

Analisis Stabilitas Transien pada *Onshore Windfarm* Terhubung *VSC-HVDC* Sistem Jawa Bali

RAI PRAMESTI SUTEJA, HADI SUYONO, RINI NUR HASANAH

Departemen Teknik Elektro, Universitas Brawijaya, Indonesia
Email: raipramesti@student.ub.ac.id, raipramesti@gmail.com

Received 31 Mei 2022 | *Revised* 14 Juli 2022 | *Accepted* 3 Agustus 2022

ABSTRAK

Gangguan hubung singkat 3 fasa di Pulau Bali dapat menyebabkan ketidakstabilan pada sistem tenaga listrik. Sistem kelistrikan Pulau Bali bergantung pada pasokan dari Pulau Jawa dengan penghantar kabel bawah laut. Untuk memenuhi kebutuhan energi listrik di masa depan, diperlukan pengembangan sumber energi terbarukan. Penelitian ini membahas tentang kestabilan sistem pada onshore wind farm terhubung VSC-HVDC sistem kelistrikan Jawa-Bali dengan melibatkan pengaruh gangguan hubung singkat 3 fasa. Analisis kestabilan sistem menggunakan DIgSILENT dengan metode time domain simulation. Respon sistem kembali pada frekuensi 50 Hz pada detik ke 1,622 dan tegangan 1 p.u pada detik ke 1,902. Oleh karena itu, Onshore Windfarm terhubung sistem transmisi VSC-HVDC Java-Bali memiliki respon tegangan dan frekuensi yang cepat kembali steady-state setelah ada gangguan hubung singkat 3 fasa.

Kata kunci: *Gangguan Hubung Singkat, High Voltage DC, Stabilitas Transien, Time Domain Simulation, Voltage Source Converter*

ABSTRACT

A three phase short circuit in Bali island makes instability in power system. Bali's electricity system the supply is from Java Island with sub marine cable crossings. To meet the demand for electrical energy, it is necessary to develop renewable energy sources. This study discusses system stability on the onshore wind farm connected to the VSC-HVDC Java-Bali electrical system by involving the effect of a three phase short circuit. Analysis system stability by using DIgSILENT and time domain simulation method. The system response returns to 50 Hz frequency at 1,622 seconds and a voltage of 1 p.u at 1,902 seconds. Therefore, onshore wind farm connected to the VSC-HVDC Java-Bali has fast voltage and frequency response can return steady state after 3-phase short circuit.

Keywords: *Short Circuit, High Voltage DC, Transient Stability, Time Domain Simulation, Voltage Source Converter*

1. PENDAHULUAN

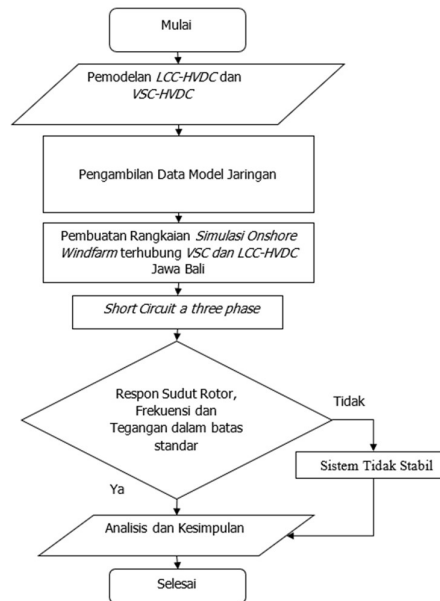
Interkoneksi kabel bawah laut pertama di Gotland (1954) dan Sweden menggunakan transmisi *High Voltage Direct Current (HVDC)* (Singh, dkk, 2019). Penggunaan *HVDC* paling berguna di area yang membutuhkan penyebrangan saluran air yang panjang seperti menyebrangi laut ke pulau dengan menggunakan kabel bawah laut, dan sistem transmisi *HVDC* dapat digunakan untuk menghubungkan sumber energi terbarukan (Kamakshaiah & Kamaraju, 2011). *HVDC* memiliki beberapa kelebihan yaitu tidak ada *skin effect*, dapat menghubungkan dua sistem arus bolak-balik dengan frekuensi yang berbeda, rugi daya karena impedansi saluran bernilai nol, dan tidak terpengaruh oleh batasan panjang saluran (Joshi & Sharma, 2021). Transmisi *HVDC* beroperasi dengan mengkonversi arus pembangkit dari *AC* ke *DC* di ujung transmisi, dan dari *DC* ke *AC* di ujung penerima dengan menggunakan converter (Misra & Nayak, 2018). Teknologi *HVDC* yang berbasis *Line Commutated Current (LCC)* sangat dipengaruhi oleh sistem *AC*, rentan terhadap kegagalan komutasi, membutuhkan jumlah kompensasi daya reaktif, dan perangkat filter (Ying, dkk, 2020). Sedangkan teknologi *HVDC* yang berbasis *Voltage Source Converter (VSC)* memiliki beberapa keunggulan seperti tidak terjadi kegagalan komutasi, daya aktif dan reaktif dapat dikendalikan secara independen, memainkan peran *STATCOM*, dapat membuat tegangan sistem *AC* stabil dalam kisaran tertentu (Gao, dkk, 2018), (Liao, dkk, 2019) dan secara umum *VSC* memiliki respon yang lebih cepat dibandingkan *LCC* saat terjadi gangguan (Jovcic, 2019).

Dengan masifnya perkembangan dari sistem *VSC-HVDC* (Kunjumammed, dkk, 2017) meneliti tentang stabilitas *VSC-HVDC* pada *wind farm* khususnya terkait perbedaan osilasi, namun tidak meneliti dampak parameter sistem terhadap stabilitas. Penelitian mengenai koordinasi sistem kontrol pada *wind turbine* untuk dukungan inersia pada *grid* (Li, dkk, 2017). Namun, penelitian tersebut tidak melibatkan stabilitas sistem dan faktor-faktor parameter yang berpengaruh. Penelitian *VSC-HVDC* pada sistem *offshore wind turbine* dengan melibatkan pengaruh parameter secara analitis (model matematis) dan pengaruh *short circuit* terhadap stabilitas *DC link* (Haghi & Rahimi, 2019). Untuk menganalisis kestabilan transien pada *AC/DC power system* menggunakan *time domain simulation*, dengan hasil simulasi bahwa metode yang digunakan dapat dengan baik untuk menganalisis stabilitas transien *hybrid AC/DC power system* (Lin, dkk, 2020). Namun, dari penelitian-penelitian sebelumnya analisis terkait dampak *short circuit* pada stabilitas *DC link* belum banyak dilakukan. Sistem kelistrikan yang terbesar di Indonesia adalah sistem kelistrikan Jawa-Bali (Faizal, dkk, 2015), sebagai kontribusi inovatif, pada penelitian ini akan membahas tentang analisis kestabilan transien pada *onshore wind farm* yang terhubung dengan *VSC-HVDC* sistem kelistrikan Jawa-Bali. Dengan melibatkan pengaruh gangguan hubung singkat menggunakan bantuan software *DIgSILENT* versi 15.1 yang di rancang untuk melakukan analisis sistem tenaga listrik (DIgSILENT GmbH, 2013).

