

## ANALISIS UNJUK KERJA HIGH VOLTAGE DIRECT CURRENT (HVDC) BERBASIS VOLTAGE SOURCE CONVERTER (VSC) SAAT STARTING DAN GANGGUAN HUBUNG SINGKAT

*Performance Voltage Source Converter (VSC)-Based High Voltage Direct Current (HVDC)  
on Starting and Undergoing Short – Circuit Fault*

Rizal Ermiazis Kesuma<sup>[1]</sup>, I Made Ginarsa<sup>[1]</sup>, Sultan Sultan<sup>[1]</sup>

<sup>[1]</sup>Electrical Engineering, Mataram University Jl. Majapahit 62, Mataram, Lombok NTB, INDONESIA  
Email: rizal18ek@gmail.com, kadekqin@unram.ac.id, sultandarma@unram.ac.id

---

### ABSTRAK

*Switching surge merupakan transien tegangan lebih yang serius pada transmisi tegangan tinggi. Kasus transmisi AC didapatkan dua atau tiga kali tegangan puncak normal sedangkan DC adalah 1,7 kalinya. Voltage Source Converter (VSC) yang mampu melakukan komutasi tanpa bergantung kondisi jala-jala, pengaturan daya aktif dan reaktif independen, serta black-start, menjadi alasan penelitian menggunakan teknologi ini. Penelitian ini melakukan analisis unjuk kerja High Voltage Direct Current (HVDC) berbasis VSC saat starting dan gangguan hubung singkat menggunakan model Matlab Simulink. Hasilnya saat starting ketika  $t=0$  detik nilai arus DC awal 0 pu, dan naik selama 1 detik untuk menuju steady state yang bernilai 0,6 pu dengan nilai overshoot 0,731 pu. Pada gangguan satu fasa ke tanah dibutuhkan waktu 0,184 detik setelah terjadi gangguan untuk kembali ke keadaan steady state dan nilai overshoot 1,119 pu. Sedangkan gangguan tiga fasa ke tanah membutuhkan waktu 0,196 detik setelah gangguan untuk kembali ke keadaan steady state dengan nilai overshoot 1,262 pu.*

**Key words:** Gangguan 1 fasa, gangguan 3 fasa, respon starting, VSC-HVDC.

---

### ABSTRACT

*Switching surge is a serious transient overvoltage on a high-voltage transmission. In the cases on the AC transmissions, two or three times the normal peak voltage is obtained while on the DC is 1.7 times. Voltage source converter (VSC) that are capable of making commutation without relying on the grid conditions, independent active and reactive power settings, as well as black-start, became the reasons for this research in using this technology. This research had done performance analysis of VSC based on high voltage direct current (HVDC) at starting and short-circuit fault by using Matlab Simulink model. Simulation Results for the starting at time=0, the direct current value is 0.0 pu and increase to reach steady state at the value of 0.6 pu with overshoot at the value of 0.731 pu. On the single-phase to ground fault, the overshoot is achieved at the value of 1.119 pu and the steady state condition is achieved after time of 0.184 s. Finally, three-phase to ground fault, the overshoot is at the value of 1.262 pu and the steady state condition is achieved after time of 0.196 s.*

**Keywords:** single-phase fault, starting response, three-phase fault, VSC-HVDC.

---

### Pendahuluan

Energi listrik merupakan faktor penting untuk menunjang kehidupan dan kegiatan masyarakat. Sejalan dengan kebutuhan energi listrik yang semakin meningkat, maka diperlukan suatu sistem tenaga listrik yang dapat bekerja secara optimal. Menghadapi tantangan tersebut dibutuhkan berbagai

upaya meliputi pengembangan teknologi untuk mencapai tujuan sesuai dengan fungsi secara efektif dan efisien. Sehingga perkembangan teknologi kelistrikan semakin meningkat pesat untuk menunjang sistem kelistrikan yang modern. Saat ini teknologi *high voltage alternating current* (HVAC) digunakan dalam industri dan

rumah tangga, namun untuk jaringan transmisi panjang teknologi ini mempunyai beberapa keterbatasan. Sehingga teknologi *high voltage direct current* (HVDC) menjadi salah satu alternatif dalam untuk mengganti peran kasus tersebut. Resistansi dari konduktor AC lebih besar dibandingkan resistansi DC yang menyebabkan rugi daya lebih besar. *Switching surge* merupakan transien tegangan lebih yang serius, untuk tegangan tinggi jaringan transmisi, pada kasus transmisi AC didapatkan nilai maksimum dua atau tiga kali tegangan puncak normal sedangkan transmisi DC adalah 1,7 kali tegangan puncak normal [1].

Indonesia sudah mulai menunjukkan ketertarikannya pada teknologi transmisi HVDC ini, salah satunya pada proyek transmisi bawah laut Jawa-Sumatera yang menggunakan teknologi HVDC. Teknologi HVDC yang digunakan pada proyek tersebut menggunakan tipe konvensional yaitu *line commutated converter* (LCC). Akan tetapi proyek tersebut sempat berhenti akibat permasalahan ekonomis, teknis pelaksanaan, dan perlunya pengkajian lanjut [2].

