

repository.ub.ac.id

**ANALISIS KESTABILAN PERALIHAN PADA
SISTEM TRANSMISI *HIGH VOLTAGE DIRECT CURRENT* (HVDC)**

PUBLIKASI JURNAL SKRIPSI



Disusun Oleh:

YAKIN GABRIELSA

NIM. 125060300111048

UNIVERSITAS BRAWIJAYA

FAKULTAS TEKNIK

MALANG

2016



PENGESAHAN
PUBLIKASI HASIL PENELITIAN SKRIPSI
JURUSAN TEKNIK ELEKTRO
FAKULTAS TEKNIK UNIVERSITAS BRAWIJAYA

NAMA : **YAKIN GABRIELSA**
NIM : **125060300111048**
PROGRAM STUDI : **TEKNIK ENERGI ELEKTRIK**
JUDUL SKRIPSI : **ANALISIS KESTABILAN PERALIHAN PADA**
SISTEM TRANSMISI *HIGH VOLTAGE DIRECT*
***CURRENT* (HVDC)**

TELAH DI-REVIEW DAN DISETUJUI OLEH :

Dosen Pembimbing I



Hadi Suyono, S.T., M.T., Ph.D
NIP. 19730520 200801 1 013

Dosen Pembimbing II



Ir. Mahfudz Shidiq, M.T.
NIP. 19580906 198703 1 003

ANALISIS KESTABILAN PERALIHAN PADA SISTEM TRANSMISI *HIGH VOLTAGE DIRECT CURRENT* (HVDC)

Yakin Gabrielsa, Hadi Suyono, S.T., M.T., Ph.D.², Ir. Mahfudz Shidiq, M.T.³

¹Mahasiswa Teknik Elektro, ^{2,3}Dosen Teknik Elektro, Universitas Brawijaya

Jalan MT. Haryono 167, Malang 65145, Indonesia

E-mail: yakin9a@gmail.com

Abstrak— Penelitian ini membahas tentang kestabilan peralihan sistem transmisi HVDC & transmisi AC. Hal ini dilakukan untuk menentukan, sistem mana yang lebih stabil ketika terjadi gangguan. Simulasi dilakukan pada Sistem Transmisi Jawa Bali 500 kV pada 2 kondisi, yaitu Pembebanan 100% dan 70%. Sistem Transmisi HVDC yang diuji ada 2 jenis, yaitu Monopolar Link dan Bipolar Link. Semua simulasi diberi gangguan yang sama, yaitu gangguan pada Bus 26 selama 0.1 detik. Hasil dari simulasi ini yaitu melihat respon sudut rotor generator 26 dan sudut rotor generator 11, sebelum dan saat terjadi gangguan. Pada pembebanan 100 %, sistem yang menggunakan saluran transmisi Bipolar HVDC hanya mengalami kenaikan 51.8514%. Sistem yang menggunakan saluran transmisi Monopolar HVDC senilai 76.7310%. Sistem yang menggunakan saluran transmisi AC senilai 100.5043%. Transmisi Bipolar HVDC memiliki kenaikan sudut rotor yang lebih rendah dibandingkan transmisi Monopolar HVDC maupun transmisi AC. Dari hasil penelitian ini dapat disimpulkan bahwa Saluran Transmisi HVDC dapat menambah kestabilan peralihan sistem tenaga listrik.

Kata kunci — kestabilan peralihan, saluran transmisi, transmisi HVDC, sudut rotor.

Abstract— *This research discusses about transient stability of HVDC transmission and AC transmission lines. Its aims to determine which the transmission system more stable when there is faults. In order to carry out this research, the simulation was performed on Jawa Bali 500 kV system in two condition, with dispatch 100% and 70%. There are two HVDC systems are tested namely monopolar and bipolar link. All of the simulations are used to see rotor angle responses at generator 26 and generator 11, before and during faults on bus 26'0.1s. Futhermore, bipolar HVDC in the 100% imposition only increase up to 51.8514%, while Monopolar HVDC rapidly increase up to 76.7310% dan AC transmission up to 100.5043%. It means that the higher improvement of rotor angle system make an unstable transmission system. Bipolar HVDC transmission system is the lowest rotor angle improvement overall. In conclusion, HVDC transmission line can improve the transient stability of power system.*

Keyword— *transient stability, transmission line, HVDC transmission, rotor angle*

I. PENDAHULUAN

Indonesia merupakan negara berpenduduk terpadat keempat di dunia. Pertumbuhan jumlah penduduk yang meningkat tiap tahunnya menuntut persediaan kebutuhan energi listrik yang semakin besar. Sistem tenaga listrik pun harus senantiasa diperbaharui demi menunjang kebutuhan energi listrik untuk masyarakat. Salah satu penunjang sistem tenaga listrik tersebut adalah saluran transmisi. Beberapa parameter dalam mengukur keandalan suatu sistem transmisi yaitu : memiliki rugi-rugi saluran yang kecil juga tahan terhadap gangguan. Gangguan pada saluran transmisi dapat menyebabkan sistem memasuki keadaan peralihan. Jika yang terjadi adalah gangguan yang besar, maka kestabilan sistem dapat terganggu. Kerja paralel antar generator menjadi tidak serempak atau sinkron satu sama lain. Hal ini memungkinkan terjadi pemadaman skala besar atau yang biasa disebut black-out. Telaah kestabilan peralihan bertujuan untuk menentukan apakah sistem tadi tetap dalam keadaan serempak setelah terjadinya gangguan berat, misalnya gangguan sistem transmisi, perubahan beban yang mendadak terputusnya unit pembangkit atau pemutaran saklar (switching) saluran [1].

Saluran transmisi di Indonesia menggunakan jenis transmisi AC. Namun dalam perkembangannya, saluran transmisi HVDC sudah banyak digunakan pada negara-negara maju seperti Jepang dan China. Transmisi HVDC memiliki beberapa kelebihan dibandingkan dengan sistem transmisi AC, yaitu : kerugian corona lebih rendah; memelukan isolasi yang lebih sedikit; dan drop tegangan rendah; biaya tiang listrik, isolator,

kabel dan konduktor yang rendah sehingga sistem ini lebih ekonomis; efek kulit, rugi-rugi dielektrik, rugi-rugi induktansi dan surja, gangguan sinyal komunikasi, masalah sinkronisasi dan stabilitas tidak ditemukan dalam sistem transmisi HVDC [2].

Berdasarkan karakteristiknya, transmisi HVDC ini dapat menjadi salah satu rekomendasi alternatif transmisi di Indonesia. Penelitian ini membahas tentang Analisis Kestabilan Peralihan pada Transmisi *High Voltage Direct Current* (HVDC). Tujuan penelitian ini adalah untuk mengetahui pengaruh penggunaan sistem transmisi HVDC terhadap kestabilan peralihan sistem tenaga listrik. Selain itu juga diharapkan dapat memberikan ide dan pertimbangan untuk mengadakan transmisi HVDC di Indonesia.