Penelitian ini menganalisis transien pada *onshore wind farm* yang terhubung *LCC-HVDC* dan *VSC-HVDC* pada Sistem kelistrikan Jawa-Bali. Tujuan penelitian ini untuk mengetahui sistem yang mana lebih cepat stabil ketika mengalami gangguan.

2. METODE PENELITIAN

Gambar 1 menunjukkan diagram alir pelaksanaan kajian transien *onshore windfarm* terhubung *LCC-HVDC dan VSC-HVDC* Sistem Jawa Bali. Penelitian didahului dengan kajian dari berbagai sumber baik jurnal maupun prosiding, mengenai permasalahan yang diangkat, penelitian-penelitian terkait sebelumnya, penggunaan perangkat lunak untuk mengidentifikasi parameter, serta berbagai teori terkait yang akan menentukan hasil akhir dari penelitian mengenai stabilitas sistem ini.



Gambar 1. Metode Analisis Transien *Onshore Windfarm* yang terhubung *LCC/VSC-HVDC* Sistem Jawa Bali

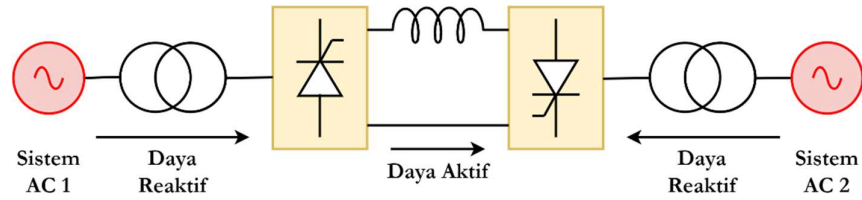
Seperti yang ditunjukkan pada Gambar 1, untuk melakukan analisis transien berupa *short circuit* 3 fasa, respon yang diamati pada penelitian ini adalah respon tegangan dan respon frekuensi.

2.1 Tipe Konverter HVDC

Sebuah sistem *HVDC* memerlukan konverter elektronik karena kemampuannya mengubah energi listrik dari *AC/DC* atau sebaliknya. Topologi konverter dalam sistem transmisi *DC* yang tersedia saat ini ada dua yaitu :

a. Tipe *Current Source Converter (CSC)* atau *Line-Commutated Converter (LCC)* (Michi dkk., 2019)

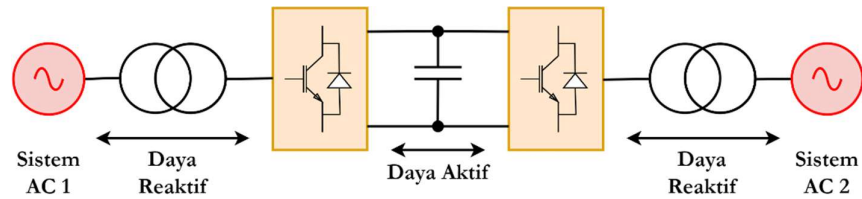
Gambar 2 menunjukkan sistem transmisi HVDC dengan konverter *CSC/LCC*. Penggunaan Konverter *CSC/LCC-HVDC* menggunakan *thyristor* berada pada sistem transmisi *AC* untuk mengubah energi listrik *AC* menjadi energi listrik *DC*. Sedangkan pada sisi penerima Konverter *CSC/LCC-HVDC* berfungsi untuk mengubah energi listrik *DC* menjadi energi listrik *AC*.



Gambar 2. Sistem CSC/LCC HVDC yang dibangun dengan thyristor

b. Tipe Voltage Source Converters (VSC)

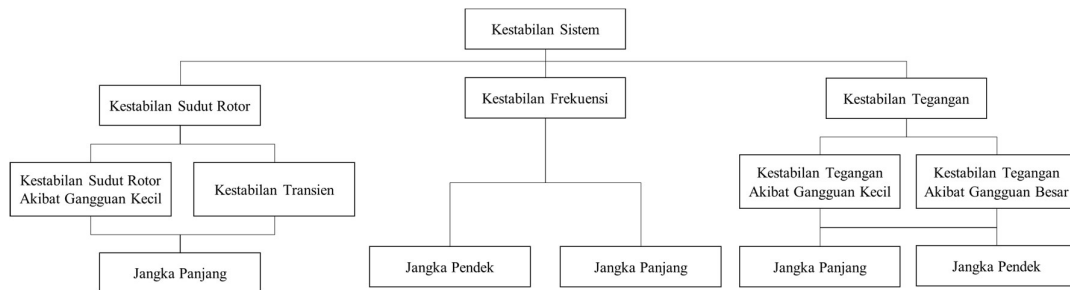
Gambar 3 menunjukkan sistem transmisi VSC-HVDC. VSC-HVDC menggunakan perangkat *Pulsewidth Modulation (PWM)* yang dibangun dengan *Insulated Gate Bipolar Transistor (IGBT)*. Dalam pengoperasian VSC-HVDC yang menggunakan PWM memiliki sifat *self-commutated* dan beroperasi pada frekuensi yang lebih tinggi dari frekuensi saluran (Flourentzou, dkk, 2009).



Gambar 3. Sistem VSC-HVDC yang dibangun dengan IGBT

2.2 Kestabilan Sistem Tenaga Listrik

Berdasarkan artikel IEEE dalam judul *Definition and Classification of Power System Stability*, kestabilan sistem tenaga dikategorikan menjadi 3 jenis antara lain: kestabilan sudut rotor, kestabilan frekuensi, dan kestabilan tegangan (Kundur, dkk, 2003).



Gambar 4. Klasifikasi Kestabilan Sistem Tenaga

Gambar 4 menunjukkan klasifikasi kestabilan pada sistem tenaga listrik. Kestabilan adalah kemampuan sistem tenaga listrik untuk tetap beroperasi dalam keseimbangan di bawah kondisi operasi normal dan untuk mendapatkan kembali keseimbangan yang dapat diterima setelah diberikan gangguan. Masalah stabilitas sistem tenaga listrik di bagi menjadi dua kategori yaitu *steady state stability* dan *transient stability* (Saadat, 2010). Pembagian kategori ini dilakukan untuk memudahkan dalam melakukan analisis. *Steady State stability* mengacu pada kemampuan sistem untuk mendapatkan kembali *sinkronisme* setelah ada gangguan kecil dan gangguan lambat, seperti perubahan tegangan yang bertahap.