*Voltage source converter* (VSC) merupakan perkembangan terbaru dari teknologi HVDC. Keunggulan VSC dibanding LCC adalah kemampuannya untuk komutasi tanpa bergantung kondisi jala-jala, pengaturan daya aktif dan reaktif yang independen, serta kemampuan untuk melakukan *black-start*. Keunggulan tersebut membuat VSC-HVDC layak untuk penyaluran daya ke beban berjarak jauh yang tidak memiliki sumber jala-jala lokal [3]. Sementara itu, pengaturan daya dari sisi-kirim ke-sisi terima pada sistem HVDC sangat penting perannya dalam rangka pengiriman daya yang efektif sesuai dengan kebutuhan konsumen di sisi-terima. Juga, sistem proteksi untuk melindungi HVDC dari kerusakan ketika terjadi gangguan. Simulasi kontroler berbasis *adaptive neuro-fuzzy inference system* (ANFIS) telah digunakan untuk meregulasi sudut penyaluran sisi-inverter HVDC *average value model*[4] dan kontroler ANFIS juga digunakan pada sisi-konverter sistem transmisi HVDC model detail [5]. Unjuk kerja dinamik sistem VSC-HVDC telah dilakukan pada variasi perubahan daya aktif, daya reaktif dan kondisi gangguan dengan hasil yang cukup baik [6]. Pengaturan daya aktif dan reaktif pada VSC-HVDC menggunakan

kontroler proporsional integral (PI) dan proteksi mengatasi over-voltage [7].

Berdasarkan permasalahan tersebut perlu adanya pengkajian lebih terhadap teknologi HVDC, Analisis unjuk kerja HVDC berbasis VSC saat *starting* dan mengalami gangguan hubung singkat. Sehingga teknologi tersebut dapat menjadi suatu alternatif pada sistem kelistrikan. Tujuannya untuk mengetahui unjuk kerja sistem saat *starting* dan *steady state* ketika keadaan gangguan hubung singkat.

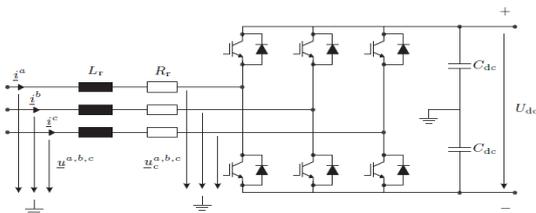
### **Transmisi HVDC dan Hubung Singkat Voltage Source Converter (VSC) HVDC**

Sistem daya kelistrikan pertama dibangun oleh Thomas Edison di New York dan mulai beroperasi pada tahun 1882 menggunakan saluran *direct current*(DC). Namun, kekurangan teknologi untuk mengubah tegangan DC ke tegangan yang lebih tinggi mencegah sistem DC untuk penyaluran daya listrik jarak jauh. Dengan perkembangan dari sistem *alternating current* (AC) *polyphase* oleh Nikola Tesla dan pengembangan trafo, sistem AC menjadi lebih menarik untuk digunakan pada transmisi jarak jauh. Ini disebut "*war of the currents*" dimenangkan oleh Tesla pada pertengahan 1890-an dan dengan demikian sistem kelistrikan dibangun AC [8].

Alasan untuk memilih transmisi HVDC dibandingkan transmisi HVAC beragam, salah satunya karena keseluruhan biaya sistem transmisi HVDC untuk transmisi tenaga dalam jarak jauh lebih rendah dan kerugiannya lebih rendah daripada transmisi HVAC. Keuntungan utama dari saluran HVDC adalah bahwa tidak ada batas stabilitas yang terkait dengan jumlah daya atau jarak transmisi. Sementara itu, biaya awal untuk pembangunan transmisi HVDC lebih mahal dari pada biaya sistem transmisi HVAC. Hal ini disebabkan oleh karena biaya konverter HVDC harganya lebih tinggi. Sebaliknya, keuntungan HVDC adalah biaya saluran transmisi HVDC per km lebih murah dibandingkan dengan saluran AC untuk ukuran daya yang sama. Dalam kasus transmisi AC, tambahan kapasitor shunt harus dipasang setiap 100 km hingga 200 km. Dengan demikian, untuk jumlah daya yang sama, transmisi saluran udara yang menguntungkan untuk saluran AC dengan

jarak kurang dari sekitar 450 km dan transmisi DC jika jarak melebihi 450 km. Keuntungan lain dari sistem HVDC adalah manfaat lingkungan. Dampak visual untuk saluran DC lebih rendah, karena menara lebih kecil dibandingkan dengan menara jalur AC dengan rating daya yang sama. Berdasarkan Gambar 2 untuk mengirimkan 6.000 MW untuk sistem AC 765 kV diperlukan tiga jalur sambungan tunggal yang menggunakan sekitar 240 m dari lahan. Sistem AC 500 kV membutuhkan bahkan tujuh saluran listrik untuk mengirimkan daya yang sama. Di sisi lain, sistem HVDC dengan  $\pm 500$  kV hanya membutuhkan sekitar 110 m. Ini bahkan tidak sampai ROW (*Right Of Way*) dari sistem AC. Sistem HVDC dengan  $\pm 800$  kV hanya membutuhkan 80 m yang tiga kali lebih kecil dari sistem AC.