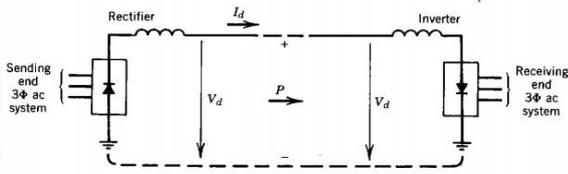
II. TINJAUAN PUSTAKA

A. Sistem Transmisi *High Voltage Direct Current* (HVDC)

Transmisi HVDC adalah sistem penyaluran daya elektrik menggunakan arus DC. Jenis transmisi ini digunakan untuk mengirimkan daya besar melalui jarak yang jauh menggunakan saluran kabel udara atau kabel bawah laut. Transmisi HVDC menjadi lebih efisien daripada Transmisi AC jika melebihi batas panjang saluran tertentu (*breakpoint*). Selain itu Transmisi HVDC juga dapat mengurangi kendala sinkron antara dua sistem AC, sehingga dapat meningkatkan stabilitas steady state dan dinamis.

B. Konfigurasi Sistem HVDC

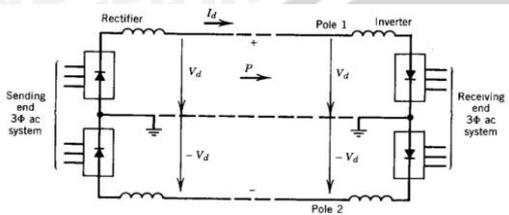
a. Hubungan Monopolar



Gambar 1. HVDC Monopolar [3]

Monopolar HVDC adalah transmisi HVDC yang hanya menggunakan satu konduktor dengan arus balik melalui tanah atau air laut.

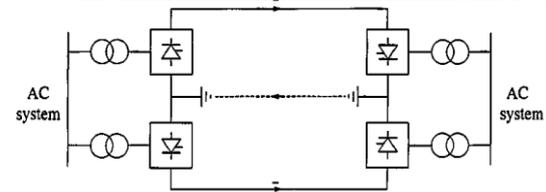
b. Hubungan Bipolar



Gambar 2. HVDC Bipolar [3]

Bipolar HVDC adalah transmisi HVDC yang menggunakan dua konduktor untuk mengalirkan tegangan dengan polaritas positif dan polaritas negatif. Setiap terminalnya memiliki dua konverter yang terhubung seri.

c. Hubungan Homopolar



Gambar 3. HVDC Homopolar [4]

Homopolar HVDC adalah transmisi HVDC yang menggunakan konduktor lebih dari dua buah, yang mengalirkan tegangan dengan polaritas sejenis yaitu polaritas positif atau polaritas negatif.

C. Konsep Dasar Kestabilan Peralihan

Kestabilan transien adalah kemampuan sistem tenaga listrik untuk menjaga kestabilan sistem ketika terjadi gangguan yang besar. Masalah kestabilan peralihan ini terbagi menjadi 2 bagian, yaitu kestabilan ayunan pertama (first swing) dan ayunan majemuk (multiswing). Kestabilan ayunan pertama didasarkan pada model generator yang cukup sederhana, serta periode waktu yang diselidiki hanya detik pertama setelah terjadinya gangguan. Sedangkan kestabilan ayunan majemuk mencakup periode waktu yang lebih lama, karena harus mempertimbangkan pengaruh sistem pengaturan generator terhadap perilaku mesin dalam waktu yang cukup lama. Bila mesin sistem didapatkan tetap berada dalam keadaan serempak sebelum berakhirnya detik pertama, maka dapat dikatakan bahwa sistem itu stabil. Parameter dari kestabilan peralihan adalah sudut rotor dari generator. Persamaan yang mengatur gerakan rotor mesin sinkron didasarkan pada prinsip dasar dinamika yang menyatakan bahwa: momen-putar percepatan (*accelerating torque*) adalah hasil kali momen kelembaman (momen inersia) rotor dengan percepatan sudutnya.

Persamaannya dapat ditulis sebagai berikut:

$$J \frac{d^2 \theta_m}{dt^2} = T_a = T_m - T_e \quad (2.1)$$

dimana : J = momen kelembaman motor

θ_m = pergeseran sudut rotor terhadap sumbu diam (radian)

t = waktu (detik)

T_a = momen putar percepatan (Nm)

T_m = momen putaran mekanis poros penggerak yang diberikan penggerak mula dikurangi dengan rugi-rugi (Nm)

T_e = momen putar elektrik (Nm)

Jika generator sinkron membangkitkan torsi elektromagnetik dalam keadaan berputar pada kecepatan sinkron ω_{sm} maka

$$T_m = T_e \quad (2.2)$$

Jika terjadi gangguan akan menghasilkan suatu percepatan ($T_m > T_e$) atau perlambatan ($T_m < T_e$) dengan

$$T_a = T_m - T_e \quad (2.3)$$

Pada persamaan (2.1) karena θ_m diukur terhadap sumbu yang diam, maka untuk mengukur posisi sudut rotor terhadap sumbu yang berputar pada kecepatan sinkron adalah:

$$\theta_m = \omega_{sm} t + \delta_m \quad (2.4)$$

Dengan δ_m adalah pergeseran sudut rotor dalam satuan radian terhadap sumbu yang berputar dengan kecepatan sinkron. Penurunan persamaan (2.4) terhadap waktu memberikan kecepatan putaran rotor seperti persamaan berikut:

$$\omega_m \frac{d\theta_m}{dt} = \omega_{sm} + \frac{d\delta_m}{dt} \quad (2.5)$$

dan percepatan rotornya adalah:

$$\frac{d^2 \theta_m}{dt^2} = \frac{d^2 \delta_m}{dt^2} \quad (2.6)$$

Substitusi persamaan (2.6) ke persamaan (2.1) didapatkan

$$J \frac{d^2 \delta_m}{dt^2} = T_a = T_m - T_e \quad (2.7)$$

Kemudian dengan mengalikan persamaan (2.7) dengan ω_m akan menghasilkan:

$$J \omega_m \frac{d^2 \delta_m}{dt^2} = \omega_m T_a = \omega_m T_m - \omega_m T_e \quad (2.8)$$

Jika kecepatan putar dikali torsi adalah sama dengan daya, dan $J \omega_m$ adalah momen sudut (angular momentum) rotor yang dinyatakan dengan M , maka dapat ditulis dengan persamaan daya sebagai berikut:

$$M \frac{d^2 \delta_m}{dt^2} = P_a = P_m - P_e \quad (2.9)$$

dengan:

$$M = \frac{2H}{\omega_s} \quad (2.10)$$

sehingga persamaan (2.9) menjadi:

$$\frac{2H}{\omega_s} \frac{d^2 \delta}{dt^2} = P_a = P_m - P_e \quad (2.11)$$

Kecepatan sudut adalah hasil kali frekuensi dengan π , maka persamaan (2.11) menjadi:

$$\frac{H}{\pi f} \frac{d^2 \delta}{dt^2} = P_a = P_m - P_e \quad (2.12)$$

Jika δ dinyatakan dalam derajat, maka persamaan ayunan menjadi:

$$\frac{H}{180f} \frac{d^2 \delta}{dt^2} = P_a = P_m - P_e \quad (2.13)$$

Kemudian persamaan ayunan diatas ditransformasikan ke dalam bentuk pernyataan variable sebagai berikut :

$$\frac{d\delta}{dt} = \omega \quad (2.14)$$

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{\pi f_0}{H} P_a \quad (2.15)$$

Untuk mengurangi kerumitan pembuatan model sistem, biasanya dalam studi kestabilan peralihan mesin majemuk dibuat pengandaian sebagai berikut:

- Masukan daya mekanis ke masing-masing mesin adalah tetap konstan selama keseluruhan periode perhitungan lengkung ayunan.
- Daya redaman dapat diabaikan.
- Setiap mesin boleh diwakili oleh suatu reaktansi peralihan yang konstan yang terhubung seri dengan suatu tegangan-dalam peralihan yang konstan pula.
- Sudut rotor mekanis dari setiap mesin adalah bersamaan dengan δ , yaitu sudut fasa listrik dari tegangan dalam peralihan.
- Semua beban boleh dianggap sebagai impedansi shunt ke tanah dengan nilai yang ditentukan oleh keadaan yang berlangsung tepat sebelum keadaan peralihan.