Sedangkan, *Transient Stability* adalah kemampuan sistem tenaga listrik untuk dapat mempertahankan keadaan sinkronisasinya saat mengalami gangguan berupa gangguan transien. Generator *outage*, gangguan pada elemen transmisi, gangguan hubung singkat, dan perubahan beban secara tiba-tiba merupakan gangguan transien. Stabilitas sistem tenaga dikategorikan menjadi tiga antara lain : **(Machowski Jan, dkk., 2020)**.

a. Kestabilan Sudut Rotor

Kestabilan sudut rotor adalah kemampuan mesin-mesin sinkron yang terhubung dengan sistem kelistrikan dan dapat mempertahankan sinkronisasinya setelah mengalami gangguan. Keseimbangan antara torsi mekanik dan torsi elektromekanik pada mesin-mesin sinkron dapat mempengaruhi kestabilan sudut rotor.

b. Kestabilan Frekuensi

Tabel 1 menunjukkan batas rentang frekuensi operasisistem tenaga listrik. Di Indonesia, jaringan sistem tenaga listrik memiliki frekuensi nominal sebesar 50 Hz. Frekuensi pada sistem dapat naik sampai 52 Hz dan batas frekuensi turun sampai dengan 47 Hz dalam keadaan luar biasa **(Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral Republik Indonesia, 2020)**.

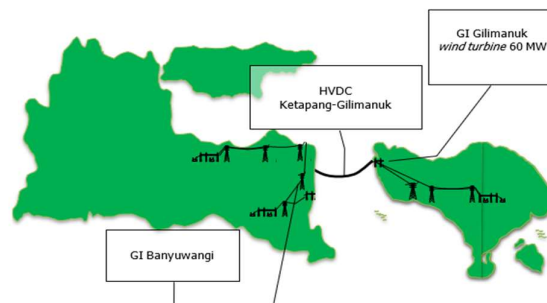
Tabel 1. Batas Rentang Frekuensi

Rentang Frekuensi	Rentang Waktu Operasi
51,5 Hz < f ≤ 52 Hz	Beroperasi paling singkat 15 menit
51 Hz < f ≤ 51,5 Hz	Beroperasi paling singkat 90 menit
49 Hz < f ≤ 51 Hz	Beroperasi secara terus-menerus
47,50 Hz < f ≤ 49 Hz	Beroperasi paling singkat 90 menit
47 Hz < f ≤ 47,5 Hz	Beroperasi paling singkat 6 detik

c. Kestabilan Tegangan

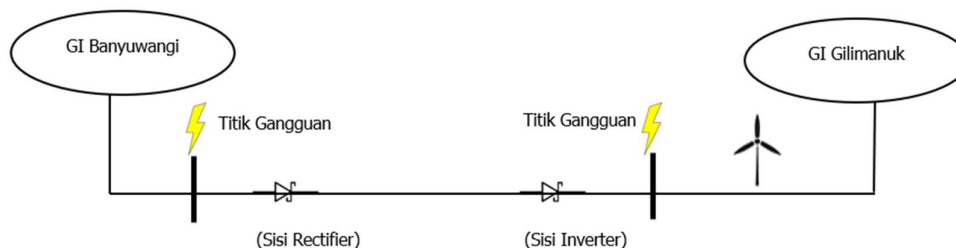
Kestabilan tegangan merupakan kemampuan sistem tenaga listrik untuk dapat mempertahankan kestabilan tegangan setelah mengalami gangguan. Untuk batas toleransi tegangan terhadap gangguan, yaitu tegangan 500 kV ±5%, sedangkan pada tegangan 150 kV +5% -10%. Pada pembangkit Energi Baru dan Terbarukan (EBT) *intermitten* seperti PLTB selama terjadi gangguan hubung singkat 3 fasa dan pemulihan, batas konsumsi daya aktif sesaat kurang dari 0.6 pu diizinkan selama 40 ms **(Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral Republik Indonesia, 2020)**.

2.3 Perancangan Sistem



Gambar 5. Skema Perancangan VSC/LCC-HVDC GI Banyuwangi dan GI Gilimanuk

Gambar 5 menunjukkan jalur kabel bawah laut yang melewati Selat Bali. Untuk *rectifier* (LCC/VSC-HVDC) dipasang di GI Banyuwangi dan inverter (LCC/VSC-HVDC) dipasang di GI Gilimanuk. *Onshore Windfarm* dengan kapasitas 60 MW di pasang di GI Gilimanuk.



Gambar 6. Titik Gangguan pada Perencanaan Sistem HVDC Jawa-Bali

Gambar 6 menunjukkan titik gangguan pada perencanaan sistem *HVDC* Jawa-Bali. Pada artikel ini, simulasi gangguan dimulai pada 1 detik. Simulasi dijalankan selama 10 detik. Sehingga simulasi gangguan berjalan pada detik ke 1 dan gangguan hilang pada detik ke 1,5.

Panjang saluran *HVDC* yang digunakan untuk menghubungkan stasiun (Gardu Induk) Banyuwangi (Jawa Timur) dan GI Gilimanuk (Bali) dengan panjang saluran 4,47 km dengan jenis saluran kabel bawah laut.

Tabel 2 menunjukkan parameter *rectifier* CSC/LCC-HVDC di pasang pada sisi kirim jaringan listrik AC. *Rectifier* digunakan sebagai pengubah arus AC menjadi arus DC.

Tabel 2. Spesifikasi Rectifier CSC/LCC-HVDC

Rectifier	
Parameter	Nilai
Rating Tegangan AC	150 kV
Rating Tegangan DC	170 kV
Rating Daya Aktif	850 MW
Rating Arus DC	5 kA
Rasio Belitan Nominal	0,5
Sudut Pengapian Nominal	15 deg

Tabel 3 menunjukkan parameter *rectifier* VSC-HVDC menggunakan *PWM* sebagai penyearah tegangan AC menjadi tegangan DC.

Tabel 3. Spesifikasi Rectifier VSC-HVDC

PWM Converter	
Parameter	Nilai
Rating Tegangan AC	150 kV
Rating Tegangan DC	170 kV
Rating Daya	100 MVA
Modulation	Sinusoidal
Mode Control	P-Q
Aktif Power Setpoint	10 MW

a. Inverter

Tabel 4 menunjukkan spesifikasi inverter *LCC-HVDC*. *Inverter* memiliki fungsi untuk mengubah arus listrik tegangan *DC* menjadi arus listrik tegangan *AC*. Pada jaringan *CSC/LCC-HVDC* memerlukan *inverter* yang di pasang pada sisi terima.