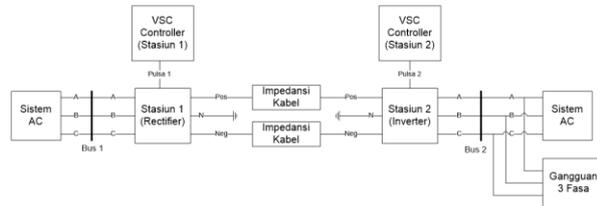
Teknologi HVDC dapat diklasifikasikan menjadi dua jenis berdasarkan dari terminal tegangan dan gelombang arus pada sisi DC, yaitu *Current Source Converter (CSC)* dan *Voltage Source Converter (VSC)*. Tipe CSC mampu menjaga arus DC tetap pada polaritas yang sama dan oleh karena itu arah pada aliran daya yang melalui converter ditentukan oleh polaritas dari tegangan DC. Converter ini dibangun dengan *semi-controllable switches* seperti thyristors. Filter AC yang besar dibutuhkan untuk menghilangkan jenis harmonik tersebut [8].



Gambar 1. Rangkaian sederhana *voltage source converter (VSC)*.

Sementara itu, VSC ini mampu menjaga polaritas tegangan DC tetap sama dan arah dari daya ditentukan oleh polaritas dari arus DC. konverter ini dibangun dengan *fully-controllable switches* seperti *insulated gate bipolar transistor (IGBT)*. Saklar-saklar ini dapat mengalirkan dan mengintrupsi arus dengan instan oleh perintah gerbang. Jaringan VSC-HVDC terdiri dari tiga bagian, jaringan AC, DC dan kontrol VSC. Jaringan terhubung dengan tiga fase ke jaringan transmisi AC melalui trafo step down di kedua sisi. Trafo step down mengubah tegangan AC

ke level tegangan yang diinginkan untuk VSC. Rectifier VSC mengubah tegangan AC ke DC dan inverter VSC kembali ke AC [8]. Ilustrasi secara umum diagram blok VSC-HVDC dapat dilihat pada Gambar. 2.



Gambar 2. Diagram blok system transmisi VSC-HVDC.

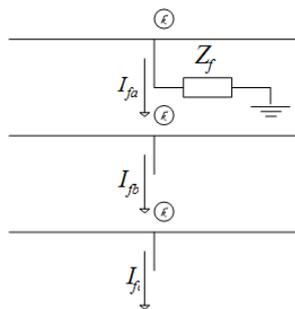
Teknologi HVDC berbasis VSC menggunakan switch yang dapat dikontrol penuh, seperti IGBT atau *Integrated Gate-Commutated Thyristor (IGCT)*. Sebaliknya, teknologi CSC-HVDC menggunakan *switch* semi terkendali seperti thyristor. Berdasarkan Gambar 2. konverter terdiri dari tiga *half-bridges*, satu untuk setiap fase. Tegangan AC dialihkan oleh IGBT baik ke kutub positif (+) atau kutub negatif (-) DC.

**Gangguan Hubung Singkat**

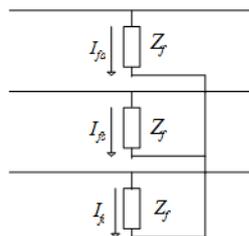
Gangguan pada sistem tenaga listrik adalah kegagalan yang mengganggu aliran arus normal. Gangguan permanen disebabkan oleh saluran-saluran yang ada di tanah, oleh putusnya string isolator karena beban es, oleh kerusakan permanen pada menara, dan oleh kegagalan surge - arrester. Pengalaman menunjukkan bahwa antara 70 dan 80% dari gangguan jalur transmisi adalah gangguan satu fasa ke tanah, yang timbul dari flashover hanya satu garis ke menara dan tanah. Sekitar 5% dari semua gangguan melibatkan ketiga fase. Ini adalah apa yang disebut gangguan simetris tiga fase. Jenis lain dari gangguan jalur transmisi adalah gangguan line-to-line, yang tidak melibatkan ground, dan double line-to-ground faults. Semua gangguan di atas kecuali jenis tiga fase menyebabkan ketidakseimbangan antar fase, dan karena itu disebut gangguan tidak simetris [9].

Sebagian besar gangguan yang terjadi pada sistem tenaga adalah gangguan yang tidak simetris, yang mungkin terdiri dari hubung singkat yang tidak simetris, kesalahan yang tidak simetris melalui impedansi, atau konduktor terbuka. Kesalahan yang tidak simetris terjadi sebagai gangguan satu saluran ke tanah, gangguan antar saluran, atau gangguan dua saluran ke tanah. Gangguan satu saluran ke tanah, jenis yang

paling umum, disebabkan oleh petir atau oleh konduktor yang membuat kontak dengan struktur yang diarde. Untuk gangguan satu saluran ke tanah (fasa a) melalui impedansi  $Z_f$  dapat digambarkan pada satu saluran terhubung ke tanah, seperti ditunjukkan pada Gambar.3, di mana fasa a adalah lokasi yang terjadi gangguan. Besarnya arus gangguan sebesar  $I_{fa}$ . Untuk penggambaran rangkaian ekuivalen untuk saluran hubung singkat 3 fasa dapat dilihat pada Gambar. 4.



Gambar 3 Rangkaian impedansi ekuivalen untuk gangguan 1 fasa ke tanah.



Gambar 4 Rangkaian impedansi ekuivalen untuk gangguan 3-fasa.