Untuk memudahkan dalam menganalisa stabilitas peralihan, diperlukan beberapa asumsi yang dapat memudahkan analisa stabilitas peralihan tersebut, yaitu :

- Daya mekanik P_m dari penggerak utama dianggap tetap. Hal ini dapat dilakukan dengan pengendalian dari governor dan prime mover-nya.
- Daya elektronik P_e dapat berubah sesuai dengan kecepatan rotor akibat dipercepat, diperlambat atau pada kecepatan sinkron.
- Pada kondisi daya mekanis P_m dan daya listrik P_e sama besar, maka mesin berada dalam kecepatan sinkron.
- Perubahan daya listrik P_e ditentukan oleh konfigurasi jaringan transmisi dan distribusi serta beban dari sistem yang dipasok oleh generator tersebut.

Proses analisis kestabilan peralihan dapat diselesaikan menggunakan persamaan diferensial non linier dan aljabar. Persamaan ini harus diselesaikan secara langsung atau dengan prosedur metode iterasi step by step, untuk menggambarkan δ versus t dari semua mesin yang ada. Grafik δ versus t dibuat untuk memperoleh lengkung ayunan mesin tersebut. Sudut δ dihitung sebagai fungsi waktu untuk periode yang cukup lama agar dapat melihat peningkatan δ tanpa batas atau akan mencapai nilai maksimum dan kemudian mulai mengecil. Ketika δ mengalami peningkatan tanpa batas waktu, maka sistem menjadi tidak stabil setelah terjadi gangguan. Sedangkan jika δ mencapai nilai maksimum dan kemudian mulai mengecil, hal ini menandakan bahwa sistem dapat kembali stabil setelah terjadi gangguan.

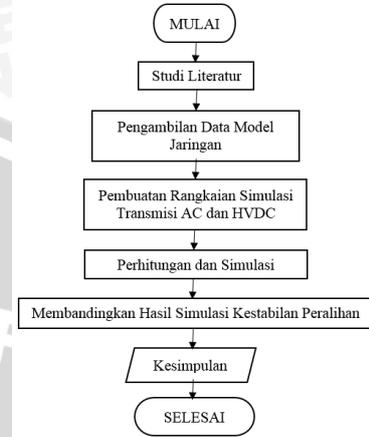
Dalam metode perhitungan dengan tangan, perubahan posisi sudut rotor selama interval waktu yang pendek dihitung dengan asumsi sebagai berikut:

1. Daya percepatan P_a yang dihitung pada permulaan interval bernilai konstan mulai dari pertengahan interval sebelumnya sampai pertengahan interval tersebut.
2. Kecepatan sudut bernilai konstan untuk keseluruhan interval, dan nilainya sama dengan yang dihitung pada tengah-tengah interval tersebut.

III. METODE PENELITIAN

Metode penelitian memberikan gambaran urutan langkah-langkah yang dilaksanakan untuk mencapai tujuan penyusunan penelitian. Simulasi HVDC akan diterapkan pada sistem standart IEEE 30 bus. Pembuatan rangkaian simulasi Transmisi AC dan HVDC menggunakan perangkat lunak PSE. Saluran transmisi HVDC yang digunakan jenis Monopolar HVDC dan

Bipolar HVDC. Simulasi sistem tenaga listrik yang dilakukan menggunakan model tiga fasa yang terdiri dari generator sinkron, sistem transmisi, trafo, beban, dan gangguan. Sistem tenaga listrik yang mulanya stabil, diberi gangguan pada salah satu bus, sehingga terjadi perubahan kecepatan sudut rotor generator. Langkah-langkah pengerjaan metode penelitian pada skripsi ini digambarkan sesuai dengan diagram alir seperti pada Gambar 4.



Gambar 4. Diagram alir metodologi penelitian Data-data yang telah diambil, diolah melalui perhitungan sehingga diperoleh data kestabilan peralihan sistem standart IEEE 30 bus dan sistem transmisi Jawa-Bali 500 kV Proses perhitungan dilakukan sesuai urutan dibawah ini :

- 1 Menentukan jumlah bus yang akan digunakan
- 2 Menetapkan bus pembangkit 1 sebagai *slack* bus, bus pembangkit lainnya sebagai bus PV, sedangkan bus beban merupakan bus yang tidak difungsikan sebagai bus PV maupun *slack* bus.
- 3 Menetapkan daya dan tegangan dasar sebagai dasar perhitungan per unit. Untuk sistem standart IEEE 30 bus memiliki daya dasar 100 MVA dan tegangan dasar 132 kV.
- 4 Menghitung nilai impedansi dasar (Z_{base}) serta mengubah impedansi sistem menjadi satuan per unit. Z_{base} di hitung dengan persamaan:

$$Z_{base}(\Omega) = \frac{V_{base}(kV)}{I_{base}(kA)}$$

Dengan I_{base} :

$$I_{base}(kA) = \frac{S_{base}(MVA)}{\sqrt{3} \cdot V_{base}(kV)}$$

Impedansi sistem di rubah menjadi satuan per unit dengan persamaan:

$$impedansi \text{ p.u} = \frac{impedansi \text{ sebenarnya } (\Omega)}{impedansi \text{ dasar } (\Omega)}$$

- 5 Melakukan analisis keadaan tetap (*Steady State*) untuk mendapatkan nilai untuk daya aktif dan reaktif, tegangan pada masing-masing terminal generator dan bus beban dengan semua sudutnya.
- 6 Menghitung tegangan dalam peralihan generator untuk mendapatkan sudut rotor awal masing masing generator dengan persamaan:

$$E' = V_t + (X_d' \times I)$$

Dimana V_t adalah tegangan terminal pada bus yang berkesuaian, hasil dari analisis keadaan tetap. Nilai $X'd$ adalah reaktansi dalam masing-masing generator. Sedangkan I adalah arus keluaran dari bus yang berkesuaian tersebut, didapatkan dengan persamaan:

$$I = \frac{(P - jQ)}{V_t^*}$$

Maka didapatkan nilai tegangan dalam peralihan masing-masing generator.

$$E_i' = |E_i| \angle \delta_i$$

Nilai sudut rotor awal berhimpitan dengan nilai sudut dari tegangan dalam peralihan.