Tabel 4. Spesifikasi Inverter LCC-HVDC

<i>Inverter</i>	
Parameter	Nilai
Rating Tegangan AC	150 kV
RatingTegangan DC	170 kV
Rating Daya Aktif	850 MW
Rating Arus DC	5 kA
Rasio Belitan Nominal	1
Sudut Pengapian Nominal	15 deg

Tabel 5 menunjukkan spesifikasi *inverter VSC-HVDC*. Pada jaringan transmisi yang menggunakan *VSC-HVDC* diperlukan *PWM* sebagai penyearah tegangan *DC* menjadi tegangan *AC* untuk di distribusikan hingga sampai ke pelanggan.

Tabel 5. Spesifikasi Inverter VSC-HVDC

<i>PWM Converter</i>	
Parameter	Nilai
Rating Tegangan AC	150 kV
RatingTegangan DC	170 kV
Rating Daya	100 MVA
<i>Modulation</i>	<i>Sinusoidal</i>
<i>Mode Control</i>	Vdc-Q
Aktif <i>Power Setpoint</i>	10 MW

b. Onshore Windfarm

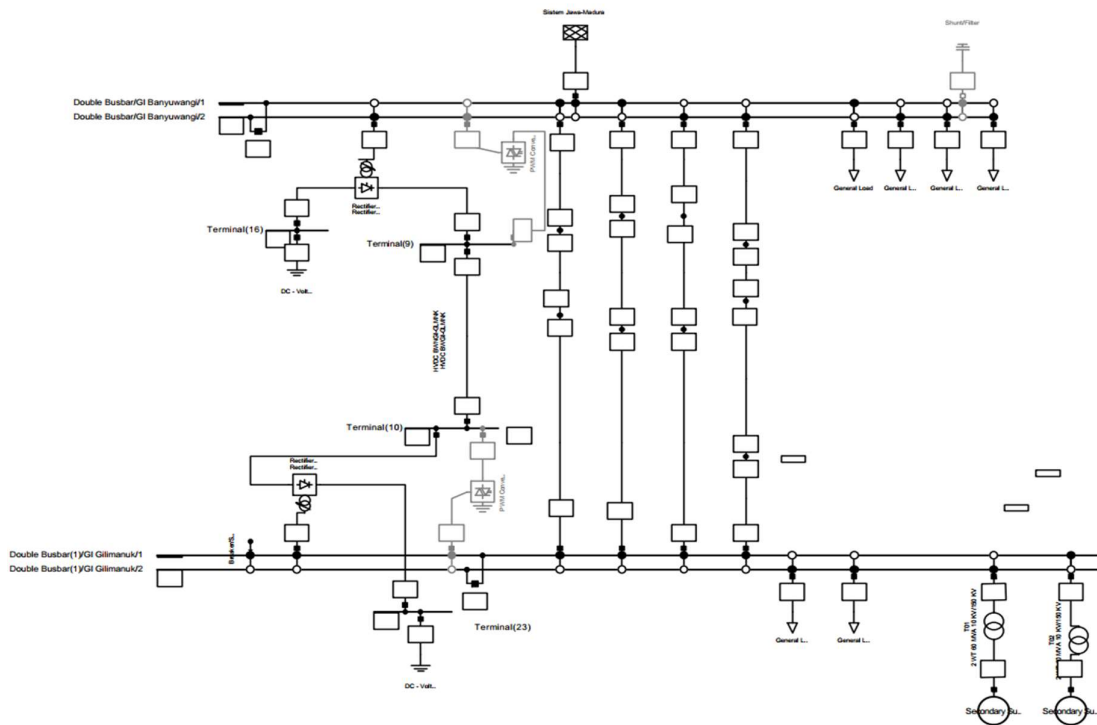
Tabel 6 menunjukkan spesifikasi *Onshore Windfarm*. Penelitian ini *Onshore Windfarm* berkapasitas 60MW terhubung dengan GI Gilimanuk, Bali.

Tabel 6. Spesifikasi Onshore Windfarm

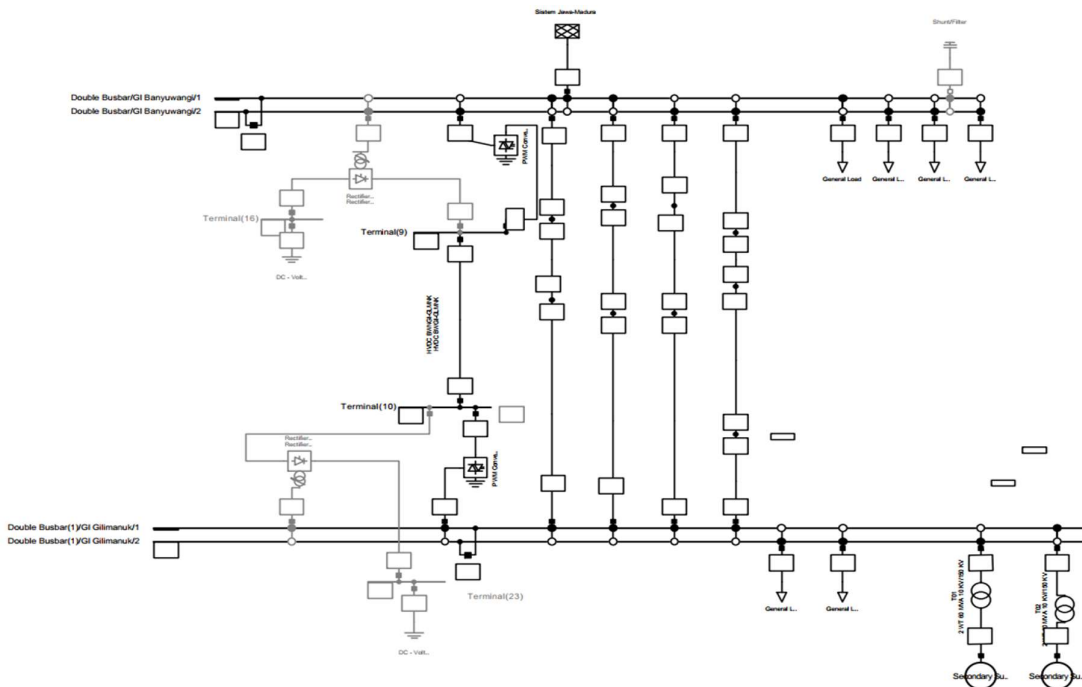
Parameter	Nilai
Turbin Angin	2.5 MW
Generator	<i>Asynchronous Wind Turbine Generator</i>
Jumlah Turbin Angin	24 unit
Kapasitas Total	60 MW

Seperti yang ditunjukkan gambar di bawah ini yang merupakan pemodelan *Onshore Windfarm* terhubung *CSC/LCC-HVDC* Jawa Bali pada *DIgSILENT*.

