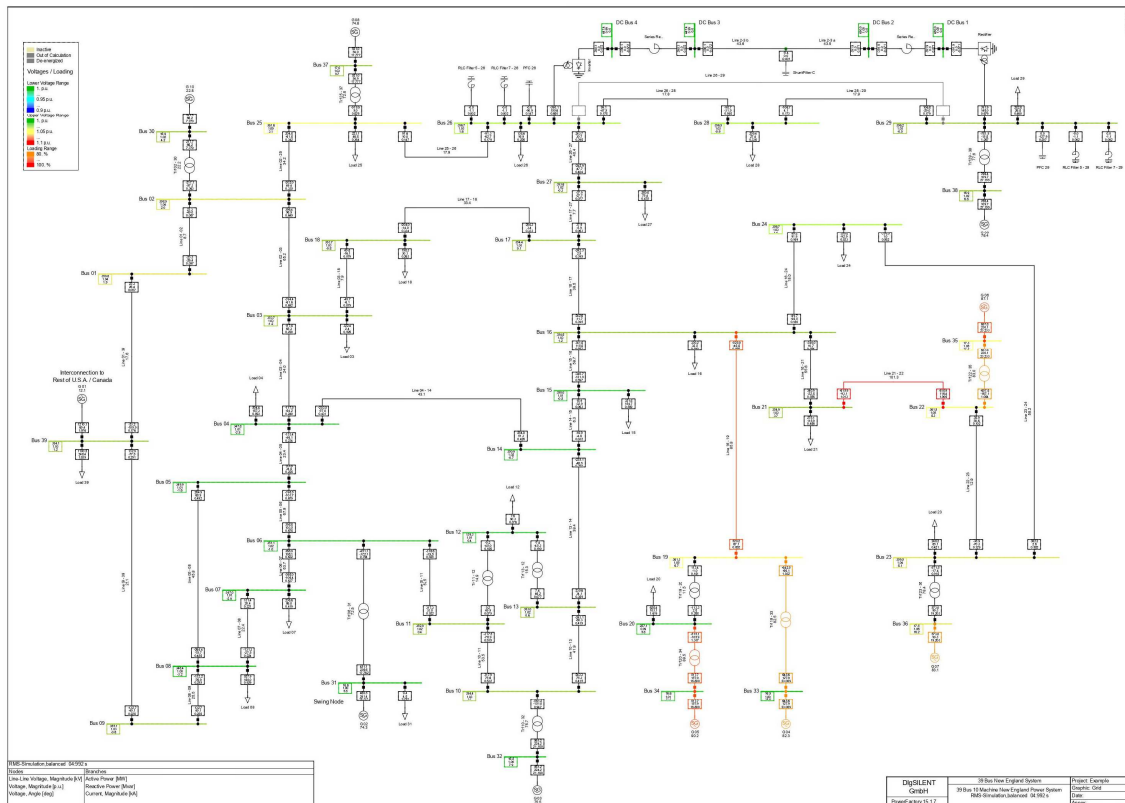


Slika 5.40: Trofazni kratki spoj na sabirnici 4, uz HVDC (stabilan slučaj). Oscilogram napona svih sabirnica

Kvar na lokaciji sabirnice 31

Uvidom u topologiju mreže prikazanoj na **Slici 5.1** uočava se da je sabirnica 31 električki vrlo udaljena od HVDC sustava, te se prema tome očekuje da utjecaj koji je bio zamijećen kod kvarova na sabirnicama 16 i 4 ovdje neće biti značajan. Analogno postupku koji se provodio za prethodne dvije sabirnice, i za sabirnicu 31 se uzimaju nepromijenjeni kritični trenutak čišćenja te se razmatraju relevantni oscilogrami dobiveni RMS simulacijom. Iznimnost je za sabirnicu 31, koja je ujedno podešeno referentno čvorište ($V\delta$ čvor), to da nema razlike u dinamičkim odzivima — za isti kvar se nije promijenilo kritično vrijeme čišćenja iako je HVDC aktiviran. S obzirom na navedeno, dobiveni oscilogrami isti su kao i oni na **Slici 5.27**, **Slici 5.28** i **Slici 5.29** te ih stoga nije potrebno ponovno prikazivati.

Konačni zaključak koji se donosi s obzirom na dobivene reakcije sustava na teže kvarove na odabranim sabirnicama jest da se utjecaj HVDC sustava na trazijentnu stabilnost sustava umanjuje povećanjem električne udaljenosti od dijela mreže u kojem su se radile izmjene (integracija HVDC sustava i svih potrebnih reaktivnih komponenti).



Slika 5.41: Trofazni kratki spoj na sabirnici 31, uz HVDC (stabilan slučaj). Stanje u mreži na kraju RMS simulacije ($t = 4,998$ s)

5.6. Analiza oscilatorne stabilnosti sustava

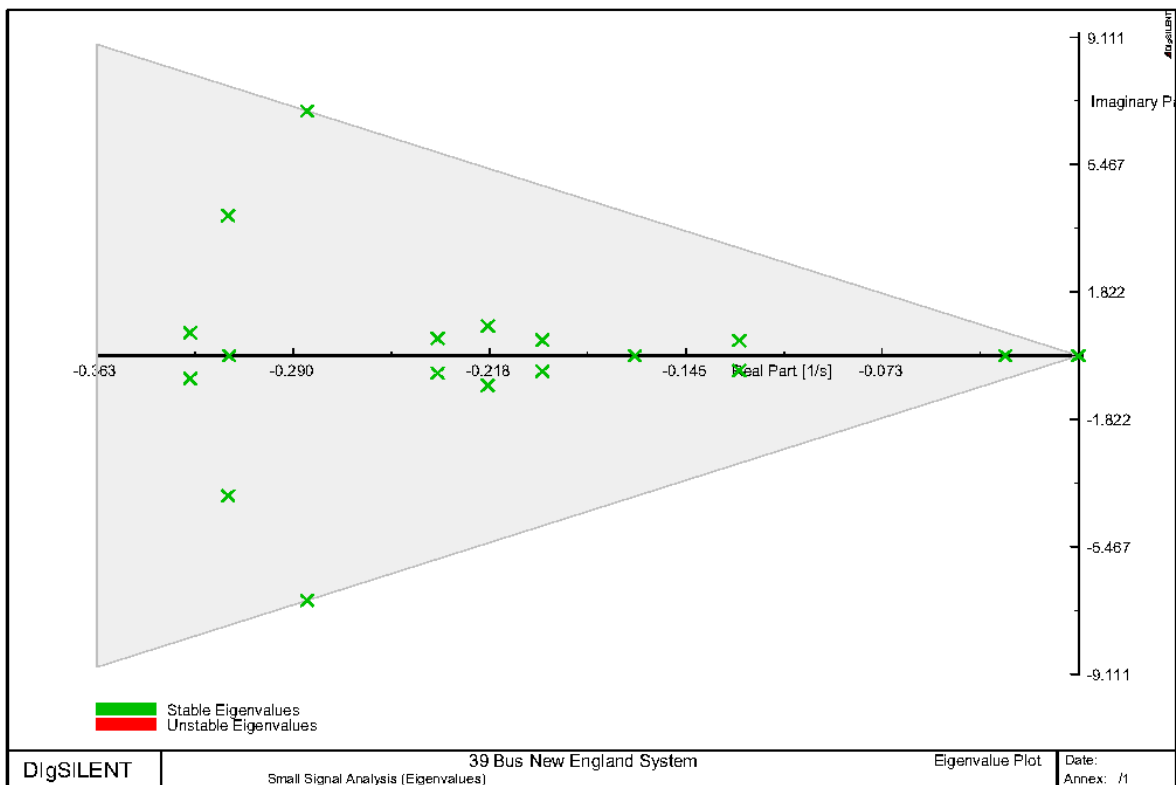
Oscilatorna stabilnost sustava je njegova sposobnost da održi sinkronizam kada je izložen malim poremećajima — prolaznim ili trajnim. Tipični primjeri malih poremećaja za analizu dinamičke stabilnosti su promjena planirane proizvodnje jednog od generatora u sustavu, ili promjena potražnje za električnom energijom u sustavu koja je razmjerno mala u odnosu na totalni kapacitet razmatranog sustava (1% od ukupne potrošnje na primjer). Takve promjene u stabilnom sustavu uzrokuju malo odstupanje od početne radne točke te slabe oscilacije koje iščezavaju u novu radnu točku.