$$\delta_0 = \delta_i$$

- Mengubah impedansi beban menjadi admitansi konstan ke tanah pada masing-masing busnya, dengan menggunakan persamaan:

$$Y_L = \frac{(P_L - jQ_L)}{|V_L|^2}$$

- Mengubah reaktansi peralihan generator menjadi bentuk admitansi, dengan menggunakan persamaan:

$$X_d' = \frac{1}{X_d}$$

- Mengubah impedansi saluran menjadi bentuk admitansi saluran dengan menggunakan persamaan:

$$Y_{sal} = \frac{1}{Z_{sal}}$$

- Menyusun matriks Ybus sebelum gangguan, saat terjadi gangguan, dan setelah terjadi gangguan. Ybus terdiri dari admitansi peralihan generator, admitansi beban shunt, dan admitansi saluran. Penyusunan Ybus ini berdasarkan hubungan antar masing-masing bus, dengan menggunakan persamaan:

$$Y_{bus} = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} & \dots & Y_{1n} \\ Y_{21} & Y_{22} & \dots & Y_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Y_{n1} & Y_{n2} & \dots & Y_{nn} \end{bmatrix}$$

Dengan nilai n sejumlah bus pada sistem

- Menghitung aliran daya yang mengalir dari generator menuju sistem, dihitung dengan menggunakan persamaan dari persamaan sudut daya:

$$P_{ei} = G_{ii} |E_i|^2 + \sum_j |Y_{ij}| |E_i| |E_j| \sin(\delta_i - \phi)$$

- Menghitung perubahan δ tiap waktu menggunakan metode *step by step*:

$$P_a = P_m - P_e$$

Dimana nilai $P_e = P_{ei}$ dan P_m awal bernilai 1 pu.

Mensubstitusikan nilai P_a ke dalam persamaan:

$$\Delta\delta_{(n)} = \Delta\delta_{(n-1)} + \frac{180 f}{H} P_{a(n-1)} (\Delta t)^2$$

Dari sini diketahui nilai perubahan sudut rotor tiap waktunya. $\Delta\delta_{(n)}$ selanjutnya disubstitusikan kedalam persamaan :

$$\delta_{(n)} = \delta_{(n-1)} + \Delta\delta_{(n)}$$

Dengan nilai $\delta_{(n-1)}$ awal sama dengan nilai δ_0

Selanjutnya, dilakukan iterasi hingga interval waktu yang di inginkan.

- Menggambarkan grafik sudut rotor generator δ terhadap fungsi waktu t

Setelah melakukan perhitungan, simulasi menggunakan program PSSE juga dilakukan untuk membandingkan, sistem transmisi mana yang lebih stabil ketika terjadi gangguan. Berikut ini langkah simulasi yang dilakukan:

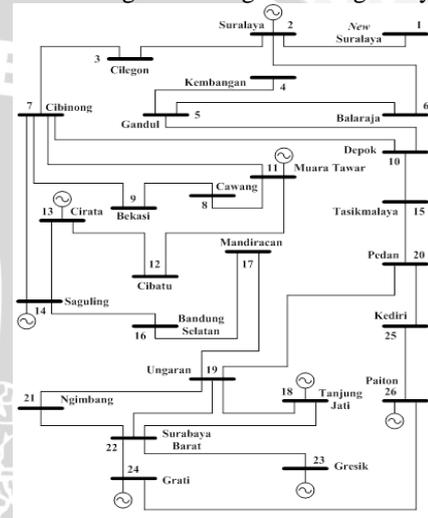
- Memasukkan data-data yang telah didapat ke perangkat lunak PSSE.
- Melakukan simulasi aliran daya dengan mengacu pada metode Newton-Raphson sehingga sistem berada pada kondisi konvergen

- Memberikan gangguan hubung singkat tiga fasa pada salah satu bus selama 0.15 detik.
- Melakukan analisis kestabilan peralihan sudut rotor generator setelah terjadi gangguan pada bus.
- Mengganti beberapa saluran AC dengan saluran Monopolar HVDC dan Bipolar HVDC.
- Melakukan langkah simulasi nomer 2 sampai nomer 4 serta menganalisis kestabilan peralihan.
- Membandingkan perubahan sudut rotor masing-masing saluran, ketika sebelum gangguan, saat terjadi gangguan dan setelah terjadi gangguan.

IV. ANALISIS DAN PEMBAHASAN

A. Data Sistem Transmisi Jawa Bali 500 kV

Pada analisis ini akan menggunakan sistem transmisi Jawa Bali 500 kV. Berikut gambar diagram satu garisnya:



Gambar 5 Single Line Diagram Sistem Transmisi Jawa Bali 500 kV [5]

Data yang diperlukan dalam melakukan analisis kestabilan meliputi data pembangkitan, saluran, pembebanan, tegangan masing-masing bus, frekuensi dan data dinamik generator.

B. Sistem Transmisi Jawa Bali 500 kV Pembebanan 100%

a. Saluran AC Simulasi Aliran Daya

Simulasi aliran daya dilakukan untuk mengetahui kondisi awal sistem sebelum dilakukan analisis kestabilan transien sistem tenaga listrik. Simulasi aliran daya dilakukan menggunakan metode *Newton Rhapsion*. Berikut ini hasil simulasi aliran daya yang ditunjukkan pada Tabel 1.

Tabel 1. Hasil Simulasi Aliran Daya Saluran AC Pembebanan 100%

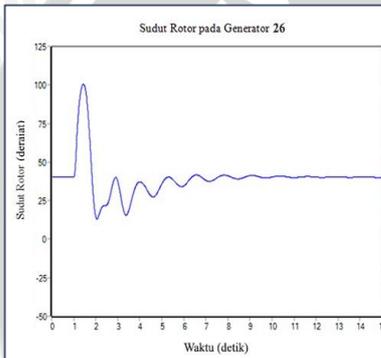
No. Bus	Tegangan		Beban		Generator	
	Magnitude	Derajat	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)
1	0.9999	-17.99	86	34	0	0
2	1	-17.98	142	-56	2962	493.6026
3	0.9995	-18.35	320	-139	0	0
4	0.9647	-24.3	676	213	0	0
5	0.9696	-23.62	727	47	0	0
6	0.9768	-21.63	636	253	0	0
7	0.976	-23.42	473	350	0	0
8	0.9802	-24.77	343	97	0	0
9	0.9761	-25.21	1097	79	0	0
10	0.9703	-23.58	536	166	0	0
11	1	-22.49	0	0	1351	910.0243
12	0.9928	-22.9	666	463	0	0
13	1	-22.37	650	270	365	577.8615
14	1	-21.83	0	0	647	1144.277
15	0.9362	-19.18	137	48	0	0
16	0.9853	-20.93	505	325	0	0
17	0.9702	-16.12	-339	3	0	0
18	1	-0.32	380	96	2385	723.8681
19	0.9504	-9.25	838	382	0	0
20	0.9193	-12.61	631	430	0	0
21	0.9773	-7.54	262	43	0	0
22	0.9886	-6.24	983	642	0	0
23	1	-5.96	146	21	590	823.6552
24	1	-3.37	430	205	325	534.627
25	0.9378	-8.2	605	197	0	0
26	1	0	593	144	3039.886	585.6523
Total					11665	5794