**Perancangan Model**

Perancangan model pada penelitian ini menggunakan model Matlab / Simulink 2013, menggunakan data [10] dari *Hydro-Quebec*. Adapun komponen dari transmisi VSC-HVDC ini adalah:

**Terminal AC**

Blok terminal AC terdiri dari sumber tegangan 3-fasa yang dapat diprogram (*three-phase programmable voltage source*). Blok ini digunakan untuk menghasilkan tegangan 3-fasa sinusoidal dengan parameter waktu yang bervariasi. Blok ini bisa digunakan mengatur variasi waktu pada amplitudo, fasa, atau komponen frekuensi dasar dari sumber. Parameter sumber AC yang digunakan pada penelitian ini diurutkan pada Tabel 1.

Tabel 1. Parameter sumber AC 3-fasa

Tegangan Vrms (ph-ph)	230 kV
Sudut Fasa	0°
Frekuensi	50 Hz
Base Power	200 MVA
Induktansi seri3-fasa	63,23 mH
Resistansi Paralel3-fasa	13,79 Ohms
Induktansi Paralel3-fasa	31,02 mH

**Konverter**

Transformator hubunga star-delta digunakan untuk menurunkan tegangan yang semula adalah 230 kV menjadi 100 kV. Adapun parameter trafo yang digunakan ditunjukkan pada Tabel 2.

Tabel 2. Parameter Transformator

Jenis Transformator	Step Down (Yg - Delta)
Daya Nominal	200 MVA
Frekuensi	50 Hz
Tegangan $V_{rms}$ (ph-ph) sisi primer	230 kV
Resistansi pada sisi primer	0,0025 pu
Induktansi pada sisi primer	0,075 pu
Tegangan $V_{rms}$ (ph-ph) sisi sekunder	100 kV
Resistansi pada sisi sekunder	0,0025 pu
Induktansi pada sisi sekunder	0,075 pu
Resistansi Magnetik	500 pu
Induktansi Magnetik	500

Tabel 3. Parameter Reactor

Resistansi	$0,15 \times (100^2 / 200)$
Induktansi	$0,15 \times (100^2 / 200) / (2 \times \pi \times 50)$

Selanjutnya, reaktor fasa digunakan untuk mengurangi arus naik saat gangguan untuk melindungi IGBT dan menyeimbangkan arus antar fasa. Standar untuk impedansi reaktor fasa adalah sekitar 0,15 pu. Adapun parameter transformator yang digunakan dapat dilihat pada Tabel 3.

Tahap berikutnya adalah menentukan parameter konverter yang digunakan yaitu IGBT. Berikut adalah parameter IGBT yang digunakan dapat dilihat pada Tabel 4.

Tabel 4 Parameter IGBT

Lengan jembatan	3
Resistansi Snubber	5000 Ohm
Kapasitansi Snubber	$10^{-6}$ F
Internal resistansi	$10^{-3}$ Ohm
Tegangan Bias Maju	0

### Filter Harmonik

Pada kasus ini hanya harmonik frekuensi tinggi yang muncul, sehingga pemfilteran *shunt* relatif kecil dibandingkan dengan rating konverter. Sehingga sudah cukup menggunakan *high pass filter* dan tidak perlu menggunakan *tuned filter*. Harmonik AC dihasilkan adalah berdasarkan pada tipe modulasi, frekuensi index  $p$  = frekuensi *carrier*/frekuensi modulasi (dalam kasus ini  $p$  =  $1350/50 = 27$ ), serta index modulasi. Berdasarkan hal tersebut tegangan harmonik dihasilkan disekitar kelipatan  $p$ . Sehingga filter AC shunt yang digunakan adalah filter harmoni ke-27 dan ke-54 high pass dengan kapasitor 40 Mvar. Selanjutnya untuk mengetahui parameter lainnya pada AC Filter dapat dilihat pada Table 5.

Tabel 5 Parameter Filter Harmonik AC

Jenis filter	High-Pass
Hubungan filter	Y (grounded)
Tegangan nominal L-L	100 kV
Frekuensi	50 Hz
Daya reaktif nominal	$40 \times 10^{-6} \times 0,45 \text{ var}$ / $40 \times 10^{-6} \times 0,55 \text{ var}$
Frekuensi Tuning ke-27/54	$27 \times 50 \text{ Hz} / (2 \times 27) \times 50 \text{ Hz}$
Faktor Kualitas	15 Q

### Kapasitor DC, Filter DC, dan Smoothing Reactor

Kapasitor penyimpanan DC terhubung ke terminal VSC. Kapasitor ini mempengaruhi dinamika sistem HVDC dan riak (*ripple*) tegangan pada sisi DC. Ukuran kapasitor ditentukan oleh konstanta waktu  $\tau$  sesuai dengan waktu yang diperlukan untuk mengisi kapasitor ke tegangan dasar (100 kV) jika

diisi dengan arus dasar (1 kA). Sehingga menghasilkan tetapan waktu ( $\tau$ ):

$$\tau = C \times Z_{base} = 70 \times 10^{-6} \times 100 = 7 \text{ ms}$$

dengan  $Z_{base} = 100 \text{ kV} / 1 \text{ kA}$

Tabel 6. Parameter Kapasitor, Induktor dan Resistor DC

$C_p 1$	$70 \times 10^{-6}$ F
$C_n 1$	$70 \times 10^{-6}$ F
$C_{p\_DCF1}$	$12 \times 10^{-6}$ F
$C_{n\_DCF1}$	$12 \times 10^{-6}$ F
Resistansi $L\_DCF1$	0,14737
Induktansi $L\_DCF1$	$46,908 \times 10^{-3}$
Resistansi $L_{p1}$	0,0251
Induktansi $L_{p1}$	$8,0 \times 10^{-3}$
Resistansi $L_{n1}$	0,0251
Induktansi $L_{n1}$	$8,0 \times 10^{-3}$
Gain Arus	$1 / (200 \times 10^6 / 100 \times 10^3 / \sqrt{3} \times \sqrt{2})$
Gain Tegangan	$1 / (100 \times 10^9 / \sqrt{3} \times \sqrt{2})$