U ovom poglavlju napravljena je analiza dinamičke stabilnosti sustava izloženog odabranom malom poremećaju prije i nakon integracije HVDC sustava u svrhu usporedbe

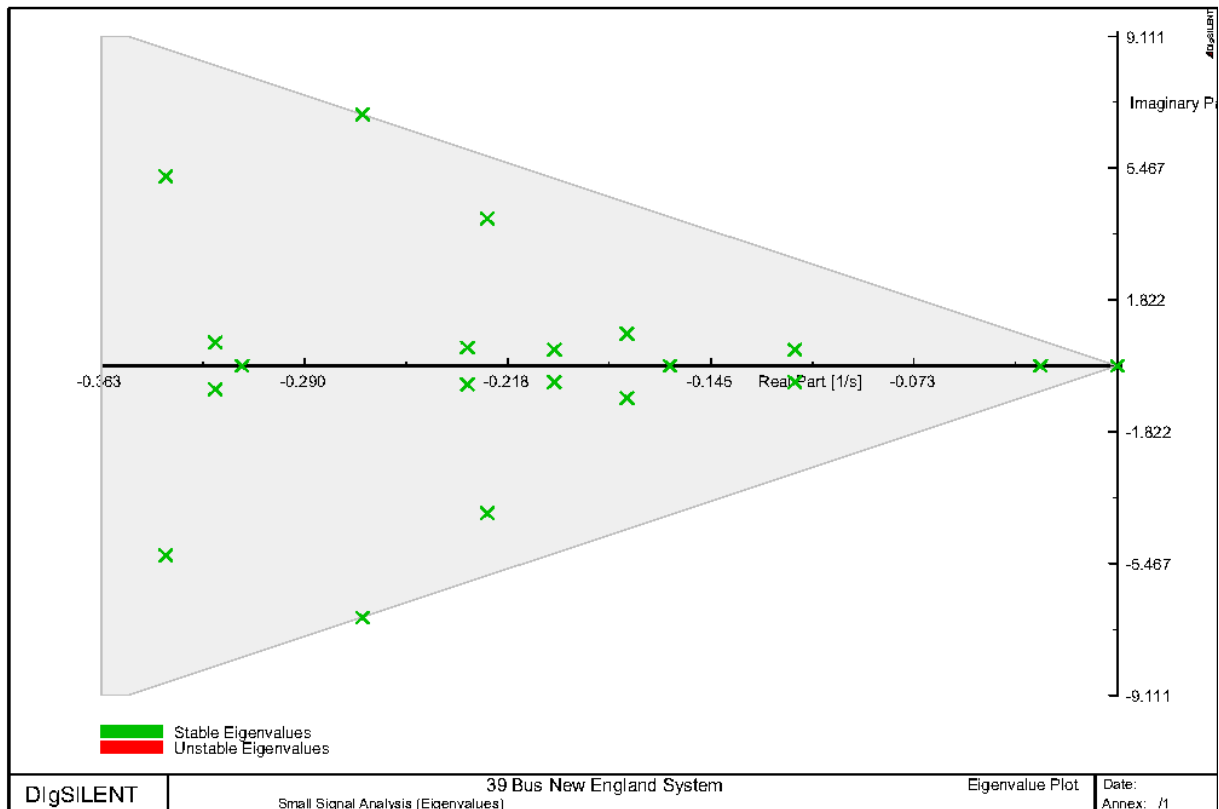
rezultata ta dva scenarija. Definiran poremećaj je skokovita promjena djelatne snage jednog od potrošača.

5.6.1. Utjecaj HVDC sustava na pokazatelje s -domene

Slijedeći općeniti postupak opisan u poglavlju 3.1.3, provodi se modalna analiza pomoću *DigSILENT*-a kako bi se dobile svojstvene vrijednosti sustava, vezane uz elektromehaničke oscilatorne modove, pomoću kojih se analizira dinamička stabilnost promatranog dijela elektroenergetskog sustava. Uobičajeni prikaz svojstvenih vrijednosti je krivulja mjesta korijena (KMK) gdje se jasno vidi položaj svih polova u kompleksnoj ravnini.



Slika 5.42: KMK izvornog sustava (bez HVDC-a)



Slika 5.43: KMK izmijenjenog sustava (s HVDC-om)

U oba slučaja (bez HVDC-a i uz njega) sustav je stabilan jer se svi polovi nalaze u lijevoj poluravnini. Zbog velikog broja polova sustava i velike ravnine koju oni razapinju (osjenčano sivom bojom na slikama), nije praktično prikazivati cijelu KMK, već samo uvećan dio na kojem se nalazi nekolicina polova koji su najbliže imaginarnoj osi, te su kao takvi ključni za stabilnost. Na prethodne dvije slike nalazi se dio KMK za dva slučaja — bez integriranog HVDC-a i uz integrirani HVDC. Dva dominantna pola — svojstvene vrijednosti s najmanjim apsolutnim realnim dijelom — imaju imaginaran dio jednak nuli u oba slučaja, što prema (3-29) znači da pripadajući modovi nisu sinusoidalne oscilirajuće prirode, već je odgovarajući odziv padajuća eksponencijalna funkcija. Također, apsolutna vrijednost ta dva pola neznatno se promijeni integracijom HVDC-a te je zbog toga od veće važnosti razmatrati druge dominantne konjugirano-kompleksne polove.

Pregledom **Tablice 5.2** vidljiv je trend da se dominantni konjugirano-kompleksni parovi pomiču prema imaginarnoj osi, tj. da im se smanjuje apsolutni iznos realne komponente integracijom HVDC-a, ali ne za velik iznos. To ukazuje da je u slučaju sustava s integriranim HVDC-om za očekivati nešto jače i vremenski dulje oscilacije kod reakcije sustava na male poremećaje.

Tablica 5.2: Svojstvene vrijednosti sustava prije i nakon integracije HVDC-a

	Svojstvene vrijednosti izvornog sustava	Svojstvene vrijednosti izmijenjenog sustava
1.	-0,00006	-0,00000
2.	-0,02701	-0,02738
3.	$-0,12524 \pm j0,43004$	$-0,11504 \pm j0,44727$
4.	-0,16376	-0,15957
5.	$-0,19802 \pm j0,44459$	$-0,17501 \pm j0,89393$
6.	$-0,21871 \pm j0,84423$	$-0,20099 \pm j0,44542$
7.	$-0,23668 \pm j0,50164$	$-0,22476 \pm 4,07498$

Iako se prema grafičkom i tabličnom prikazu položaja polova zaključuje kako cjeloviti sustav ostaje stabilan nakon izmjena, kako bi se dobio bolji uvid u dinamičko ponašanje sustava, potrebno je provesti analizu oscilatorne stabilnosti u vremenskom području tako da se simuliraju mali poremećaji i uspoređuju se odzivi istih fizikalnih veličina sinkronog generatora.

5.6.2. Utjecaj HVDC sustava na pokazatelje t -domene

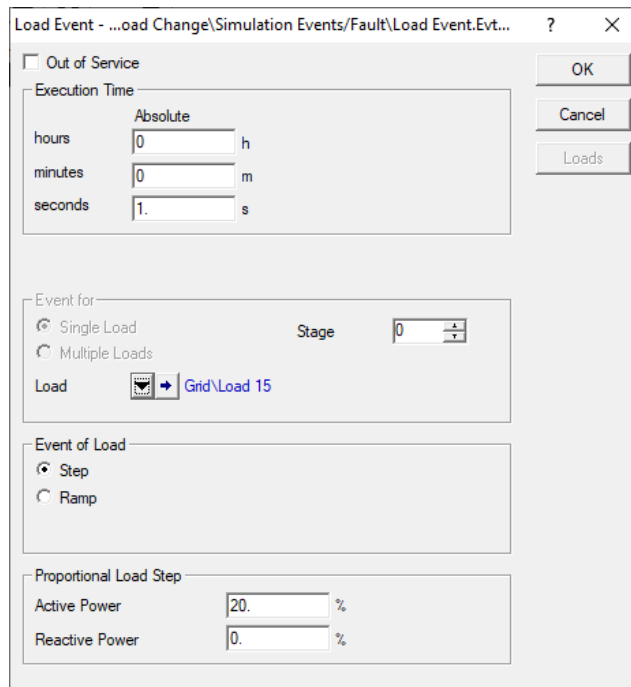
Kao što je već spomenuto, simuliran događaj u nastavku ovog poglavlja je trenutni skok potrošnje djelatne snage kod nekog potrošača. Kako bi se odredio adekvatan apsolutni iznos promjene potražnje, potrebno je razmotriti potražnju svakog potrošača te ukupnu potražnju.

Tablica 5.3: Podaci o teretima u sustavu s 39 sabirnica [7]

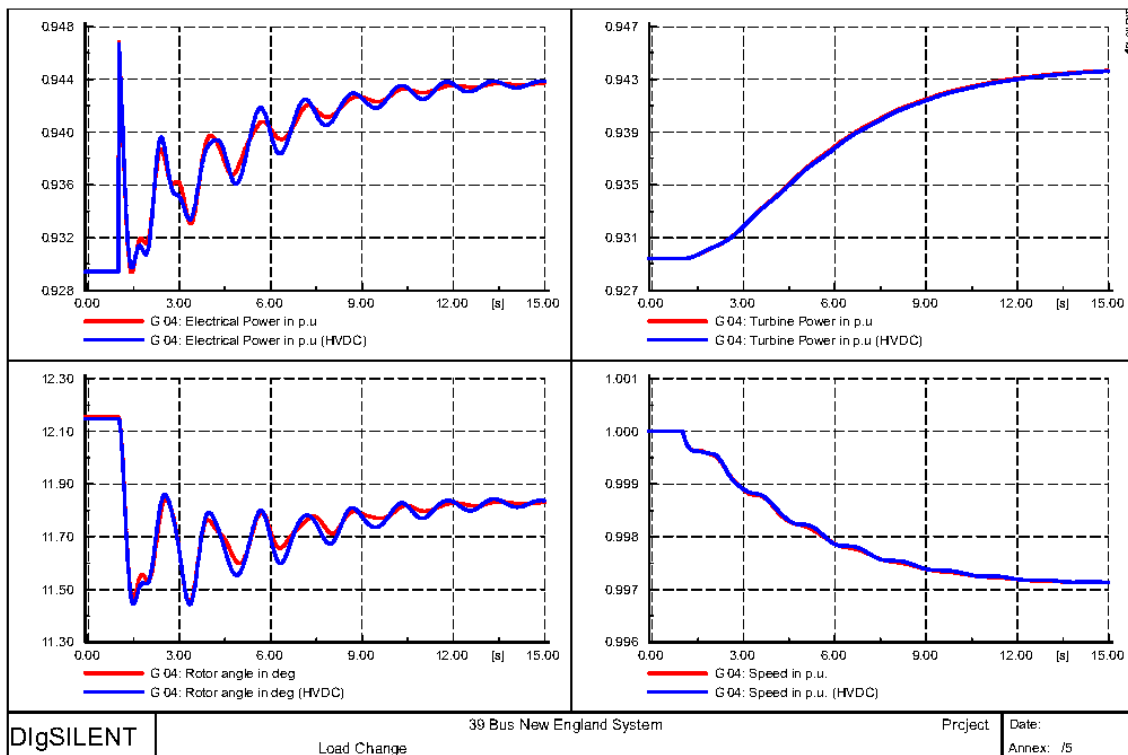
	P [MW]	Q [Mvar]
Load 03	322,0	2,4
Load 04	500,0	184,0
Load 07	233,8	84,0
Load 08	522,0	176,0
Load 12	7,5	88,0
Load 15	320,0	153,0
Load 16	329,0	32,3