Gambar 7 menunjukkan simulasi pemodelan *Onshore Windfarm* terhubung *CSC/LCC-HVDC* Jawa Bali pada *DIgSILENT*. *CSC/LCC-HVDC* sebagai *rectifier* dipasang pada busbar GI Banyuwangi 2, sedangkan *CSC/LCC-HVDC* sebagai *inverter* dipasang pada busbar GI Gilimanuk 1. *Onshore Windfarm* berada pada jaringan busbar GI Gilimanuk 1.



Gambar 7. Pemodelan *Onshore Windfarm* terhubung CSC/LCC-*HVDC* Jawa Bali pada *DIgSILENT*



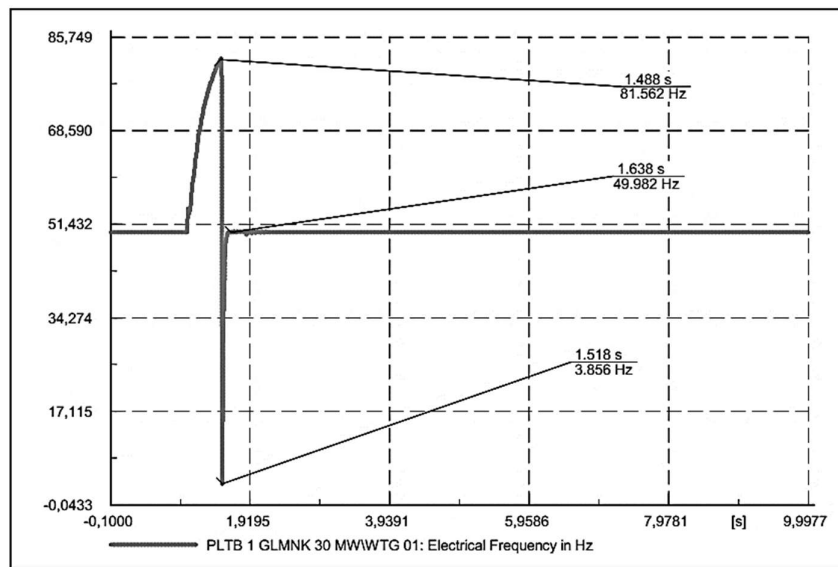
Gambar 8. Pemodelan *Onshore Windfarm* terhubung VSC-*HVDC* Jawa Bali pada *DIgSILENT*

Gambar 8 menunjukkan simulasi pemodelan *Onshore Windfarm* terhubung *VSC-HVDC* Jawa Bali pada *DIgSILENT*. *VSC-HVDC* dengan menggunakan PWM dipasang pada busbar GI Banyuwangi 2, dan PWM juga dipasang pada busbar GI Gilimanuk 1. Sedangkan, *Onshore Windfarm* berada pada jaringan busbar GI Gilimanuk 1.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Berdasarkan spesifikasi yang digunakan seperti diatas, pada penelitian ini menunjukkan analisis transien berupa gangguan hubung singkat 3 fasa dengan *time domain simulation*. Hasil simulasi yang di sediakan adalah grafik respon frekuensi dan respon tegangan.

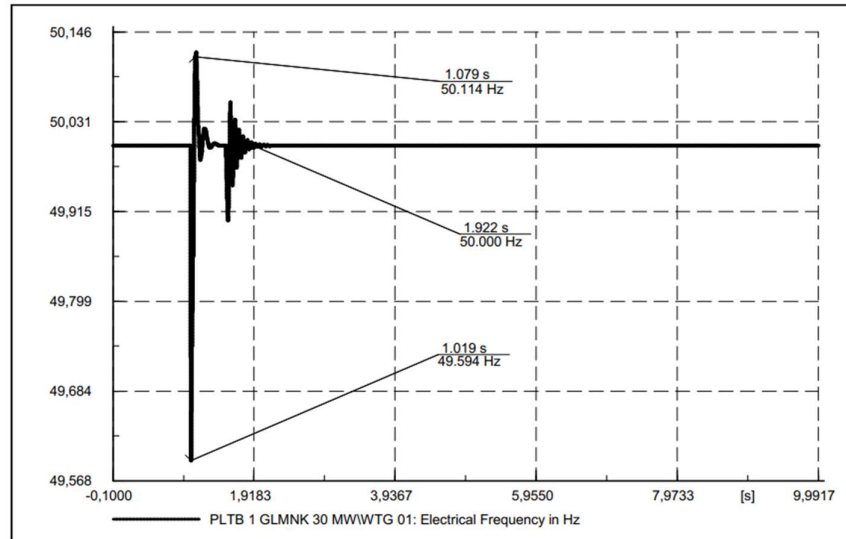
3.1 Respon Frekuensi menggunakan *CSC/LCC-HVDC*



Gambar 9. Respon Frekuensi *Onshore Windfarm* Saat Terjadi Gangguan di Busbar GI Gilimanuk

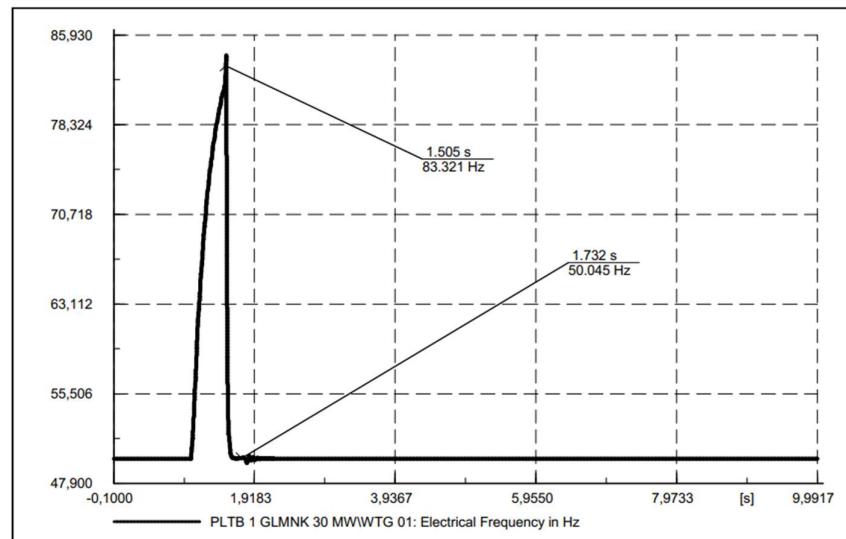
Gambar 9 menunjukkan respon frekuensi pada *DIgSILENT* di *Onshore Windfarm* GI Gilimanuk, Bali. Skenario gangguan hubung singkat di busbar GI Gilimanuk selama 1 detik, *fault clearing* detik ke 1,5 dan *stop time* pada detik ke 10. Saat terjadi gangguan, frekuensi mengalami *overshoot* menjadi 81,562 Hz pada detik ke 1,488. Kenaikan frekuensi ini melebihi dengan ketentuan *Grid Code*, dan dapat menyebabkan kerusakan pada peralatan sistem tenaga listrik. Frekuensi menurun secara tiba-tiba disebabkan karena terjadinya ketidakseimbangan antara beban dengan sumber. Dalam durasi beberapa detik sistem dapat kembali pada frekuensi 49,982 Hz dan pada detik ke 1,638.