Simulasi Kestabilan Peralihan

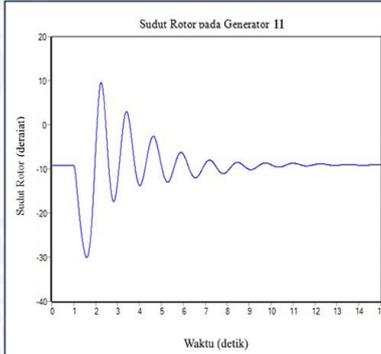
Simulasi kestabilan peralihan dimulai dari detik ke-0, waktu gangguan 0.1 detik pada detik ke 1. Gangguan terjadi pada bus 26 dengan acuan generator 2. Untuk menganalisis kestabilan transien, gangguan yang akan disimulasikan adalah gangguan tiga fasa ke tanah pada sistem tenaga listrik [6]. Data yang ditampilkan berupa data grafik perubahan sudut rotor (δ) terhadap waktu. Untuk saluran Transmisi HVDC, pemasangannya menghubungkan antara bus 24 dan 26. Berikut ini simulasi pada Sistem Transmisi Jawa Bali 500 kV saluran AC pembebanan 100%:

Tabel 2 Sudut Rotor Generator 26 dan 11 Saluran AC Pembebanan 100 %

t (detik)	Gen 26 (derajat)	Gen 11 (derajat)	t (detik)	Gen 26 (derajat)	Gen 11 (derajat)
0.0	40.1386	-9.1589	8.0	41.0815	-10.5236
1.0	40.1386	-9.1589	8.5	39.1550	-8.4848
1.4	100.5043	27.4003	9.0	41.2637	-10.1077
1.5	90.2293	30.0778	9.5	40.1191	-9.0052
2.0	13.9731	-5.1449	10.0	40.3295	-9.0302
2.5	22.1396	-2.9411	10.5	40.8093	-9.4425
3.0	37.2812	-12.8242	11.0	40.0094	-8.7045
3.5	18.9955	1.7738	11.5	40.6189	-9.2498
4.0	37.1462	-13.7271	12.0	40.2619	-8.9715
4.5	28.1136	-3.5682	12.5	40.2160	-8.9569
5.0	36.1233	-9.3491	13.0	40.4093	-9.1721
5.5	38.6136	-10.8974	13.5	40.1067	-8.9448
6.0	34.7080	-6.6410	14.0	40.2892	-9.1387
6.5	41.6216	-11.9796	14.5	40.1868	-9.0848
7.0	38.0510	-8.6958	15.0	40.1371	-9.0651
7.5	39.8561	-9.5799			



Gambar 6. Sudut Rotor Generator 26 Saluran AC pembebanan 100%



Gambar 7. Sudut Rotor Generator 11 Saluran AC pembebanan 100%

Pada Gambar 6, ketika awal sistem di jalankan, sistem berjalan stabil. Sudut Rotor Generator 26 pada mulanya mengalami penyimpang senilai 40.1385° terhadap sumbu tetapnya. Sesaat setelah diberi gangguan pada bus 26, sudut rotor generator 26 mengalami kenaikan hingga 100.5043°. Sistem kembali stabil setelah mencapai detik ke-11. Pada Gambar 7, ketika awal sistem di jalankan, sistem berjalan stabil. Sudut rotor generator 11 pada mulanya mengalami penyimpang senilai -9.1589° terhadap sumbu tetapnya. Sesaat setelah diberi gangguan pada bus 26, Sudut Rotor Generator 11 mengalami kenaikan hingga -30.0778°. Sistem kembali stabil setelah mencapai detik ke-13.

b. Saluran Monopolar HVDC

Simulasi Aliran Daya

Simulasi aliran daya dilakukan untuk mengetahui kondisi awal sistem sebelum dilakukan analisis kestabilan transien sistem tenaga listrik. Simulasi aliran daya dilakukan menggunakan metode *Newton Rhapson*. Berikut ini hasil simulasi aliran daya yang ditunjukkan pada Tabel 3:

Tabel 3. Hasil Simulasi Aliran Daya Monopolar HVDC Pembebanan 100%

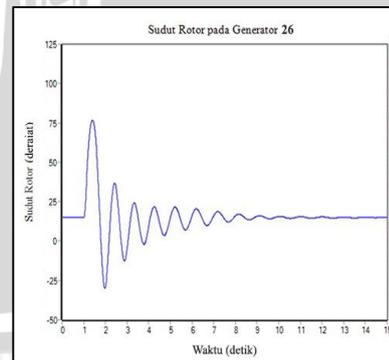
No. Bus	Tegangan		Beban		Generator	
	Magnitude	Derajat	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)
1	0.9999	-17.86	86	34	0	0
2	1	-17.86	142	-56	2962	493.4846
3	0.9995	-18.22	320	-139	0	0
4	0.9648	-24.18	676	213	0	0
5	0.9696	-23.53	727	47	0	0
6	0.9768	-21.51	636	253	0	0
7	0.976	-23.3	473	350	0	0
8	0.9802	-24.65	343	97	0	0
9	0.9762	-25.09	1097	79	0	0
10	0.9703	-23.45	536	166	0	0
11	1	-22.36	0	0	1351	909.9274
12	0.9928	-22.78	666	463	0	0
13	1	-22.25	650	270	365	577.8687
14	1	-21.71	0	0	647	1144.459
15	0.9363	-19.07	137	48	0	0
16	0.9853	-20.8	505	325	0	0
17	0.9702	-15.99	-339	3	0	0
18	1	-20.18	380	96	2385	723.9705
19	0.9504	-9.11	838	382	0	0
20	0.9194	-12.5	631	430	0	0
21	0.9773	-7.35	262	43	0	0
22	0.9886	-6.04	983	642	0	0
23	1	-5.76	146	21	590	824.1741
24	1	-3.15	430	205	325	3893.515
25	0.9379	-8.15	605	197	0	0
26	1	0	593	144	3034.417	3256.243
27	0.9997	-0.01	0	0	0	0
28	1	-3.15	0	0	0	0
Total					11659.42	11823.642

Simulasi Kestabilan Peralihan

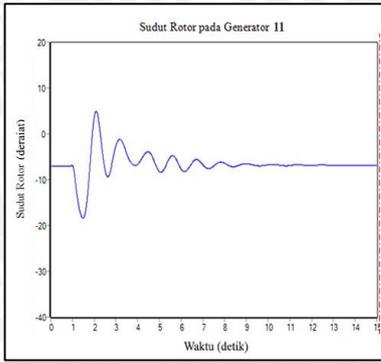
Simulasi kestabilan peralihan menggunakan perlakuan yang sama pada semua jenis saluran transmisi. Berikut ini simulasi pada Sistem Transmisi Jawa Bali 500 kV pembebanan 100%:

Tabel 4. Sudut Rotor Generator 26 dan 11 Monopolar HVDC Pembebanan 100 %

t (detik)	Gen 26 (derajat)	Gen 11 (derajat)	t (detik)	Gen 26 (derajat)	Gen 11 (derajat)
0.0	14.9003	-7.0223	8.0	16.0330	-6.4167
1.0	14.8926	-6.9644	8.5	14.1147	-7.0983
1.4	76.7310	-17.8393	9.0	15.7952	-6.5024
1.5	73.6894	-18.3962	9.5	14.2573	-6.9592
2.0	-28.6175	3.9113	10.0	15.6540	-6.7336
2.5	32.6811	-8.0311	10.5	14.3226	-6.8066
3.0	-4.5511	-2.4353	11.0	15.5270	-6.8979
3.5	15.0983	-4.5080	11.5	14.4145	-6.7443
4.0	10.0967	-6.6049	12.0	15.3682	-6.9464
4.5	11.0995	-3.9625	12.5	14.5513	-6.7619
5.0	15.3883	-8.2657	13.0	15.1953	-6.9222
5.5	11.8670	-5.0264	13.5	14.6898	-6.8119
6.0	16.5269	-7.7392	14.0	15.0633	-6.8839
6.5	13.0332	-6.2616	14.5	14.7898	-6.8533
7.0	16.3724	-6.8090	15.0	14.9831	-6.8585
7.5	13.7540	-6.9650			



Gambar 8. Sudut Rotor Generator 26 Monopolar HVDC pembebanan 100%



Gambar 9. Sudut Rotor Generator 11 Monopolar HVDC pembebanan 100%

Pada Gambar 8, ketika awal sistem di jalankan, sistem berjalan stabil. Sudut Rotor Generator 26 pada mulanya mengalami penyimpang senilai 14.9003° terhadap sumbu tetapnya. Sesaat setelah diberi gangguan pada bus 26, sudut rotor generator 26 mengalami kenaikan hingga 76.7310°. Sistem kembali stabil setelah mencapai detik ke-10. Pada Gambar 9, ketika awal sistem di jalankan, sistem berjalan stabil. Sudut rotor generator 11 pada mulanya mengalami penyimpang senilai -7.0223° terhadap sumbu tetapnya. Sesaat setelah diberi gangguan pada bus 26, sudut rotor generator 11 mengalami kenaikan hingga -18.3962°. Sistem kembali stabil setelah mencapai detik ke-11.

c. Saluran Bipolar HVDC Simulasi Aliran Daya

Simulasi aliran daya dilakukan untuk mengetahui kondisi awal sistem sebelum dilakukan analisis kestabilan transien sistem tenaga listrik. Simulasi aliran daya dilakukan menggunakan metode *Newton Rhapson*. Berikut ini hasil simulasi aliran daya yang ditunjukkan pada Tabel 5:

Tabel 5. Hasil Simulasi Aliran Daya Bipolar HVDC Pembebanan 100%

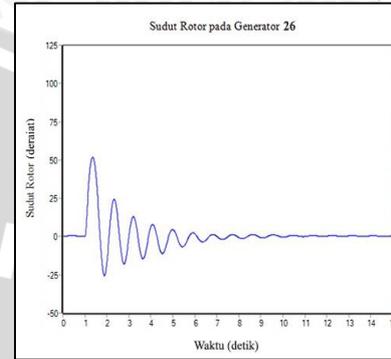
No. Bus	Tegangan		Beban		Generator	
	Magnitude	Derajat	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)
1	0.9999	-17.85	86	34	0	0
2	1	-17.85	142	-56	2962	493.4792
3	0.9995	-18.22	320	-139	0	0
4	0.9648	-24.17	676	213	0	0
5	0.9696	-23.49	727	47	0	0
6	0.9768	-21.5	636	253	0	0
7	0.976	-23.29	473	350	0	0
8	0.9802	-24.64	343	97	0	0
9	0.9762	-25.08	1097	79	0	0
10	0.9703	-23.44	536	166	0	0
11	1	-22.35	0	0	1351	909.9229
12	0.9928	-22.77	666	463	0	0
13	1	-22.24	650	270	365	577.8669
14	1	-21.7	0	0	647	1144.482
15	0.9363	-19.06	137	48	0	0
16	0.9853	-20.79	505	325	0	0
17	0.9702	-15.98	-339	3	0	0
18	1	-0.17	380	96	2385	723.9901
19	0.9504	-9.1	838	382	0	0
20	0.9194	-12.5	631	430	0	0
21	0.9773	-7.34	262	43	0	0
22	0.9886	-6.03	983	642	0	0
23	1	-5.75	146	21	590	824.2169
24	1	-3.14	430	205	325	7719.546
25	0.9379	-8.15	605	197	0	0
26	1	0	593	144	3033.879	7991.622
27	0.9997	0	0	0	0	0
28	1	-3.13	0	0	0	0
Total					11638.88	20385.1300

Simulasi Kestabilan Peralihan

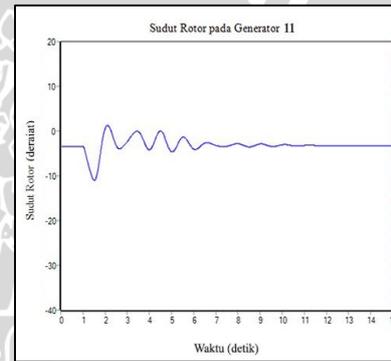
Simulasi kestabilan peralihan menggunakan perlakuan yang sama pada semua jenis saluran transmisi. Berikut ini simulasi pada Sistem Transmisi Jawa Bali 500 kV pembebanan 100%:

Tabel 6. Sudut Rotor Generator 26 dan 11 Bipolar HVDC Pembebanan 100 %

t (detik)	Gen 26 (derajat)	Gen 11 (derajat)	t (detik)	Gen 26 (derajat)	Gen 11 (derajat)
0,0	0,3944	-3,5128	8,0	-0,8116	-2,8208
1,0	0,3899	-3,4250	8,5	0,9449	-3,5375
1,4	51,8514	-9,4063	9,0	-0,6852	-2,8370
1,5	39,1191	11,0378	9,5	1,1115	-3,4120
2,0	-17,0167	0,5647	10,0	-0,3630	-3,0489
2,5	11,2817	-3,2361	10,5	0,8798	-3,2745
3,0	-0,6368	-2,3781	11,0	0,0137	-3,2030
3,5	-8,2614	-0,1017	11,5	0,5613	-3,2077
4,0	6,3292	-4,1811	12,0	0,3373	-3,2833
4,5	-10,9682	0,0375	12,5	0,3525	-3,2045
5,0	4,6825	-4,5837	13,0	0,4757	-3,2949
5,5	-6,3179	-1,3506	13,5	0,2886	-3,2271
6,0	1,8048	-4,0080	14,0	0,4882	-3,2882
6,5	-2,2990	-2,6810	14,5	0,3023	-3,2591
7,0	0,0985	-3,2034	15,0	0,4733	-3,2797
7,5	-0,0444	-3,3964			