Load 18	158,0	30,0
Load 20	628,0	103,0
Load 21	274,0	115,0
Load 23	247,5	84,6
Load 24	308,6	-92,2
Load 25	224,0	47,2
Load 26	139,0	17,0
Load 27	281,0	75,5
Load 28	206,0	27,6
Load 29	283,5	26,9
Load 31	9,2	4,6
Load 39	1104,0	250,0

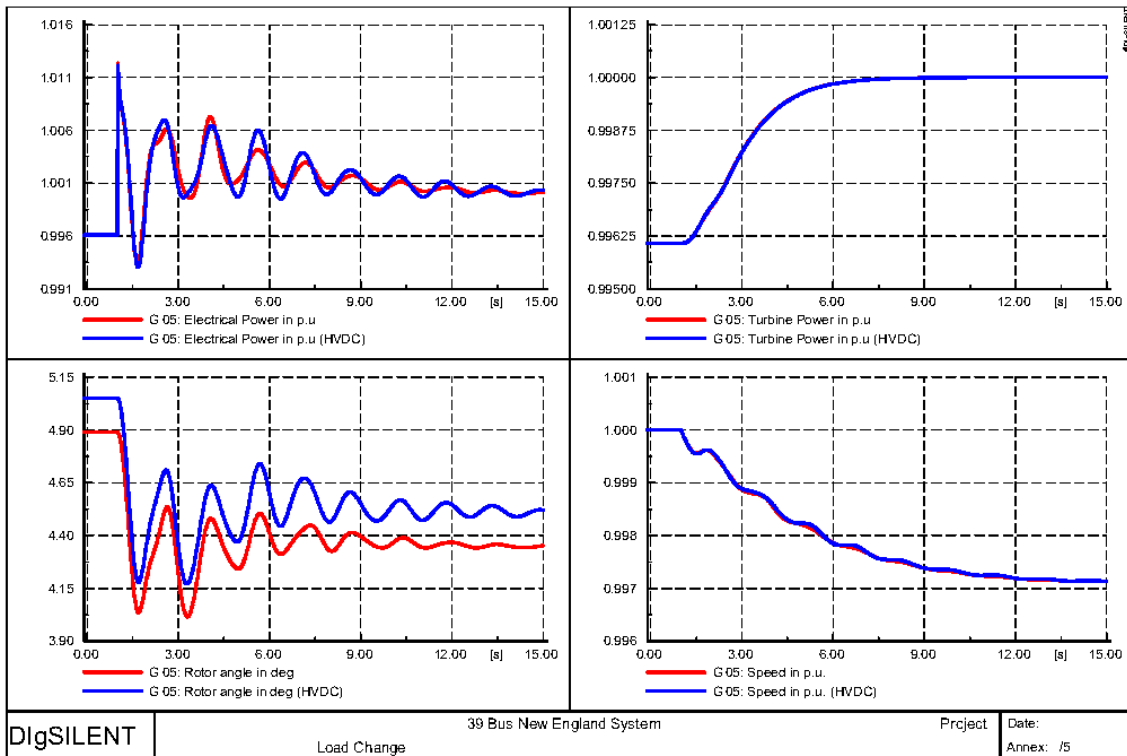
Promatrana elektroenergetska mreža (*39-Bus System*) složeno je umrežena u zamkasto topologiju tako da su izvori električne energije raspoređeni na rubovima zamke. Prema tome je *Load 15* na potrošačkoj sabirnici 15 smislen odabir tereta kojem će se naglo povećati potrošnja djelatne snage jer se pregledom grafičkog prikaza topologije mreže može procijeniti kako je on u središnjem dijelu mreže. Prema vrijednostima djelatne snage u **Tablici 5.3**, ukupna potražnja djelatne snage u sustavu iznosi 6097,1 MW. S obzirom na taj iznos, simulirat će se skokovita promjena potrošnje tereta 15 za +20%, što odgovara apsolutnom iznosu promjene od 64 MW, a to je 1,04% od početne ukupne potrošnje cijelog sustava te se to može smatrati kao trajni poremećaj koji je dovoljno slab za potrebe analize oscilatorne stabilnosti. U ovoj analizi nije upitno hoće li sustav ostati stabilan, već je cilj prikazati oscilogramе fizikalnih veličina kako bi se utvrdilo postoji li, i kolika, razlika u dinamičkoj reakciji sustava kada se usporede dva slučaja u mreži. Prema tome, vrijeme trajanja simulacije povećat će se na 15 sekundi kako bi se uočila reakcija primarnog regulatora turbine generatora te jačina oscilacija kuta rotora i izlazne električne snage generatora.



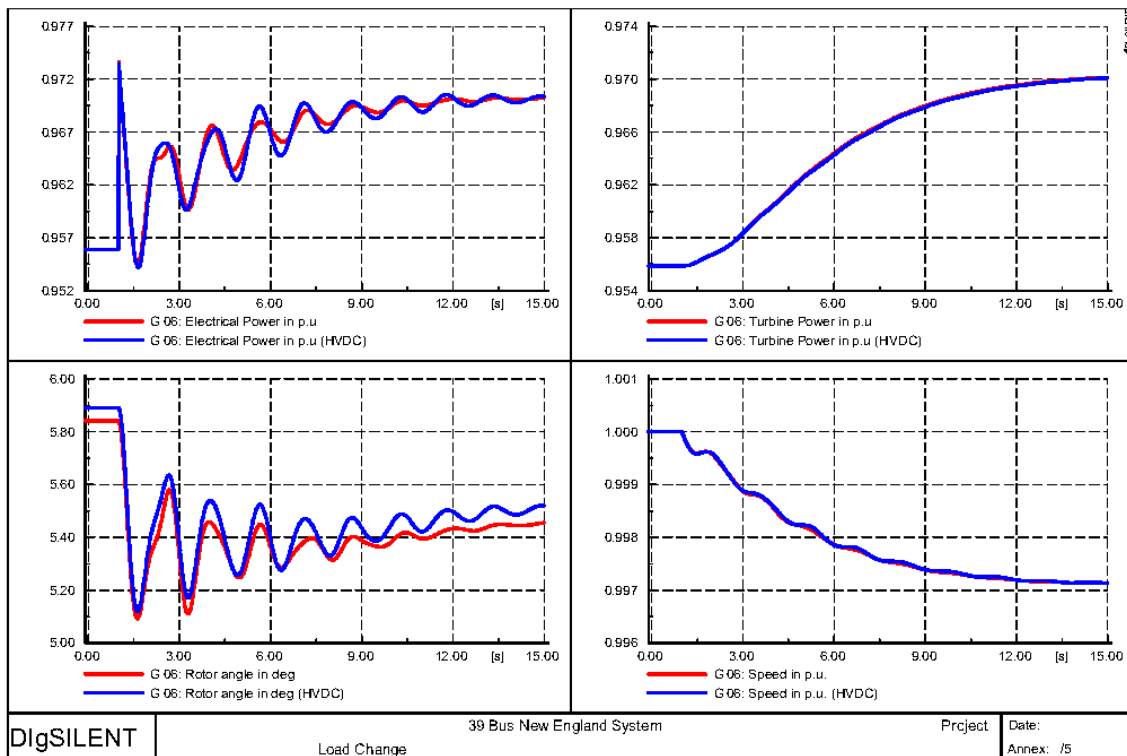
Slika 5.44: Simulirani događaj promjene djelatne snage — skokovita promjena za 20%



Slika 5.45: Oscilogrami za navedeni trajni poremećaj: izlazna el. snaga, snaga turbine, kut rotora i brzina rotora generatora G04



Slika 5.46: Oscilogrami za navedeni trajni poremećaj: izlazna el. snaga, snaga turbine, kut rotora i brzina rotora generatora G05



Slika 5.47: Oscilogrami za navedeni trajni poremećaj: izlazna el. snaga, snaga turbine, kut rotora i brzina rotora generatora G06