Gambar 10 menunjukkan respon frekuensi pada *DIgSILENT* yang terjadi di *Onshore Windfarm* terhubung GI Gilimanuk, Bali. Skenario gangguan hubung singkat di busbar GI Banyuwangi selama 1 detik, *fault clearing* pada detik ke 1,5 dan *stop time* pada detik ke 10. Saat gangguan, frekuensi turun menjadi 49,594 Hz pada detik ke 1,019 dan sistem kembali pada frekuensi 50 Hz dan pada detik ke 1,922. Batas frekuensi setelah mengalami gangguan sesuai dengan *Grid Code* yang di tetapkan.



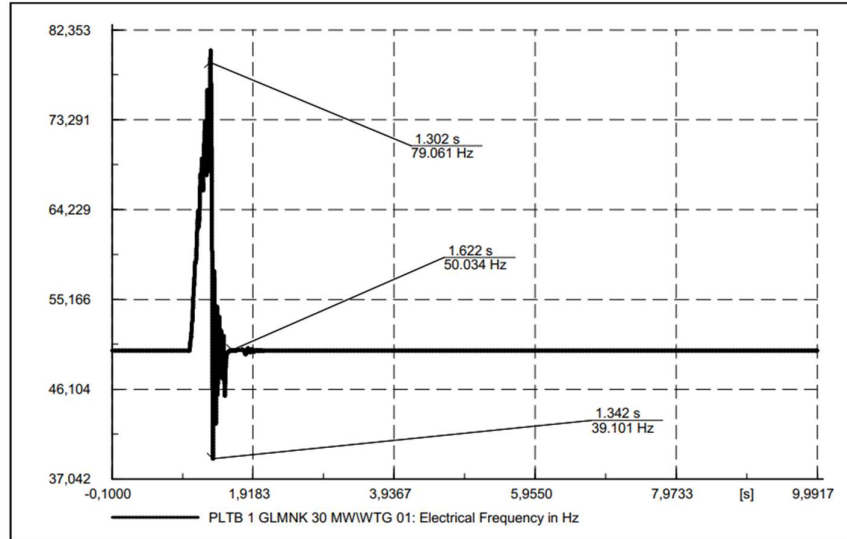
Gambar 10. Respon Frekuensi *Onshore Windfarm* di GI Gilimanuk Saat Terjadi Gangguan di Busbar GI Banyuwangi

3.2 Respon Frekuensi menggunakan *VSC-HVDC*



Gambar 11. Respon Frekuensi *Onshore Windfarm* di GI Gilimanuk Saat Terjadi Gangguan di Busbar GI Gilimanuk

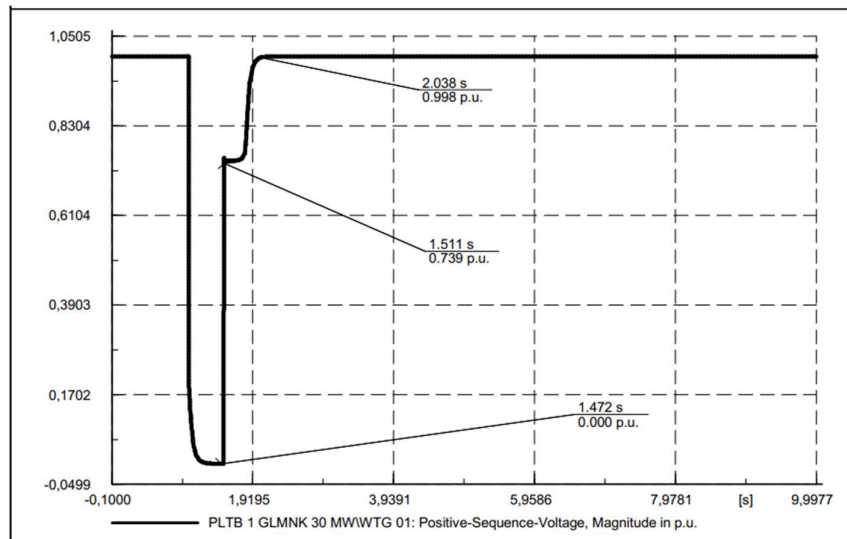
Seperti yang ditunjukkan pada Gambar 11 respon frekuensi pada DIGSILENT di *Onshore Windfarm* di GI Gilimanuk, Bali. Skenario gangguan hubung singkat di busbar GI Gilimanuk selama 1 detik, *fault clearing* pada detik ke 1,5 dan *stop time* pada detik ke 10. Saat terjadi gangguan, frekuensi naik menjadi 83,321 Hz pada detik ke 1,505. Pada saat *VSC-HVDC* dengan menggunakan *PWM saat* beroperasi frekuensi lebih tinggi daripada frekuensi saluran. Hal ini membuktikan pernyataan pada penelitian (Flourentzou, dkk, 2009). Pada detik ke 1,732 frekuensi kembali dalam keadaan tunak sebesar 50 Hz. Penggunaan *VSC-HVDC* yang menggunakan *PWM* dapat diset *mode control*. *PWM* pada penelitian ini mode set *Vdc-Q* dekat dengan GI Gilimanuk.



Gambar 12. Respon Frekuensi *Onshore Windfarm* di GI Gilimanuk Saat Terjadi Gangguan di Busbar GI Banyuwangi

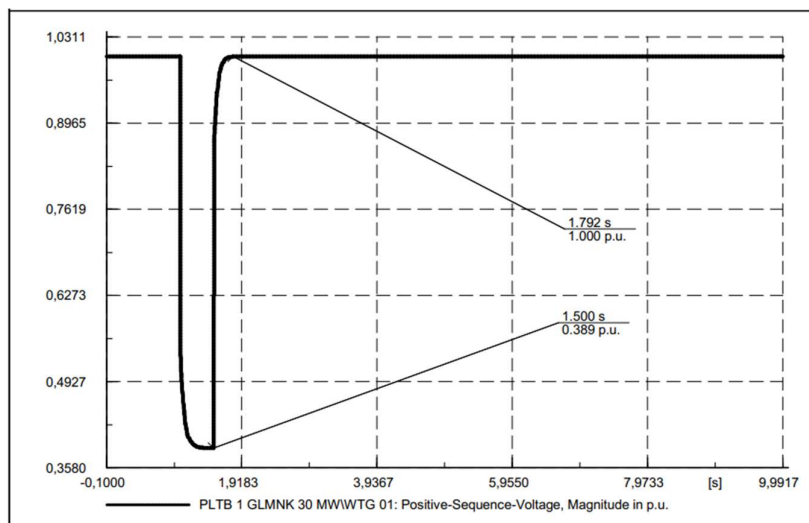
Gambar 12 merupakan respon frekuensi pada DIGSILENT di *Onshore Windfarm* di GI Gilimanuk, Bali. Skenario gangguan hubung singkat di busbar GI Banyuwangi selama 1 detik, *fault clearing* pada detik ke 1,5 dan *stop time* 10 detik. Saat terjadi gangguan, pada detik ke 1,302 frekuensi naik menjadi 79,061 Hz, hal ini disebabkan karena pasokan daya aktif dari sumber berlebih. Dimana *VSC-HVDC* dengan penggunaan *PWM* terletak dekat dengan GI Banyuwangi dan *control mode* PQ sebesar 10 MW. Kemudian frekuensi turun menjadi 39,101 Hz pada detik ke 1,342 karena terjadinya ketidakseimbangan antara beban dengan sumber. Namun, frekuensi pada *Onshore Windfarm* dapat kembali dalam keadaan tunak pada detik ke 1,622.