Filter sisi DC yang memblokir frekuensi tinggi disetel pada harmonik ke-3. Harmonik utama muncul dalam tegangan kutub positif dan negatif. Hal ini menunjukkan bahwa arus konverter reaktif menghasilkan harmonik ketiga yang relatif besar baik pada tegangan kutub positif dan negatif, tetapi tidak dalam tegangan DC total. Selanjutnya *smoothing reactor* terhubung secara seri di setiap terminal kutub.

### Konduktor Transmisi

Konduktor transmisi yang dimodelkan dapat digunakan sebagai *Overhead line* (OHL) ataupun kabel *underground* atau *submarine*. Bahan konduktor yang digunakan dapat berupa tembaga atau aluminium. Jenis kabel yang digunakan pada VSC based HVDC adalah *extruded cables* yang telah dikembangkan yaitu *cross-linked polyethylene* (XLPE). Parameter konduktor transmisi dapat dilihat pada Tabel 7.

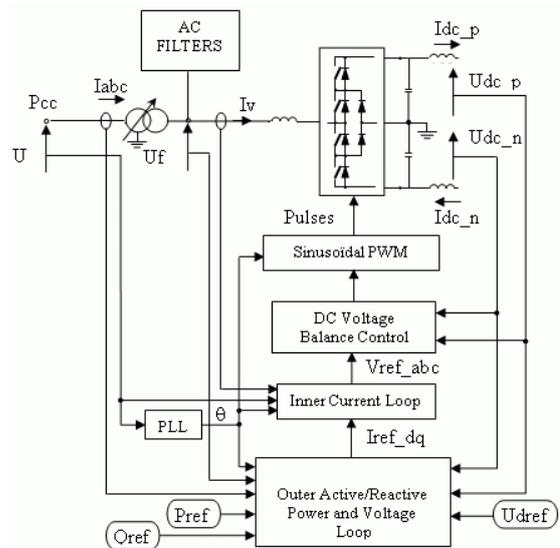
Tabel 7. Parameter Konduktor Transmisi

Frekuensi	50 Hz
Resistansi	$1,39 \times 10^{-2}$ Ohm/km
Induktansi	$1,59 \times 10^{-4}$ Ohm/km
Kapasitansi	$2,31 \times 10^{-7}$ Ohm/km
Jarak	75 km

**Kontrol Voltage Source Converter (VSC)**

Sistem kontrol VSC menggunakan kontroler yang bekerja dengan waktu discrete. Kontroler ini menghasilkan tiga sinyal modulasi sinusoidal yang merupakan nilai referensi dari jembatan tegangan fasa. Amplitudo dan fasa dari sinyal modulasi digunakan untuk mengontrol : Aliran daya aktif dan reaktif pada PCC, atau aliran daya reaktif pada PCC dan kutub ke kutub tegangan DC. Sistem daya dan sistem kontrol keduanya di-discrete-kan dengan waktu sampel masing-masing  $T_{s\_Power} = 7,406 \times 10^{-6}$ s dan  $T_{s\_control} = 74,06 \times 10^{-6}$  s. Nilai tersebut merupakan kelipatan dari periode carrier.

Filter AC berfungsi untuk meredam frekuensi yang tidak diinginkan dan melewatkan frekuensi yang digunakan untuk input kontroler. Setiap konverter memiliki dua derajat kebebasan, untuk mengontrol  $P$  dan  $Q$  di stasiun 1 (rectifier), serta  $U_{dc}$  dan  $Q$  pada stasiun 2 (inverter). Blok *phase locked loop* (PLL) digunakan untuk membangkitkan frekuensi pada sistem dan menyediakan sinkronisasi sudut fasa  $\Theta$  (lebih tepatnya  $[\sin(\Theta), \cos(\Theta)]$ ) pada blok transformasi  $dq$ . *Outer active/reactive power and voltage loop* berisi regulator loop luar yang menghitung nilai referensi dari vektor arus konverter ( $I_{ref\_dq}$ ) yang merupakan input ke *inner current loop*. Kontroler *DC Voltage Balance* dapat diaktifkan atau dinonaktifkan. Diagram blok dari kontroler VSC-HVDC dapat dilihat pada Gambar. 5.



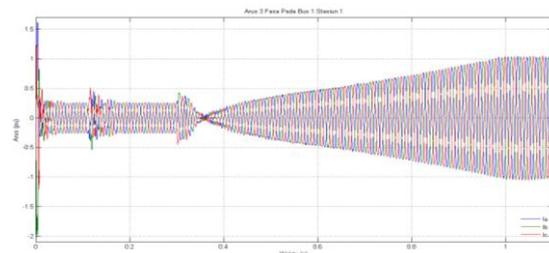
Gambar 5 Diagram blok model kontroler untuk VSC[11].