Provjerom rezultata simulacije utvrđeno je da svaki od 10 generatora prati isti trend te je zbog toga prikazana reakcija samo za nekoliko odabranih generatora — G04, G05 i G06. Na prethodne dvije slike koje prikazuju oscilogram, crvenom bojom je prikazan oscilogram za slučaj neaktivnog HVDC-a, a plave boje je prikazan slučaj s aktivnim HVDC-om. Primarni regulatori su pravovremeno osjetili i reagirali na poremećaj što se očituje rastom snage turbine te, posljedično tome, smanjenjem brzina rotora. Dobiveni rezultati koji su dobiveni na slikama su očekivani:

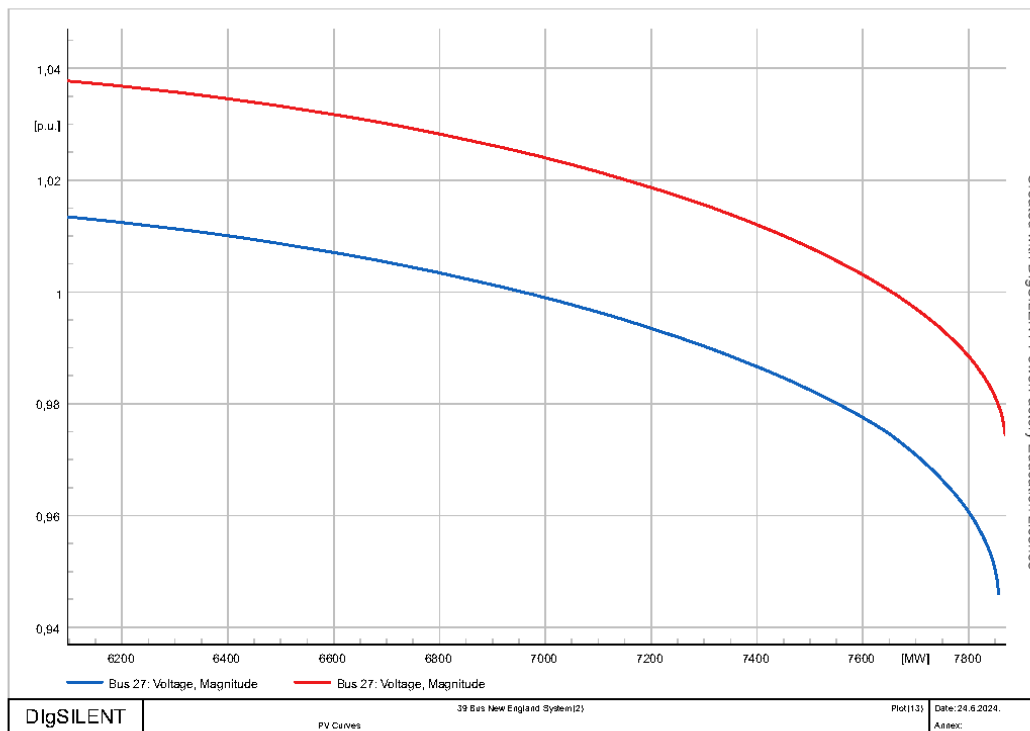
- Budući da se postavke primarnog regulatora nisu mijenjale, u oba slučaja preuzmu isti udio promjene tereta te im se stoga mehanička snaga turbine poveća za isti iznos kako bi se kompenzirao poremećaj u mreži, a grafovi snage turbine prate istu putanju u slučaju neaktivnog i aktivnog HVDC-a. Brzina rotora generatora u skladu s ovim pada sve dok se mehanička snaga turbine ne ustali. Kao i kod grafova snage turbine, i grafovi brzine rotora prate istu putanju za oba scenarija u mreži.
- Uvidom u oscilogram izlazne el. snage generatora, jasno je da je, zbog trenutnog skoka, došlo do poremećaja u mreži — konkretno, do skoka djelatne snage kod jednog od potrošača; iz čega proizlazi i nagli pad kuta rotora. Uz to, oscilogrami kuta rotora i električne snage generatora bilježe oscilacije jačeg intenziteta (većeg raspona) i sporijeg iščezavanja.
- Još je primjetno kako je početna radna kuta rotora kod nekih generatora različita u dva analizirana scenarija, što je indikator promjene početnih varijabli polazne radne stacionarne točke sustava, o čemu je pisano u uvodu rada u teorijskoj raspravi mogućeg utjecaja HVDC sustava na aspekte stabilnosti.

5.7. Analiza pokazatelja naponske stabilnosti. *PV* krivulje

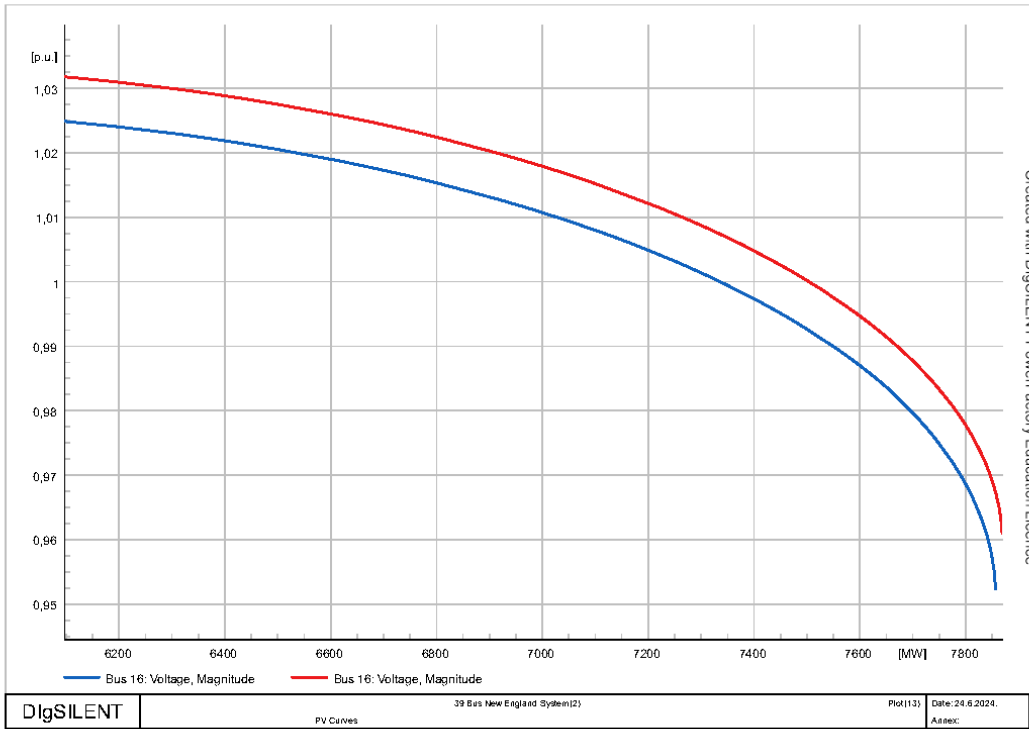
Naponske prilike i pokazatelji naponske stabilnosti promatrat će se kroz promjenu izgleda (pomak) *PV* krivulja potrošačkih sabirnica u mreži integracijom HVDC prijenosa. U poglavlju 3.2 dan je općenit izgled *PV* krivulja te će ovdje simulacijom analiziranog složenog sustava biti potvrđeno kako je izgled krivulja isti bez obzira na složenost sustava. Ono što treba napomenuti jest da postaje ograničenja *DIGSILENT PowerFactory* softvera: naime, moguće je prikazati samo „gornji“ dio *PV* krivulja, odnosno dio krivulje koji odgovara stabilnom

području; nakon kritične točke, rješenje proračuna tokova snaga ne konvergira i simulacija se prekida. Analiza se provodi tako da se faktor snage tereta održava konstantnim, a djelatna snaga se povećava, što rezultira smanjenjem napona na sabirnici. Faktor snage svih tereta u mreži postavljen je na 0,85 ind., tako da je za očekivati krivulje oblika koji najbliže odgovara obliku krivulje pod brojem 2 na **Slici 3.6**.

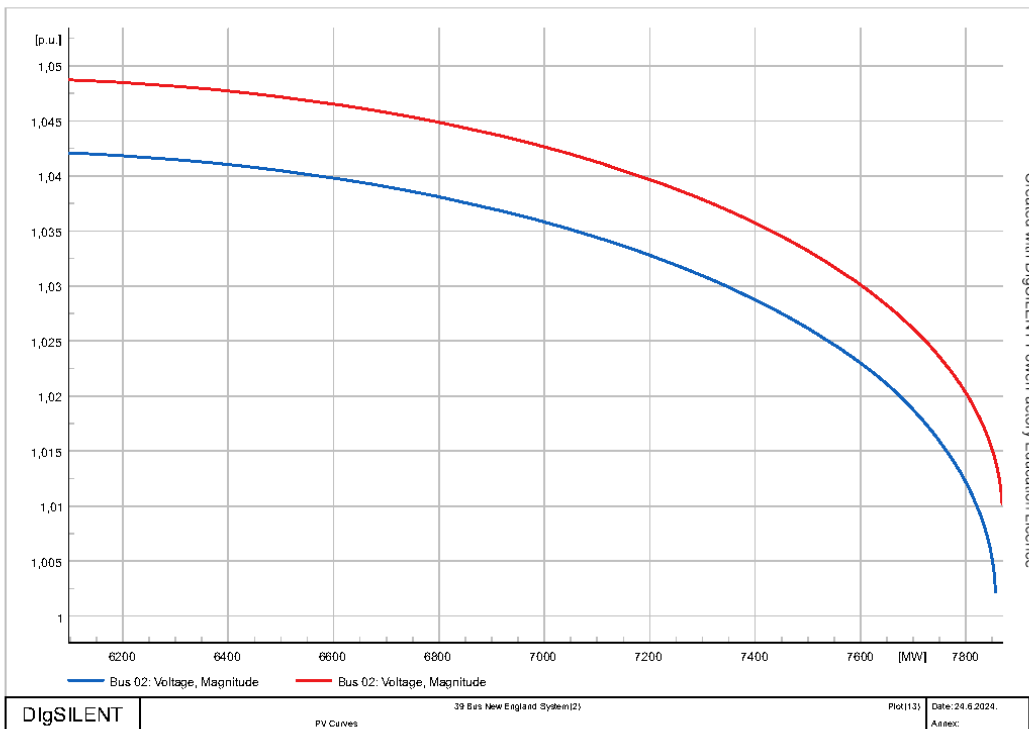
Zbog velikog broja sabirnica (a i drugih elemenata) u mreži, kao i u prijašnjim poglavljima, rezultati simulacije bit će prikazani samo za odabrane sabirnice, iz čega će biti jasno uočljiv trend promjena u sustavu. Generiranje *PV* krivulja pokreće se odabirom modula „*Transmission Network Tools*“ te, zatim, otvaranjem opcije „*PV Curves Calculation*“. Crvenom bojom prikazane su *PV* krivulje izvornog sustava, a plavom bojom izmijenjenog sustava.