3.3 Respon Tegangan Saat Menggunakan *CSC/LCC-HVDC*



Gambar 13. Respon Tegangan *Onshore Windfarm* di GI Gilimanuk Saat Terjadi Gangguan di Busbar GI Gilimanuk

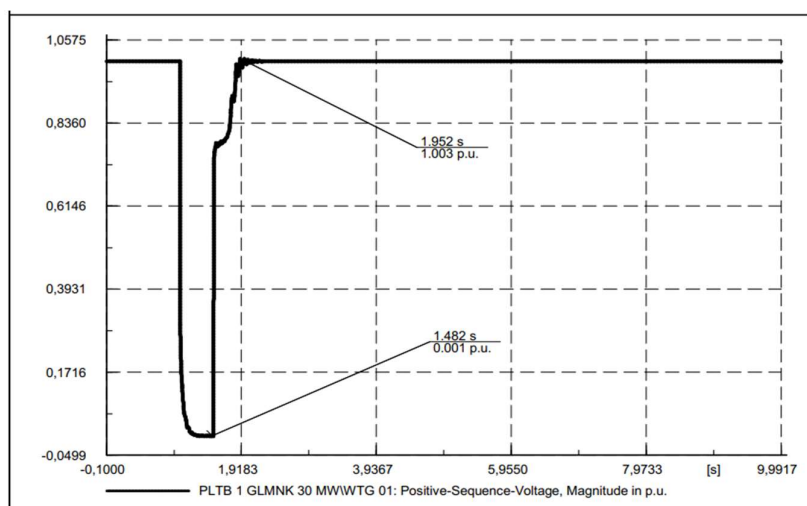
Gambar 13 menunjukkan respon tegangan di *Onshore Windfarm yang terhubung dengan GI Gilimanuk*. Gangguan hubung singkat 3 fasa, menyebabkan tegangan mengalami penurunan sesaat pada detik ke 1,472, hal ini disebabkan karena arus yang memiliki nilai besar mengalir menuju titik gangguan dan mempengaruhi tegangan. Kemudian tegangan menjadi 0,739 p.u pada detik ke 1,511. Sistem dapat kembali pada keadaan stabil saat detik ke 2,038 dan tegangan menjadi 0,998 p.u.



Gambar 14. Respon Tegangan *Onshore Windfarm* di GI Gilimanuk Saat Terjadi Gangguan di Busbar GI Banyuwangi

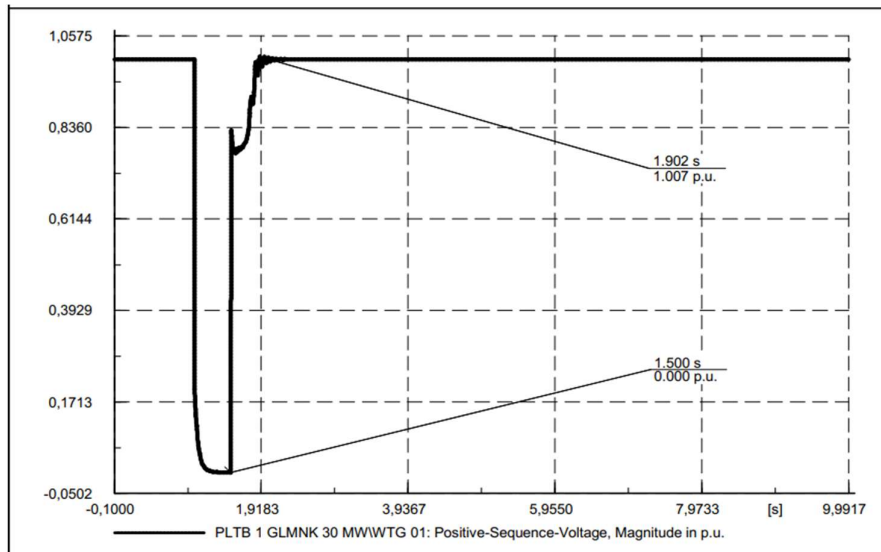
Gambar 14 merupakan respon tegangan pada DIGSILENT di *Onshore Windfarm*. Gangguan hubung singkat 3 fasa di GI Banyuwangi, menyebabkan tegangan turun menjadi 0,389 p.u pada detik ke 1,500 namun tegangan dapat kembali menuju keadaan stabil sebesar 1,000 p.u pada detik ke 1,792.

3.4 Respon Tegangan saat menggunakan *VSC-HVDC*



Gambar 15. Respon Tegangan *Onshore Windfarm* di GI Gilimanuk Saat Terjadi Gangguan di Busbar GI Gilimanuk

Gambar 15 merupakan respon tegangan pada DIgSILENT di *Onshore Windfarm*. Ketika gangguan hubung singkat 3 fasa di busbar GI Gilimanuk, tegangan mengalami penurunan yakni menjadi 0 p.u pada detik ke 1,482. Namun, sistem dapat mempertahankan kembali kondisi tegangan stabil pada detik ke 1,952 sebesar 1,003 p.u. Arus gangguan dapat menyebabkan daya reaktif meningkat sehingga tegangan menjadi turun. Namun, penggunaan *VSC-HVDC* yang menggunakan *PWM* dapat diset *mode control*. *PWM* pada penelitian ini mode set *Vdc-Q*.