**Hasil Simulasi dan Pembahasan**

Simulasi VSC-HVDC pada saat starting dan pengaruh variabel step referensi blok, tegangan referensi ( $U_{dref}$ ), daya aktif ( $P$ ), dan daya reaktif ( $Q$ ) terhadap waktu nilai starting mencapai keadaan *steady state* diobservasi. Berdasarkan keempat step referensi tersebut maka dapat diketahui berbagai pengaruh kontrol pada kondisi starting.

**Simulasi Saat Starting**

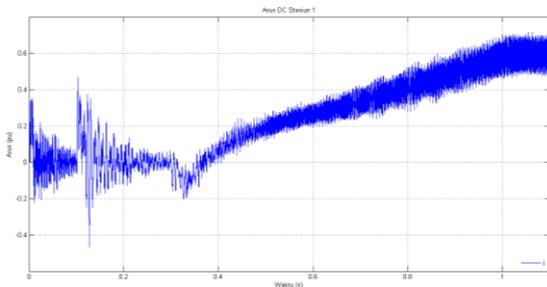
Berdasarkan Gambar. 6 diperoleh bahwa sistem mencapai keadaan *steady state* setelah 1 detik, terjadi transien sebelum kondisi *steady state*. Arus sesaat mengecil setelah 0,3 detik, hal ini karena referensi blok dilepaskan pada stasiun 1. Arus secara perlahan meningkat dan mampu mengikuti arus referensi yang diimplementasikan dengan fungsi ramp selama 0,7 detik.



Gambar 6. Arus 3 fasa pada Bus 1 Stasiun 1 saat starting.

Tabel 8 Nilai Peak *Overshoot*, *Settling Time*, dan Arus 3 Fasa

Besaran	Overshoot		Settling time(s)	Nilai RMS (pu)
	Arus (pu)	Waktu (s)		
Arus fasa A	1,615	0,004	0,945	0,434
Arus fasa B	2,014	0,002	0,952	0,441
Arus fasa C	1,229	0,002	0,958	0,432



Gambar 7. Arus DC stasiun 1 saat starting.

Berdasarkan Table VIII. didapatkan nilai overshoot tertinggi terjadi pada arus fasa b dibandingkan fasa lainnya saat 0,002 detik sebesar 2,014 pu. Waktu yang dibutuhkan untuk mencapai keadaan steady state dengan rentang 5% adalah 0,945 detik untuk fasa A, 0,952 detik untuk fasa B, dan 0,958 detik untuk fasa C. Nilai rms saat keadaan starting antara fasanya tidak sama dengan nilai fasa B yang terbesar.

Berdasarkan Gambar. 7 nilai yang didapatkan mencapai *steady state* setelah 1 detik, terjadi transien sebelum kondisi steady state. Sesaat setelah referensi blok pada stasiun 1 dilepaskan saat 0,3 detik arus akan mengalami penurunan. Kemudian arus naik selama 0,7 detik mengikuti arus referensi.

Tabel 9. Peak *Overshoot* dan *Settling Time* Arus DC

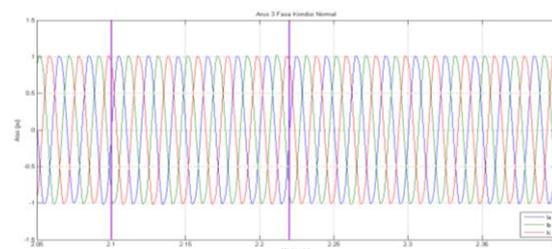
Besaran	Overshoot		Settling time (s)
	Arus (pu)	Waktu (s)	
Arus DC	0,731	1,197	0,978

Berdasarkan Tabel 9 didapatkan *peak overshoot* tertinggi saat 1,197 detik dan bernilai 0,731 pu. Besarnya arus ini disebabkan oleh kondisi arus 3 fasa yang

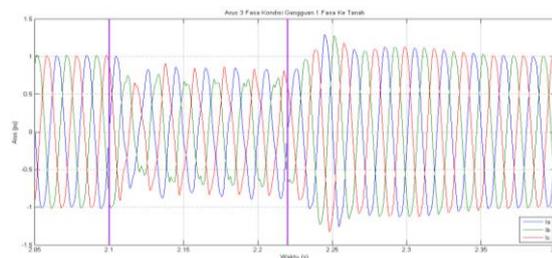
masuk sebelum dikonversi ke arus DC. Waktu yang dibutuhkan mencapai keadaan *steady state* dengan rentang 5% yaitu 0,978 detik.

### Simulasi Saat Terjadi Gangguan Hubung Singkat

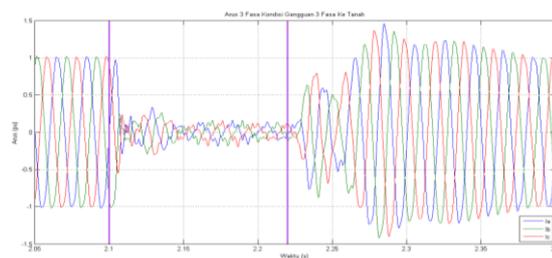
Penelitian ini juga telah dilakukan untuk mengetahui pengaruh ketika terjadi gangguan di saluran 3 fasa di stasiun 2 yaitu gangguan satu fasa ke tanah dan tiga fasa ke tanah dari saat detik ke 2,1 – 2,22. Pengaruh gangguan hanya diamati pada stasiun 1.