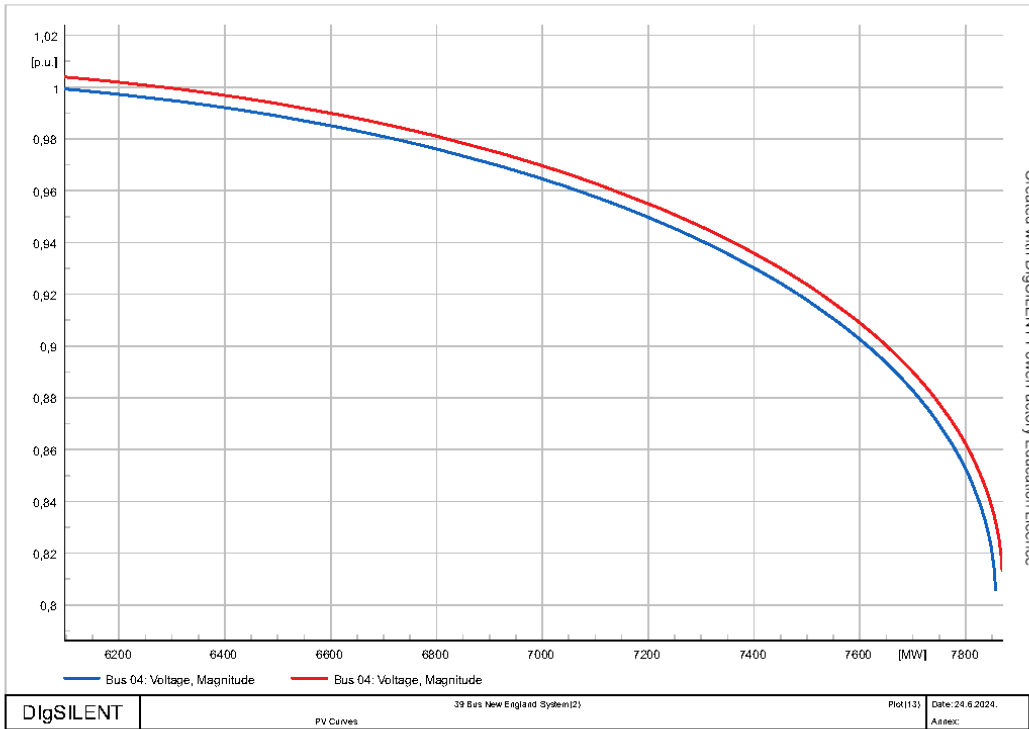
Slika 5.48: *PV* krivulje za sabirnicu 27



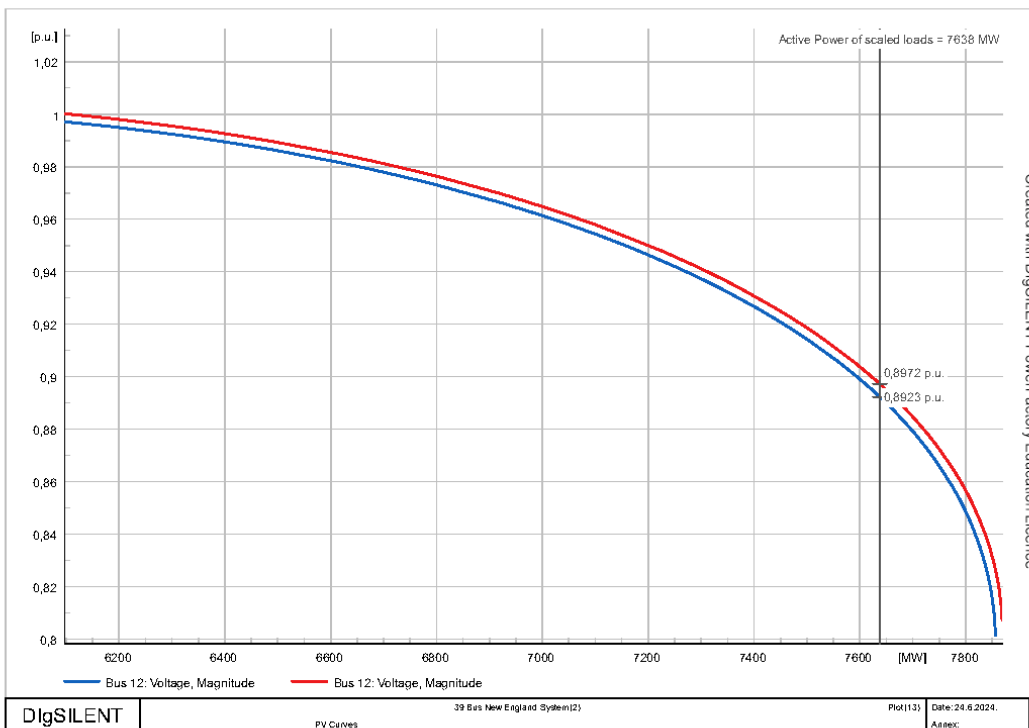
Slika 5.49: *PV* krivulje za sabirnicu 16



Slika 5.50: *PV* krivulje za sabirnicu 2



Slika 5.52: PV krivulje za sabirnicu 4



Slika 5.51: PV krivulje za sabirnicu 12

Odabrane su sabirnice 27, 16, 2, 4 i 12. Strategija odabira sabirnica bila je uzeti nekoliko sabirnica koje su na različitim električkim lokacijama u mreži tako da se vidi utjecaj blizine promatrane sabirnice i HVDC-a na pomak *PV* krivulje. Sabirnice 16 i 4 su potrošačke sabirnice na kojima je u poglavlju 5.5 bio simuliran trofazni kratki spoj te su stoga i ovdje uzete. Sabirnica 27, koja je vrlo blizu HVDC-a (najbliže od odabranih pet sabirnica) bilježi najveći pomak *PV* krivulje, odnosno na njoj je inducirano najveće smanjenje napona. Sabirnice 4 i 12 su vrlo udaljene od HVDC-a te je na njima zabilježen najslabiji utjecaj na napon. Prema istraživanju naponske stabilnosti ove mreže [31], utvrđeno je kako je sabirnica 12 kritična (naponski najosjetljivija); a ona je ujedno i potrošačka sabirnica najnižeg nominalnog napona (138 kV) te je iz tog razloga odabrana kao jedna od sabirnica na kojoj se proučava naponska stabilnost kroz *PV* krivulje. Pomak po naponskoj osi za tu sabirnicu iznosi 0,0049 pu, što je u praksi zanemariva razlika.

Prema teoriji o naponskoj stabilnosti i *PV* krivuljama iz poglavlja 3.2, promatra se pri kojoj prenesenoj snazi dolazi do naponskog sloma i koji je napon kritične točke (krajnje točke na krivulji). Kao što je i prije rečeno, poželjan je rad gdje je osigurana dovoljna rezerva snage kako bi se izbjeglo nestabilno područje, a to je područje gdje funkcija dV/dP nema nagli porast apsolutne vrijednosti (teoretski, u kritičnoj točki prva derivacija teži u minus beskonačno). Primjetno je kako *PV* krivulje imaju samo pomak po naponskoj osi, što sugerira da se naponski slom odvija pri istoj prenesenoj snazi u oba scenarija, ali za različite iznose napona — u scenariju s aktivnim HVDC-om, kritični napon niže je vrijednosti.