Gambar 16. Respon Tegangan *Onshore Windfarm* di GI Gilimanuk Saat Terjadi Gangguan di Busbar GI Banyuwangi

Gambar 16 merupakan respon tegangan pada DIgSILENT di *Onshore Windfarm*, ketika terjadi gangguan hubung singkat 3 fasa di busbar GI Banyuwangi. Pada detik ke 1,500 tegangan turun menjadi 0,000 p.u, hal ini disebabkan karena pengaruh dari arus dimana penggunaan *VSC-HVDC* yang menggunakan *PWM* dapat diset *mode control*. *PWM* pada penelitian ini mode set *P-Q* di GI Banyuwangi. Kemudian pada detik ke 1,902 tegangan dapat kembali pada keadaan *steady-state* menjadi 1,007 p.u. Hasil ini memperkuat pernyataan bahwa penggunaan *VSC-HVDC* pemulihan sistem lebih cepat setelah gangguan pada penelitian **(Singh, dkk, 2019)**.

4. KESIMPULAN

Dalam penelitian ini, penggunaan *CSC/LCC-HVDC* dan *VSC-HVDC* disimulasikan pada software *DIgSILENT*. Berdasarkan hasil simulasi, *VSC-HVDC* saat terjadi gangguan pada busbar GI Gilimanuk respon frekuensi 50 Hz pada detik ke 1,732 dan respon tegangan 1 p.u pada detik ke 1,952. Sedangkan, *CSC/LCC-HVDC* saat terjadi gangguan pada busbar GI Gilimanuk respon frekuensi 49,982 Hz pada detik ke 1,638 dan respon tegangan 0,998 pu pada detik ke 2,038. Oleh karena itu, *Onshore Windfarm* terhubung sistem transmisi *VSC-HVDC* dapat diimplementasikan karena respon tegangan dan frekuensi lebih cepat kembali *steady-state* setelah ada gangguan hubung singkat 3 fasa.

DAFTAR RUJUKAN

- DIgSILENT GmbH. (2013). *PowerFactory 15*.
- Faizal, R., Nurdin, M., Hariyanto, N., Pack, S., & Plesch, J. (2015). Sumatra-Java HVDC Transmission System Modelling and System Impact Analysis. *2015 IEEE Eindhoven PowerTech, PowerTech 2015*. <https://doi.org/10.1109/PTC.2015.7232498>
- Flourentzou, N., Agelidis, V. G., & Demetriades, G. D. (2009). VSC-based HVDC power transmission systems: An overview. *IEEE Transactions on Power Electronics, 24*(3), 592–602. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2008.2008441>
- Gao, S., Zhu, H., Zhang, B., & Song, G. (2018). Modeling and simulation analysis of Hybrid Bipolar HVDC system based on LCC-HVDC and VSC-HVDC. *Proceedings of 2018 IEEE 3rd Advanced Information Technology, Electronic and Automation Control Conference, IAEAC 2018*, (pp. 1448–1452). <https://doi.org/10.1109/IAEAC.2018.8577863>
- Haghi, A., & Rahimi, M. (2019). Control and stability analysis of VSC-HVDC based transmission system connected to offshore wind farm. *Scientia Iranica, 0*(0), 0–0. <https://doi.org/10.24200/sci.2019.52980.2984>
- Joshi, N., & Sharma, J. (2021). An Overview on High Voltage Direct Current Transmission Projects in India. *Proceedings of the 6th International Conference on Inventive Computation Technologies, ICICT 2021*, (pp. 459–463). <https://doi.org/10.1109/ICICT50816.2021.9358704>
- Jovic, D. (2019). High voltage direct current transmission. *Journal of the Institution of Engineers (India): Electrical Engineering Division, 70*, 2–3. <https://doi.org/10.1049/pe:19890020>
- Kamakshaiyah, S., & Kamaraju, V. (2011). HVDC Transmission. *Communication Research, 22*(4). <https://doi.org/10.1177/009365095022004007>
- Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral Republik Indonesia. (2020). *Peraturan Menteri Energi dan Sumber Daya Mineral Republik Indonesia Nomor 20 Tahun 2020 Tentang Aturan Jaringan Sistem Tenaga Listrik (Grid Code) (Nomor 3)*.
- Kundur, P., Paserba, J., & Vitet, S. (2003). Overview on definition and classification of power system stability. *CIGRE/IEEE PES International Symposium Quality and Security of Electric Power Delivery Systems, CIGRE/PES 2003*, (pp. 1–4). <https://doi.org/10.1109/QSEPDS.2003.159786>
- Kunjumammed, L. P., Member, S., Pal, B. C., Gupta, R., Dyke, K. J., & Member, S. (2017). Stability Analysis of a PMSG-Based Large Offshore Wind Farm Connected to a VSC-HVDC. *IEEE Transactions on Energy Conversion, 32*(3), 1166–1176.

- Li, Y., Xu, Z., Østergaard, J., & Hill, D. J. (2017). Coordinated Control Strategies for Offshore Wind Farm Integration via VSC-HVDC for System Frequency Support. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, *32*(3), 843–856. <https://doi.org/10.1109/TEC.2017.2663664>
- Liao, J., Zhou, N., & Wang, Q. (2019). DC-side harmonic analysis and DC filter design in hybrid HVDC transmission systems. *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, *113*, 861–873. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2019.06.013>
- Lin, Z., Liu, Y., & Huaizhi Wang. (2020). *An Electromechanical Transient Simulation Platform of Hybrid Grids With MMC-HVDC Transmission for Transient Stability Evaluation*. 1242–1247.
- Machowski Jan, Lubosny Zbigniew, Bialek W.Janusz, B. R. J. (2020). *Power System Dynamics Stability and Control*.
- Michi, L., Donnini, G., Capurso, P., Bugliari, A. C., Falorni, F., Quadrio, M., Canever, D., & Giorgi, L. (2019). An overview of the HVDC transmission system models in planning tools: The Italian experience. *2019 AEIT HVDC International Conference, AEIT HVDC 2019*. <https://doi.org/10.1109/AEIT-HVDC.2019.8740460>
- Misra, B., & Nayak, B. (2018). Understanding the control of 12-pulse thyristor converters in VSC-based HVDC system with passive filters. *International Conference on Technologies for Smart City Energy Security and Power: Smart Solutions for Smart Cities, ICSESP 2018 - Proceedings, 2018-Janua*, (pp. 1–6). <https://doi.org/10.1109/ICSESP.2018.8376729>
- Saadat, H. (2010). *Power Systems Analysis 3rd Edition-PSA*. PSA Publishing.
- Singh, M., Ansari, M. A., Tripathi, P., & Wadhvani, A. (2019). VSC-HVDC Transmission System and its Dynamic Stability Analysis. *2018 International Conference on Computational and Characterization Techniques in Engineering and Sciences, CCTES 2018*, (pp. 177–182). <https://doi.org/10.1109/CCTES.2018.8674095>
- Ying, H., Chun-Hua, L., & Wei-Huang, H. (2020). A novel scheme of refurbishing the existing LCC-HVDC to VSC-HVDC. *IET Conference Publications, 2020(CP775)*, (pp. 1767–1772). <https://doi.org/10.1049/icp.2020.0361>