Gambar 10. Sudut Rotor Generator 26 Bipolar HVDC pembebanan 100%



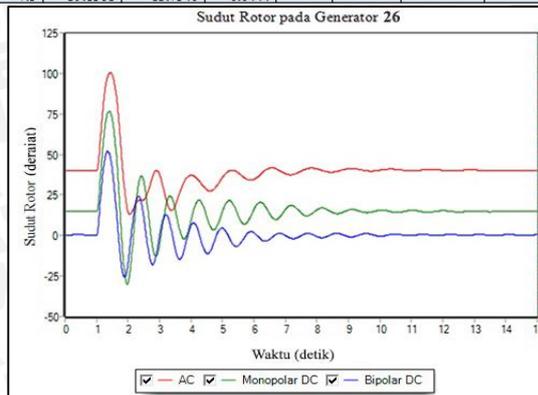
Gambar 11. Sudut Rotor Generator 11 Bipolar HVDC pembebanan 100%

Pada Gambar 10, ketika awal sistem di jalankan, sistem berjalan stabil. Sudut rotor generator 26 pada mulanya mengalami penyimpang senilai 0.3944° terhadap sumbu tetapnya. Sesaat setelah diberi gangguan pada bus 26, sudut rotor generator 26 mengalami kenaikan hingga 51.8514°. Sistem kembali stabil setelah mencapai detik ke-10. Pada Gambar 11, ketika awal sistem di jalankan, sistem berjalan stabil. Sudut rotor generator 11 pada mulanya mengalami penyimpang senilai -3.5128° terhadap sumbu tetapnya. Sesaat setelah diberi gangguan pada bus 26, Sudut Rotor Generator 11 mengalami kenaikan hingga -11.0378°. Sistem kembali stabil setelah mencapai detik ke-10.

d. Perbandingan Sudut Rotor

Tabel 7. Perbandingan Sudut Rotor Generator 26 Pembebanan 100%

t (detik)	Jenis Saluran			t (detik)	Jenis Saluran		
	AC	Monopolar HVDC	Bipolar HVDC		AC	Monopolar HVDC	Bipolar HVDC
0.0	40.1386	14.9003	0.3944	8.0	41.0815	16.0330	-2.8208
1.0	40.1386	14.8926	0.3899	8.5	39.1550	14.1147	-3.5375
1.4	100.5043	76.7310	51.8514	9.0	41.2637	15.7952	-2.8570
1.5	90.2293	73.6894	39.1191	9.5	40.1191	14.2573	-3.4120
2.0	13.9731	-28.6175	-17.0167	10.0	40.3295	15.6540	-3.0489
2.5	22.1396	32.6811	11.2817	10.5	40.8093	14.3226	-3.2745
3.0	37.2812	-4.5511	-0.6368	11.0	40.0094	15.5270	-3.2030
3.5	18.9955	15.0983	-8.2614	11.5	40.6189	14.4145	-3.2077
4.0	37.1462	10.0967	6.3292	12.0	40.2619	15.3682	-3.2833
4.5	28.1136	11.0995	-10.9682	12.5	40.2160	14.5513	-3.2045
5.0	36.1233	15.3883	4.6825	13.0	40.4093	15.1953	-3.2949
5.5	38.6136	11.8670	-6.3179	13.5	40.1067	14.6898	-3.2271
6.0	34.7080	16.5269	1.8048	14.0	40.2892	15.0633	-3.2882
6.5	41.6216	13.0332	-2.2990	14.5	40.1868	14.7898	-3.2591
7.0	38.0510	16.3724	0.0985	15.0	40.1371	14.9831	-3.2797
7.5	39.8561	13.7540	-0.0444				



Gambar 12 Perbandingan Sudut Rotor Generator 26 Pembebanan 100%

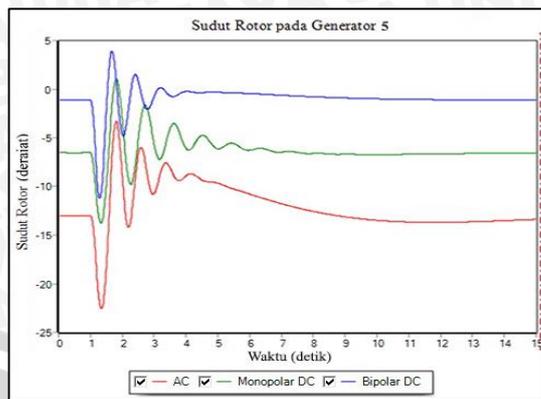
Dapat kita lihat pada Gambar 12, transmisi HVDC jenis Bipolar memiliki sudut penyimpangan yang paling kecil dibanding dengan yang lain, yaitu senilai 0.3944°. Sedangkan transmisi HVDC jenis Monopolar memiliki sudut penyimpangan kedua terkecil, senilai 14.9003°. Sudut penyimpangan terbesar dialami oleh saluran transmisi AC senilai 40.1386°. Puncak Sudut Rotor terendah terjadi pada saluran transmisi HVDC jenis Bipolar, yakni senilai 51.8514°. Puncak Sudut Rotor urutan kedua, terjadi pada saluran HVDC jenis Monopolar, yakni senilai 76.7310°. Sedangkan saluran transmisi AC menjadi saluran yang memiliki puncak sudut rotor tertinggi, yakni senilai 100.5043°.

Tabel 8. Perbandingan sudut awal dan puncak sudut rotor Generator 1

Saluran Transmisi	AC	Monopolar HVDC	Bipolar HVDC
Sudut awal	40.1386°	14.9003°	0.3944°
Puncak Sudut Rotor	100.5043°	76.7310°	51.8514°

Tabel 9. Perbandingan Sudut Rotor Generator 11 Pembebanan 100%

t (detik)	Jenis Saluran			t (detik)	Jenis Saluran		
	AC	Monopolar HVDC	Bipolar HVDC		AC	Monopolar HVDC	Bipolar HVDC
0.0	-12.9759	-6.5283	-1.1205	8.0	-12.5643	-6.6040	-0.7787
1	-12.9759	-6.5271	-1.1176	8.5	-12.8726	-6.6590	-0.8445
1.3	-22.5534	-13.7481	-11.2312	9.0	-13.1301	-6.6840	-0.9010
1.5	-17.7208	-9.3924	-2.1118	9.5	-13.3262	-6.7128	-0.9474
2.0	-9.4329	-3.5078	-4.6796	10.0	-13.4772	-6.7054	-0.9858
2.5	-6.5939	-4.9688	0.9086	10.5	-13.5836	-6.7069	-1.0175
3.0	-10.6971	-5.8057	-0.7600	11.1	-13.6581	-6.6802	-1.0482
3.5	-8.1354	-3.9612	-0.6737	11.5	-13.6813	-6.6671	-1.0654
4.0	-8.8928	-6.1078	-0.2255	12.0	-13.6838	-6.6432	-1.0813
4.5	-9.3445	-4.7272	-0.3497	12.5	-13.6619	-6.6209	-1.0945
5.0	-9.6650	-6.1283	-0.3174	13.0	-13.6230	-6.5955	-1.1048
5.5	-10.2662	-5.5829	-0.3700	13.5	-13.5704	-6.5761	-1.1127
6.0	-10.7904	-6.2709	-0.4453	14.0	-13.5089	-6.5574	-1.1183
6.5	-11.3012	-6.1648	-0.5302	14.5	-13.4424	-6.5418	-1.1238
7.0	-11.7808	-6.4564	-0.6205	15.0	-13.3758	-6.5287	-1.1258
7.5	-12.1982	-6.4974	-0.7048				



Gambar 13 Perbandingan Sudut Rotor Generator 11 Pembebanan 100%

Dapat kita lihat pada Gambar 13, transmisi HVDC jenis Bipolar memiliki sudut penyimpangan yang paling kecil dibanding dengan yang lain, yaitu senilai -3.5128°. Sedangkan transmisi HVDC jenis Monopolar memiliki sudut penyimpangan kedua terkecil, senilai -7.0223°. Sudut penyimpangan terbesar dialami oleh saluran transmisi AC senilai -9.1589°. Puncak Sudut Rotor terendah terjadi pada saluran transmisi HVDC jenis Bipolar, yakni senilai -11.0378°. Puncak Sudut Rotor urutan kedua, terjadi pada saluran HVDC jenis Monopolar, yakni senilai -18.3962°. Sedangkan saluran transmisi AC menjadi saluran yang memiliki puncak sudut rotor tertinggi, yakni senilai -30.0778°.