Najniži napon od 0,8 pu postignut je kao krajnja točka *PV* krivulje najosjetljivije sabirnice (sabirnice 12) u slučaju kada je HVDC aktivan. Kritični napon, gledano sa stajališta zaštite i kvalitete, je 0,85 pu — podnaponska zaštita uobičajeno na taj napon reagira za najduže nekoliko sekundi. Gledajući *PV* krivulje za sabirnicu 12, očito je da je sustav i dalje stabilan pri naponu od 0,85 pu, no treba uzeti u obzir kako će u toj radnoj točki sustav zaštite prekinuti opskrbu električnom energijom. Iz ovog opažanja se donosi zaključak o mogućem negativnom utjecaju HVDC-a na naponsku stabilnost: pomicanje *PV* krivulje po naponskoj osi može dovesti do smanjenja maksimalnog kapaciteta snage, ukoliko su sabirnice naponski osjetljive, tj. ukoliko se postigne kritični napon od 0,85 pu. U elektroenergetskoj mreži koja se u ovom radu razmatra, HVDC je električki vrlo udaljen od osjetljivih potrošačkih sabirnica te je stoga razlika u maksimalnom kapacitetu snage za najniži dozvoljeni napon na tim sabirnicama zanemariva.

6. ZAKLJUČAK

Visokonaponski istosmjerni prijenos ili istosmjerni veleprijenos (skraćeno: HVDC) u komercijalnoj je upotrebi od sedamdesetih godina prošlog stoljeća. Temelj za napredak ovog novog tehničkog rješenja bio je razvoj elektroničkih energetske pretvarača koji su implementacijom tiristora omogućili AC-DC i DC-AC pretvorbu. Takav HVDC, kojeg čine tiristorski pretvarači, naziva se LCC tip — skraćeno od *Line-commutated converter* (mrežom komutirani pretvarač). HVDC je postao relevantan zbog prednosti u nekim određenim primjenama: primarno za prijenos velike količine snage na duže udaljenosti te kabelsku vezu — pretežito kod povezivanja dva elektroenergetska sustava podmorskim kabelima.

Kako je konačni cilj ovog rada analiza stabilnosti sustava, u trećem poglavlju rada izložen je matematički model za stabilnost kuta rotora koja se može podijeliti na tranzijentnu i oscilatornu stabilnost te stabilnost napona u prijenosnoj mreži vrlo visokog napona. Principi i pokazatelji stabilnosti koji su predstavljeni u teorijskom dijelu, korišteni su kroz ostatak rada u praktičnom dijelu, gdje se provodi analiza stabilnosti sustava.

U četvrtom poglavlju u teorijskom pregledu istosmjernog prijenosa napravljena je analiza rada trofaznog poluupravljivog pretvarača u mosnom spoju te je obrađena tematika koja je usko vezana uz rad tih pretvarača u elektroenergetskoj mreži. Dva takva pretvarača koriste se u jednopolnoj konfiguraciji LCC-HVDC-a kakva je implementirana u ovom radu — jedan pretvarač radi kao ispravljač, a drugi kao izmjenjivač. Radi zahtjeva za glatku struju, u seriju sa svakim pretvaračem je povezana prigušnica za izravnavanje, a na sredinu veze dodan je kondenzator kao reaktivna komponenta za izravnavanje napona.

Praktični dio rada povezuje znanja iz energetske elektronike, analize elektroenergetskog sustava, stabilnosti i prijelaznih procesa i kvalitete električne energije. U mreži koja je predmet istraživanja — IEEE sustav s 39 sabirnica — selekcijom čvorova prema uvjetima za integraciju HVDC sustava odabrane su dvije sabirnice, koje su izvorno povezane AC dalekovodom, kao krajnje točke ili spojnice HVDC veze i ostatka sustava. Provjerom uvjeta za prihvatljiv rad HVDC-a i naponskih prilika u izvornom sustavu, podešena je radna točka ($U_{d\ set}; I_{d\ set}$) = (450 kV; 0,8 kA), tako da je ispravljač u CC (*constant current*) načinu rada a izmjenjivač u CV (*constant voltage*) načinu rada. To daje snagu prijenosa od 360 MW, uz to da su gubici prijenosa razmjerno mali — uzdužni otpor veze je 3 Ω, što rezultira gubicima od 1,92 MW (ili 0,53%). Nakon integracije HVDC veze u mrežu, provedena je harmonijska analiza te je

potvrđeno kako HVDC, kao nelinearno trošilo, uzrokuje više harmonike koje je potrebno isfiltrirati. Ugradnjom pasivnih filtara na kritične sabirnice — AC sabirnicu ispravljача i izmjenjivača — neutralizirani su nepoželjni viši harmonici struje te je ponovnom harmonijskom analizom utvrđeno kako su načela kvalitete napona u mreži zadovoljena.

Tranzijentna stabilnost analizirana je simulacijom trofaznog kratkog spoja na sabirnicama, što je najteži kvar ili poremećaj. Budući da je sustav vrlo složen (sastoji se od 39 sabirnica i 10 generatora), nije bilo praktično prikazivati rezultate svih sabirnica kao ishode istraživanja, već su smisleno odabrane tri sabirnice za koje je razmatran utjecaj na tranzijentnu stabilnost. Promatrani su oscilogrami brzine rotora, kuta rotora i napona sabirnica te je uz to određeno kritično vrijeme čišćenja za oba scenarija — bez HVDC-a i s HVDC-om. Za sabirnicu 16 dobiveno je 170 ms u prvom scenariju i 155 ms u drugom scenariju; za sabirnicu 4: 260 i 240 ms; i za sabirnicu 31 je kritično vrijeme isto za oba scenarija: 210 ms. Iz toga se da zaključiti kako je za sabirnicu 31, koja je električki najudaljenija od HVDC-a, utjecaj HVDC-a najblaži — konkretno u navedenom slučaju i nezamjetan. Oscilatorna stabilnost proučavana je uvidom u pokazatelje stabilnosti u s -domeni i t -domeni kako bi se dobila jasna slika o inherentnom dinamičkom ponašanju sustava. Integracijom HVDC sustava, sve svojstvene vrijednosti su ostale u lijevoj kompleksnoj poluravnini što upućuje da je sustav ostao stabilan, no primjetan je pomak dominantnih oscilatornih konjugirano-kompleksnih parova udesno (prema imaginarnoj osi). Vjerodostojniji iskaz dinamičke prirode sustava dobiven je provedbom simulacija u t -domeni, gdje se definira mali poremećaj te se promatra dinamička reakcija sustava kroz oscilogramе krucijalnih fizikalnih veličina vezanih uz sinkrone generatore. Rezultati prikazuju da su oscilacije električne snage i kuta rotora generatora vremenski dulje i većeg raspona envelope, što upućuje na to da se utjecaj HVDC sustava manifestirao i na aspekte oscilatorne stabilnosti.

Naponske prilike i stabilnost napona promatrana je kroz PV krivulje potrošačkih sabirnica u sustavu. Analiza PV krivulja dovodi do zaključka kako integracija HVDC sustava uzrokuje spuštanje napona na svim sabirnicama, uz isto prenesenu snagu — drugim riječima, PV krivulja svake sabirnice pomaknuta je vertikalno prema P -osi. Budući da nema horizontalnog pomaka PV krivulja, kritična točka stabilnosti nastupa za istu prenesenu snagu. To sugerira da integracija HVDC sustava nije imala izražen utjecaj na naponsku stabilnost, promatrano kroz PV krivulje, iako su naponske prilike u mreži nešto bolje u izvornom sustavu.

Kada se rezultati svih simulacija uzmu u obzir, zaključuje se da se integracija HVDC prijenosa u mrežu manifestirala na indikatore stabilnosti sustava. Nepoželjan učinak jasan je iz smanjenja kritičnog vremena čišćenja ozbiljnijeg kvara te jačih oscilacija pri reakciji na male poremećaje. Uz to, posljedice po naponske prilike su također primjetne — HVDC je kao nelinearan sustav velik potrošač induktivne jalove snage te kao takav uzrokuje snižavanje napona u mreži, što u nekim slučajevima znači nužnost ugradnje sustava kompenzacije. Iako su promjene u dinamičkoj prirodi sustava postojane, one nisu bile vrlo velike; jer podešena snaga prijenosa je razmjerno mala u odnosu na ukupnu snagu svih sinkronih generatora, što je bio nužan zahtjev kako bi se ispunio uvjet za ESCR. Prema tome, ozbiljan utjecaj i promjena parametara prisutna je najviše u električkoj blizini sabirnica na koje je HVDC priključen.

LITERATURA

- [1] P. Kundur, *Power System Stability and Control*. McGraw-Hill, Inc.
- [2] J. Machowski, J. W. Bialek, i J. R. Bumby, *Power System Dynamics: Stability and Control*. John Wiley & Sons, Ltd., 2008.
- [3] I. Flegar, *Elektronički energetska pretvarači*. Kigen d.o.o. Zagreb, 2010.
- [4] D. W. Hart, *Power Electronics*. McGraw-Hill, Inc, 2011.
- [5] E. W. Kimbark, *Direct Current Transmission*. John Wiley & Sons, Inc, 1971.
- [6] „DIgSILENT PowerFactory User Manual“. DIgSILENT GmbH, 2022.
- [7] DIgSILENT PowerFactory, „39 Bus New England System“.
- [8] DIgSILENT PowerFactory, „HVDC LCC Modelling“. DIgSILENT GmbH.
- [9] ANSI/IEEE Standards, *IEEE Guide for Specification of High-Voltage Direct-Current Systems Part I: Steady-State Performance*, 1030, 1987.
- [10] ANSI/IEEE Standards, *IEEE Guide for Planning DC Links Terminating at AC Locations Having Low Short-Circuit Capacities*, 1204, 1997.
- [11] M. Szechtman i T. Wess, „A Benchmark model for HVDC system studies“, predstavljeno na International Conference on AC and DC, 1991, str. 374–378.
- [12] T. Košorog, „Utjecaj PSS stabilizatora na stabilnost sustava“, Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku. Elektrotehnički fakultet Osijek, 2016.
- [13] „High-voltage direct current“, *Wikipedia*. [Na internetu]. Dostupno na: https://en.wikipedia.org/wiki/High-voltage_direct_current
- [14] „Eel River Converter Station“, *Wikipedia*. [Na internetu]. Dostupno na: https://en.wikipedia.org/wiki/Eel_River_Converter_Station
- [15] T. Gönen, *Electric Power Transmission System Engineering*. John Wiley & Sons, Inc, 1980.
- [16] N. Flourentzou, V. G. Agelidis, i G. D. Demetriades, „VSC-Based HVDC Power Transmission Systems: An Overview“, *IEEE Trans. POWER Electron.*, sv. 24, izd. 3, 2009.
- [17] R. E. Torres-Olguin, M. Molinas, i T. Undeland, „Offshore Wind Farm Grid Integration by VSC Technology With LCC-Based HVDC Transmission“, *IEEE Trans. Sustain. ENERGY*, sv. 3, izd. 4, 2012.
- [18] „PowerFactory Technical Reference: HVDC LCC/CCC“. DIgSILENT GmbH, 2022.
- [19] „PowerFactory Technical Reference: Rectifier/Inverter“. DIgSILENT GmbH, 2022.