(a)



(b)



(c)

Gambar 8. Arus 3 fasa bus 1 stasiun 1 saat (a) keadaan normal, (b) gangguan satu fasa ke tanah, dan (c) gangguan tiga fasa ke tanah.

Tabel 10. Nilai Peak *Overshoot*, *Settling Time* dan Arus RMS 3 Fasa Kondisi Gangguan

Kondisi Gangguan 1 Fasa ke Tanah				
Besaran	Overshoot		Settling time (s)	Nilai RMS (pu)
	Arus (pu)	Waktu (s)		
Arus fasa A	1,295	2,245	2,335	0,633
Arus fasa B	1,277	2,252	2,342	0,633
Arus fasa C	1,326	2,248	2,338	0,632
Kondisi Gangguan 3 Fasa ke Tanah				
Besaran	Overshoot		Settling time (s)	Nilai RMS (pu)
	Arus (pu)	Waktu (s)		
Arus fasa A	1,456	2,285	2,375	0,623
Arus fasa B	1,417	2,282	2,372	0,625
Arus fasa C	1,400	2,288	2,369	0,622

Berdasarkan Gambar. 8 dan Tabel 10 didapatkan perbedaan nilai saat waktu terjadi gangguan walaupun perbedaannya kecil. Nilai overshoot yang didapatkan pada setiap fasanya berbeda. Saat keadaan normal arus berada pada kondisi steady state. Ketika diberikan gangguan maka muncul osilasi yang menyebabkan nilai *peak overshoot*. Nilai overshoot pada arus fasa C memiliki nilai tertinggi dibandingkan fasa lainnya ketika gangguan satu fasa ke tanah yaitu 1,326 pu saat 2,248 detik dan terjadi setelah waktu gangguan yaitu 0,028 detik setelah gangguan. *Peak overshoot* yang dialami ketika gangguan tiga fasa ke tanah bernilai tertinggi pada fasa A yaitu 1,356 pu saat 2,285 detik yaitu 0,065 detik setelah gangguan.

Gangguan satu fasa ke tanah mempunyai waktu kembali stabil setelah terjadi gangguan lebih cepat yaitu rata-rata tiap fasanya 2,338 detik atau 0,118 detik setelah gangguan, dibandingkan saat gangguan tiga fasa ke tanah yang rata-rata tiap fasanya 2,372 detik atau 0,152 detik setelah gangguan. Arus rms yang didapatkan saat normal lebih besar

dibandingkan ketika gangguan yaitu 0,638 pu rata-rata tiap fasanya. Ketika gangguan satu fasa ke tanah yaitu 0,633 pu rata-rata tiap fasanya lebih besar dibandingkan keadaan gangguan tiga fasa ke tanah yaitu 0,624 pu rata-rata tiap fasanya.

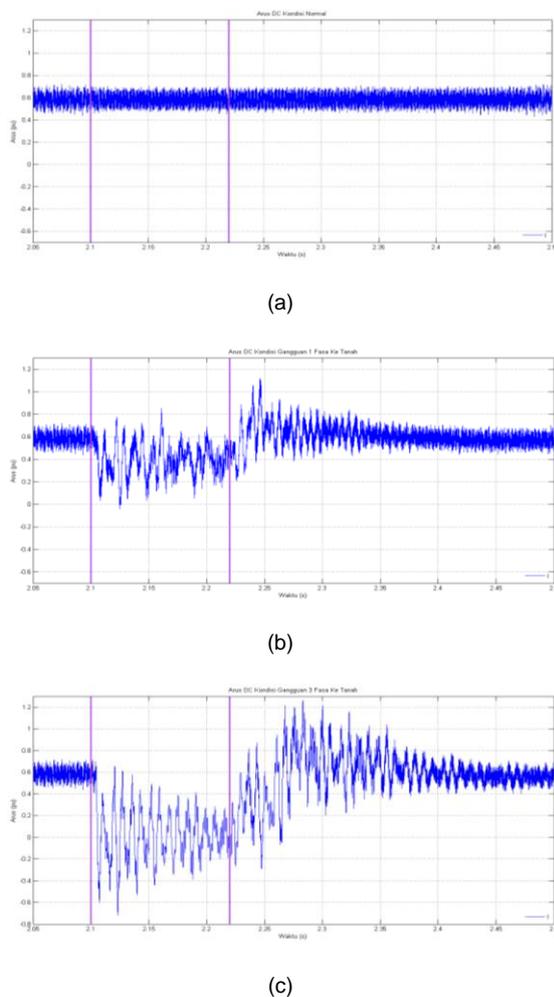
Berdasarkan Gambar 9 dan data Tabel 11 dihasilkan perbedaan nilai saat waktu terjadi gangguan. Nilai *peak overshoot* yang didapatkan berbeda tergantung jenis gangguannya. Saat keadaan normal arus berada pada kondisi steady state. Ketika diberikan gangguan maka muncul osilasi yang menyebabkan nilai overshoot. Nilai overshoot pada arus DC ketika gangguan satu fasa ke tanah yaitu 1,119 pu saat 2,246 detik dan terjadi setelah waktu gangguan yaitu 0,026 detik setelah gangguan. Overshoot yang dialami ketika gangguan 3 fasa ke tanah bernilai 1,262 pu saat 2,283 detik yaitu 0,063 detik setelah gangguan. Gangguan satu fasa ke tanah mempunyai waktu kembali stabil setelah terjadi gangguan lebih cepat yaitu 2,341 detik atau 0,121 detik setelah gangguan, dibandingkan saat gangguan tiga fasa ke tanah yaitu 2,416 detik atau 0,196 detik setelah gangguan.