- [20] C. V. Thio, J. B. Davies, i K. L. Kent, „Commutation Failure in HVDC Transmission Systems“, *IEEE Trans. Power Deliv.*, sv. 11, izd. 2, 1996.
- [21] „PowerFactory Technical References: Two-Winding Transformer (3-phase)“. DIgSILENT GmbH, 2022.
- [22] J. H. Chow i J. J. Sanchez-Gasca, *Power System Modeling, Computation and Control*. John Wiley & Sons Ltd, 2020.
- [23] A. Ekstrom i G. Liss, „A Refined HVDC Control System“, *IEEE Trans. POWER Appar. Syst.*, sv. 89, izd. 5/6, 1970.
- [24] E. Rahimi, A. M. Gole, J. B. Davies, I. T. Fernando, i K. L. Kent, „Commutation Failure Analysis in Multi-Infeed HVDC Systems“, *IEEE Trans. Power Deliv.*, sv. 26, izd. 11, 2011.
- [25] L. Zhang i L. Donfas, „A novel method to mitigate commutation failures in hvdc systems“, predstavljeno na International Conference on Power System Technology, Kunming, Kina, 2002.
- [26] K. Ožegović i M. Ožegović, *Električne energetske mreže*. Split: FESB Split, 2002.
- [27] C. W. Taylor, *Power System Voltage Stability*. McGraw-Hill, Inc, 1993.
- [28] T. Athay, R. Podmore, i S. Virmani, „A Practical Method for the Direct Analysis of Transient Stability“, *IEEE Trans. Power Appar. Syst. Trans. Power Appar. Syst.*, sv. 98, izd. 2, 1979.
- [29] „Excitation System Models“. EasyPower. [Na internetu]. Dostupno na: https://help.easypower.com/ezp/10.2/Content/19_Dynamic_Stability/Stability_Data_Parameters_Excitation_System_Models.htm
- [30] „Dynamic Models for Turbine Governors in Power System Studies“, IEEE Power & Energy Society, 2013.
- [31] S. Chakrabarti, „Static load modelling and voltage stability indices“, *Int. J. Power Energy Syst.*, sv. 29, izd. 3, 2009.

SAŽETAK

Na početku ovog rada opisan je matematički model stabilnosti kuta rotora i napona u prijenosnoj mreži. U teoretskoj obradi također je kao nužnost obrađen rad i primjena elektroničkih energetske pretvarača koji su temelj HVDC veze LCC tipa koja je predmet istraživanja diplomskog rada. Praktični dio rada sastoji se od podešenja parametara HVDC sustava i njegove integracije u 345-kV prijenosnu mrežu te analize utjecaja na pokazatelje stabilnosti sustava. Uz same pretvarače su, kao dio sustava, implementirane i reaktivne komponente i pasivni filtri kao mjera poboljšanja harmonijskog spektra struja i napona. Nakon utvrđivanja ispunjenosti načela kvalitete električne energije, provedene su simulacije za analizu tranzijentne i oscilatorne stabilnosti. Utjecaj na tranzijentnu stabilnost promatrao se kroz odziv sustava na veliki poremećaj (trofazni kratki spoj na sabirnici) s naglaskom na određivanje kritičnog vremena čišćenja. Pokazatelji oscilatorne stabilnosti vrednovani su u s - i t -domeni tako da su analizirani položaj svojstvenih vrijednosti u kompleksnoj ravnini i dinamički odzivi sinkronih generatora na mali poremećaj (promjena opterećenja). Na kraju su generirane PV krivulje kako bi se provela procjena utjecaja HVDC-a na naponske prilike u sustavu i stabilnost napona.

Ključne riječi: HVDC, tranzijentna stabilnost, oscilatorna stabilnost, stabilnost napona, PV krivulje.

ABSTRACT

Analysis of the Impact of HVDC Integration on Rotor Angle and Voltage Stability in Transmission Network

This paper begins by describing a mathematical model for rotor angle stability and voltage stability in the transmission network. In the theoretical section, the work also addresses the necessity and application of power electronics converters, which are fundamental to the LCC-type HVDC link, the subject of this thesis. The practical aspect of paper involves the adjustment of HVDC system parameters and its integration into the 345-kV transmission network, followed by an analysis of its impact on power system stability indicators. In addition to the converters, reactive components and passive filters have been implemented as part of the system to improve the harmonic spectrum of currents and voltages. After ensuring compliance with power quality standards, simulations were conducted to analyze transient and small-signal stability. The impact on transient stability was observed through the system's response to a major disturbance (a three-phase short circuit on the busbar), with an emphasis on determining the critical clearing time. Indicators of small-signal stability were evaluated in the s - and t -domains by analyzing the position of eigenvalues in the complex plane and the dynamic responses of synchronous generators to a small disturbance (load change). Ultimately, PV curves were generated to assess the influence of the HVDC on voltage conditions and stability of the system.

Keywords: HVDC, transient stability, small-signal stability, voltage stability, PV curves.

ŽIVOTOPIS

Jakov Rastija rođen je 8. rujna 2000. u Osijeku. Nakon završenog osnovnoškolskog obrazovanja upisuje III. gimnaziju Osijek koju završava 2019. s vrlo dobrim uspjehom. Sveučilišni prijediplomski studij Elektrotehnike i informacijskih tehnologije na Fakultetu elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija Osijek upisuje iste godine. Tijekom sve tri godine prijediplomskog studija ima ostvareno pravo na državnu STEM stipendiju kao ishod uspjeha u studiranju i rezultata Državne mature. Prijediplomski studij završava 2022. godine s vrlo dobrim uspjehom s temom završnog rada “Uvjeti primjene Kirchhoffovih zakona”, te iste godine upisuje Sveučilišni diplomski studij Elektrotehnike, smjer Elektroenergetika. Zbog ukupnog uspjeha na prijediplomskom studiju, na prvoj godini diplomskog studija postaje stipendist Osječko-baranjske županije, a na drugoj godini diplomskog studija stječe stipendiju tvrtke HEP ODS Elektroslavonija Osijek.

Tijekom prijediplomskog i diplomskog studija sudjeluje u izvođenju laboratorijskih vježbi iz nekoliko kolegija u Laboratoriju za energetske elektroniku kao demonstrator. Stručnu praksu odradio je u Centru za terenske aktivnosti u Elektroslavoniji u Osijeku.

Aktivno se služi engleskim jezikom u govoru i pismu. Napredni je korisnik računala i vrlo dobro se zna koristiti programskim paketom MS Office, a tijekom studija savladao je osnove softvera AUTOCAD, MATLAB, EPLAN, EasyPower i PowerWorld. Uz to se tijekom izrade diplomskog rada detaljnije upoznao s modeliranjem i simulacijama u DIgSILENT-u.