### Kesimpulan

Berdasarkan penelitian dan analisis yang telah dilakukan penulis, maka didapatkan kesimpulan sebagai berikut : Arus DC yang dihasilkan saat starting mengalami transien. Kontrol blok sangat dibutuhkan dalam mengurangi besar arus DC yang mengalami transien di saat starting, tanpa kontrol blok nilai starting akan melonjak tinggi. Nilai overshoot didapatkan ketika 1,197 detik sebesar 0,731 pu. Nilai steady state akan dicapai ketika  $t = 0,978$  detik. Sistem transmisi VSC-HVDC mempunyai waktu

Tabel 11. Peak *Overshoot* dan *Settling Time* Arus DC Kondisi Gangguan

Kondisi Gangguan 1 Fasa ke Tanah			
Besaran	Overshoot		Settling time (s)
	Arus (pu)	Waktu (s)	
Arus DC	1,119	2,246	2,341
Kondisi Gangguan 3 Fasa ke Tanah			
Besaran	Overshoot		Settling time (s)
	Arus (pu)	Waktu (s)	
Arus DC	1,262	2,283	2,416



Gambar 9 Arus DC Stasiun 1 saat (a) keadaan normal, (b) gangguan satu fasa ke tanah, dan (c) gangguan tiga fasa ke tanah.

untuk kembali stabil setelah terjadi gangguan yang cepat dengan jenis gangguan yang berbeda. Walaupun demikian, jenis gangguan yang berbeda dapat mempengaruhi sistem secara berbeda juga, berikut perbedaan tiap jenis gangguannya : Saat kondisi gangguan satu fasa ke tanah, nilai overshoot arus DC yang didapatkan menjadi besar ketika terjadi gangguan yaitu 1,119 pu. Waktu yang dibutuhkan untuk kembali steady state adalah  $t = 2,341$  detik yaitu 0,121 detik setelah gangguan berhenti. Saat kondisi gangguan tiga fasa ke tanah, nilai overshoot arus DC yang didapatkan menjadi semakin besar ketika terjadi gangguan yaitu 1,262 pu. Waktu yang dibutuhkan untuk kembali steady state adalah

$t = 2,416$  detik yaitu 0,196 detik setelah gangguan berhenti.

## Referensi

- [1] S.Zangana, E. Ercelebi, 2016. Enhance power quality by HVDC system, comparison technique between HVDC and HVAC transmission system. *World Academy of Science, Engineering and Technology*, 10 No 2(International Journal of Science, Engineering and Technology), pp. 271-279.
- [2] M.Ardelean, M. Philip, 2015. HVDC submarines power cables in the World, Netherlands: JRC Science Hub.
- [3] F. Wang, L.Bertling, T.Le, 2011, An Overview Introduction of VSC-HVDC: State-of-art and Potential Applications in Electric Power Systems. Bologna, rue d'Artois, F-75008 PARIS(21), pp. 1-9.
- [4] I.M. Ginarsa, A.B. Muljono, I.M.A. Nrartha, I.P. Ardana, ANFIS-based controller application to regulate firing angle of inverter in average value model-high voltage direct current transmission system, Proc. of ICSGTEIS, Bali Indonesia, 2018, pp. 1-6.
- [5] I.M. Ginarsa, A.B. Muljono, I.M.A. Nrartha, O. Zebua (2015), Regulation of 12-pulse rectifier converter using ANFIS-based controller in a HVDC transmission system, in Integrated Sci-Tech: The Interdisciplinary Research Approach, Vol. 1, pp. 44-53, UPT Perpustakaan Unila, Lampung.
- [6] M. Khatir, Z.S Ahmed, H, Samir, F.M. Karim, A. Rabie, 2009, Performance analysis of a voltage source converter (VSC) based HVDC under faulted conditions, Leonardo Journal of Sciences, Issue 15, pp. 33-46.
- [7] C.Yaswanth, A. Vijayasri, 2014, VSC based HVDC system design and protection. *International Journal of Engineering Research and Development*, Vol. 10, Issue 12, pp. 46-57.
- [8] M.Imhof, 2015. Voltage Source Converter Based HVDC - Modelling and Coordinated Control to Enhance Power System Stability. Switzerland: ETH Druckzentrum.
- [9] J. J.Grainger, W. D. Stevenson, 1994. Power System Analysis. International Editions 1994 penyunt. Singapore: McGraw-Hill, Inc.
- [10] S.Casoria, 2013. VSC-Based HVDC Transmission System. Quebec: Hydro-Quebec.
- [11] A.Lindberg, 1995. *PWM and control of two and three level high power voltage source converters*. Licentiate thesis, ISSN-1100-1615, TRITA-EHE 9501 penyunt. Sweden: The Royal Institute of Technology