POPIS SLIKA I TABLICA

Popis slika

Slika 3.1: Jednopolni prikaz sustava za proučavanje tranzijentne stabilnosti	7
Slika 3.2: Jednofazna mreža sustava za proučavanje tranzijentne stabilnosti	7
Slika 3.3: Grafički prikaz ovisnosti snaga-kut.....	8
Slika 3.4: Prikaz površina ubrzanja i kočenja: (a) stabilan slučaj. $A_u = A_{1234}$, $A_k = A_{4567}$, $A_u < A_k \implies t_c < t_{cr}$; (b) nestabilan slučaj. $A_u = A_{1234}$, $A_k = A_{458}$, $A_u > A_k \implies$ $t_c > t_{cr}$	9
Slika 3.5: Ekvivalentna shema prijenosne mreže koja napaja nadomjesni teret.....	15
Slika 3.6: Familija PV krivulja za različite faktore snage tereta: $\cos(\phi_1) \approx 0,71$ ind., $\cos(\phi_2) \approx 0,87$ ind., $\cos(\phi_3) \approx 1$, $\cos(\phi_4) \approx 0,87$ kap.	16
Slika 4.1: Konfiguracija jednopolnog HVDC sustava	18
Slika 4.2: Konfiguracija dvopolnog HVDC sustava	19
Slika 4.3: Karakteristika poluupravljive strujno jednosmjerne sklopke.....	19
Slika 4.4: Simbol i tipična u-i karakteristika energetskog tiristora.....	20
Slika 4.5: Topologija trofaznog pretvarača u mosnom spoju	22
Slika 4.6: Valni oblik napona trošila za slučaj $\alpha = 0$	22
Slika 4.7: Valni oblik napona trošila za slučaj $\alpha = 45^\circ$	24
Slika 4.8: Valni oblici napona i struje mreže pri kutu upravljanja $\alpha = 60^\circ$	24
Slika 4.9: Valni oblik napona trošila pri kutu upravljanja $\alpha = 150^\circ$	27
Slika 4.10: Valni oblici napona i struje mreže pri kutu upravljanja $\alpha = 150^\circ$	27
Slika 4.11: Električka shema sekundara regulacijskog transformatora (AC strane) pomoću kojeg se napaja pretvarač	28
Slika 4.12: Ekvivalentna električka mreža pretvarača za interval $\pi/3 < \omega t < \pi/3 + \mu$	29
Slika 4.13: Ekvivalentna mreža ispravljača za istosmjerne vrijednosti	31
Slika 4.14: Ekvivalentna mreža izmjenjivača za istosmjerne vrijednosti	32
Slika 4.15: Ekvivalentna mreža LCC HVDC sustava za istosmjerne vrijednosti.....	33
Slika 4.16: Upravljačka karakteristika usmjerivača u stacionarnom stanju za slučaj kada je tok snage pozitivan.....	36
Slika 4.17: Cjelovita upravljačka karakteristika usmjerivača u stacionarnom stanju.....	37
Slika 4.18: Pasivni filtri: serijski filter (lijevo), visokopropusni filter drugog reda (u sredini) i visokopropusni filter trećeg reda (desno).....	38

Slika 5.1: IEEE sustav s 39 sabirnica u DIgSILENT-u.....	42
Slika 5.2: Rezultati proračuna kratkog spoja za sabirnice 26 i 29	44
Slika 5.3: Projektni tip šesteropulsnog ispravljača koji se dodjeljuje elementu pretvarača ispravljača u grafičkom prikazu mreže	46
Slika 5.4: Projektni tip šesteropulsnog izmjenjivača koji se dodjeljuje elementu pretvarača izmjenjivača u grafičkom prikazu mreže	46
Slika 5.5: Podešenje projektnog tipa istosmjernog dalekovoda.....	47
Slika 5.6: Podešenje parametara serijskih prigušnica: $L = 600 \text{ mH}$, $R = 0 \Omega$	48
Slika 5.7: Podešenje parametara poprečnog kondenzatora: $Q_C, n = 1000 \text{ Mvar}$, $U_n = 440 \text{ kV}$, $G = 0 \mu\text{S}$	49
Slika 5.8: Grafički jednopolni prikaz dizajniranog sustava u DIgSILENT-u (istosmjerni dio je roze boje)	49
Slika 5.9: Rezultati proračuna kratkog spoja za sabirnice 26 i 29 uz integrirani HVDC sustav	50
Slika 5.10: Izvršenje naredbe za proračun tokova snaga u mreži	50
Slika 5.11: Rezultati proračuna tokova snaga u mreži bez HVDC sustava.....	51
Slika 5.12: Prikaz spajanja kompenzacije jalove snaga na sabirnicu 29 u grafičkom sučelju (uokvireno sivim okvirom).....	52
Slika 5.13: Podešenje parametara kapacitivnog trofaznog sustava kompenzacije	52
Slika 5.14: Rezultati proračuna tokova snaga u mreži s HVDC sustavom	54
Slika 5.15: Harmonijski spektar struje VN strane transformatora 29-38	55
Slika 5.16: Harmonijski spektar struje VN strane transformatora 29-38 nakon ugrađivanja filtera	56
Slika 5.17: Rezultati za Harmonic Load Flow.....	57
Slika 5.18: Općeniti prikaz trofaznog kratkog spoja u mreži	58
Slika 5.19: Događaji kratkog spoja u RMS simulaciji: nastanak kvara (lijevo) i čišćenje kvara (desno).....	59
Slika 5.20: Rezultati proračuna početnih uvjeta — stacionarna radna točka u $t = 0$	60
Slika 5.21: Trofazni kratki spoj na sabirnici 16 (stabilan slučaj). Oscilogram kuta rotora svih generatora	61
Slika 5.22: Trofazni kratki spoj na sabirnici 16 (stabilan slučaj). Oscilogram kuta rotora svakog generatora: u odnosu na ref. stroj (lijevo) i u odnosu na kut napona ref. sabirnice (desno).....	61

Slika 5.23: Trofazni kratki spoj na sabirnici 16 (stabilan slučaj). Oscilogram napona svih sabirnica.....	62
Slika 5.24: Trofazni kratki spoj na sabirnici 4 (stabilan slučaj). Oscilogram kuta rotora svakog generatora: u odnosu na ref. stroj (lijevo) i u odnosu na kut napona ref. sabirnice (desno).....	63
Slika 5.25: Trofazni kratki spoj na sabirnici 4 (stabilan slučaj). Oscilogram kuta rotora svih generatora	64
Slika 5.26: Trofazni kratki spoj na sabirnici 4 (stabilan slučaj). Oscilogram napona svih sabirnica.....	64
Slika 5.27: Trofazni kratki spoj na sabirnici 31 (stabilan slučaj). Oscilogram kuta rotora svakog generatora: u odnosu na ref. stroj (lijevo) i u odnosu na kut napona ref. sabirnice (desno).....	65
Slika 5.28: Trofazni kratki spoj na sabirnici 31 (stabilan slučaj). Oscilogram kuta rotora svih generatora	65
Slika 5.29: Trofazni kratki spoj na sabirnici 31 (stabilan slučaj). Oscilogram napona svih sabirnica.....	66
Slika 5.30: Rezultati proračuna početnih uvjeta za scenarij s HVDC-om — stacionarna radna točka u $t = 0$	67
Slika 5.31: Trofazni kratki spoj na sabirnici 16, uz HVDC (nestabilan slučaj). Oscilogram kuta rotora svih generatora	67
Slika 5.32: Trofazni kratki spoj na sabirnici 16, uz HVDC (nestabilan slučaj). Oscilogram kuta rotora svakog generatora: u odnosu na ref. stroj (lijevo) i u odnosu na kut napona ref. sabirnice (desno).....	68
Slika 5.33: Trofazni kratki spoj na sabirnici 16, uz HVDC (nestabilan slučaj). Oscilogram napona svih sabirnica	68
Slika 5.34: Trofazni kratki spoj na sabirnici 16, uz HVDC (nestabilan slučaj). Stanje u mreži na kraju RMS simulacije ($t = 4,998$ s).....	69
Slika 5.35: Trofazni kratki spoj na sabirnici 16, uz HVDC (stabilan slučaj). Oscilogram kuta rotora svakog generatora: u odnosu na ref. stroj (lijevo) i u odnosu na kut napona ref. sabirnice (desno).....	70
Slika 5.36: Trofazni kratki spoj na sabirnici 16, uz HVDC (stabilan slučaj). Oscilogram kuta rotora svih generatora.....	70
Slika 5.37: Trofazni kratki spoj na sabirnici 16, uz HVDC (stabilan slučaj). Oscilogram napona svih sabirnica	71

Slika 5.38: Trofazni kratki spoj na sabirnici 4, uz HVDC (stabilan slučaj). Oscilogram kuta rotora svih generatora.....	72
Slika 5.39: Trofazni kratki spoj na sabirnici 4, uz HVDC (stabilan slučaj). Oscilogram kuta rotora svakog generatora: u odnosu na ref. stroj (lijevo) i u odnosu na kut napona ref. sabirnice (desno).....	72
Slika 5.40: Trofazni kratki spoj na sabirnici 4, uz HVDC (stabilan slučaj). Oscilogram napona svih sabirnica	73
Slika 5.41: Trofazni kratki spoj na sabirnici 31, uz HVDC (stabilan slučaj). Stanje u mreži na kraju RMS simulacije ($t = 4,998$ s)	74
Slika 5.42: KMK izvornog sustava (bez HVDC-a).....	75
Slika 5.43: KMK izmijenjenog sustava (s HVDC-om).....	76
Slika 5.44: Simulirani događaj promjene djelatne snage — skokovita promjena za 20%	79
Slika 5.45: Oscilogrami za navedeni trajni poremećaj: izlazna el. snaga, snaga turbine, kut rotora i brzina rotora generatora G04.....	79
Slika 5.46: Oscilogrami za navedeni trajni poremećaj: izlazna el. snaga, snaga turbine, kut rotora i brzina rotora generatora G05.....	80
Slika 5.47: Oscilogrami za navedeni trajni poremećaj: izlazna el. snaga, snaga turbine, kut rotora i brzina rotora generatora G06.....	80
Slika 5.48: PV krivulje za sabirnicu 27	82
Slika 5.49: PV krivulje za sabirnicu 16	83
Slika 5.50: PV krivulje za sabirnicu 2	83
Slika 5.51: PV krivulje za sabirnicu 12	84
Slika 5.52: PV krivulje za sabirnicu 4.....	84

Popis tablica

Tablica 5.1: Podaci sinkronih generatora [7]	42
Tablica 5.2: Svojstvene vrijednosti sustava prije i nakon integracije HVDC-a	77
Tablica 5.3: Podaci o teretima u sustavu s 39 sabirnica [7]	77