Tabel 10 Perbandingan sudut awal dan puncak sudut rotor Generator 5

Saluran Transmisi	AC	Monopolar HVDC	Bipolar HVDC
Sudut awal	-9.1589°	-7.0223°	-3.5128°
Puncak Sudut Rotor	-30.0778°	-18.3962°	-11.0378°

C. Sistem Transmisi Jawa Bali 500 kV Pembebanan 70%

a. Saluran AC Simulasi Aliran Daya

Simulasi aliran daya dilakukan untuk mengetahui kondisi awal sistem sebelum dilakukan analisis kestabilan transien sistem tenaga listrik. Simulasi aliran daya dilakukan menggunakan metode *Newton Rhapson*. Berikut ini hasil simulasi aliran daya yang ditunjukkan pada Tabel 11.

Tabel 11. Hasil Simulasi Aliran Daya Saluran AC Pembebanan 70%

No. Bus	Tegangan		Beban		Generator	
	Magnitude	Derajat	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)
1	1	-11.86	60.2	23.8	0	0
2	1	-11.86	99.4	-39.2	2073.4	293.0672
3	0.9997	-12.12	224	-97.3	0	0
4	0.9765	-16.24	473.2	149.1	0	0
5	0.9799	-15.78	508.9	32.9	0	0
6	0.9847	-14.4	445.2	177.1	0	0
7	0.9841	-15.64	331.1	245	0	0
8	0.9868	-16.58	240.1	67.9	0	0
9	0.9841	-16.88	767.9	55.3	0	0
10	0.9803	-15.75	375.2	116.2	0	0
11	1	-14.99	0	0	945.7	606.2841
12	0.995	-15.29	466.2	324.1	0	0
13	1	-14.93	455	189	255.5	402.5654
14	1	-14.55	0	0	452.9	731.2488
15	0.9597	-12.78	95.9	33.6	0	0
16	0.9907	-13.94	353.5	227.5	0	0
17	0.9823	-10.7	-237.3	2.1	0	0
18	1	-0.01	266	67.2	1669.5	422.9326
19	0.9691	-6.16	586.6	267.4	0	0
20	0.9489	-8.43	441.7	301	0	0
21	0.9853	-5.12	183.4	30.1	0	0
22	0.9924	-4.25	688.1	449.4	0	0
23	1	-4.05	102.2	14.7	413	547.7052
24	1	-2.3	301	143.5	227.5	350.377
25	0.961	-5.56	423.5	137.9	0	0
26	1	0	415.1	100.8	2094.614	345.6255
Total					8132	3700

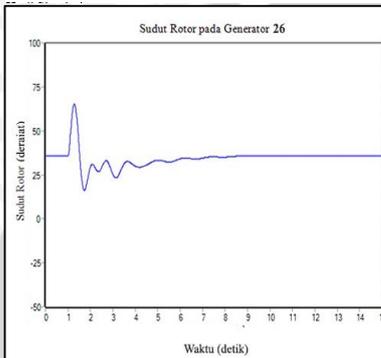
Simulasi Kestabilan Peralihan

Simulasi kestabilan peralihan dimulai dari detik ke-0, waktu gangguan 0.1 detik pada detik ke 1. Gangguan terjadi pada bus 26 dengan acuan generator 1. Untuk menganalisis kestabilan transien, gangguan yang akan disimulasikan adalah gangguan

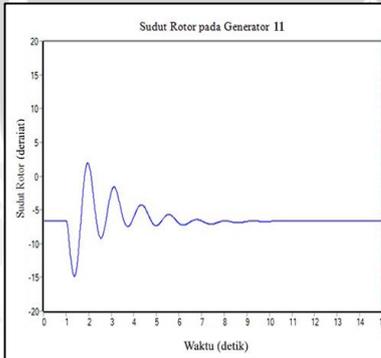
tiga fasa ke tanah pada sistem tenaga listrik [6]. Data yang ditampilkan berupa data grafik perubahan sudut rotor (δ) terhadap waktu. Untuk saluran Transmisi HVDC, pemasangannya menghubungkan antara bus 24 dan 26. Berikut ini simulasi pada Sistem Transmisi Jawa Bali 500 kV Saluran AC pembebanan 70% :

Tabel 12. Sudut Rotor Generator 26 dan 11 Saluran AC Pembebanan 70 %

t (detik)	Gen 26 (derajat)	Gen 11 (derajat)	t (detik)	Gen 26 (derajat)	Gen 11 (derajat)
0.0	35.7727	-6.6275	8.0	35.0758	-6.6165
1.0	35.7727	-6.6275	8.5	35.5873	-6.8924
1.3	65.28109	-14.7999	9.0	35.5870	-6.7078
1.5	37.1438	-12.1945	9.5	35.7290	-6.6731
2.0	30.0411	1.6231	10.0	35.8734	-6.7106
2.5	29.6419	-9.1240	10.5	35.8416	-6.5877
3.0	24.7999	-2.1163	11.0	35.9577	-6.6466
3.5	31.5576	-6.1278	11.5	35.9284	-6.5889
4.0	29.8219	-3.8678	12.0	35.9528	-6.5963
4.5	30.6088	-4.7978	12.5	35.9577	-6.6047
5.0	33.3466	-7.3419	13.0	35.9308	-6.5883
5.5	32.2743	-5.6761	13.5	35.9371	-6.6117
6.0	34.1768	-7.0226	14.0	35.9069	-6.6044
6.5	34.1787	-6.7610	14.5	35.8962	-6.6157
7.0	34.5383	-6.6322	15.0	35.8780	-6.6211
7.5	35.2142	-7.0769			



Gambar 14 Sudut Rotor Generator 26 Saluran AC Pembebanan 70%



Gambar 15 Sudut Rotor Generator 11 Saluran AC Pembebanan 70%

Pada Gambar 14, ketika awal sistem di jalankan, sistem berjalan stabil. Sudut rotor generator 26 pada mulanya mengalami penyimpang senilai 35.7727° terhadap sumbu tetapnya. Sesaat setelah diberi gangguan pada bus 26, sudut rotor generator 26 mengalami kenaikan hingga 65.2810° . Sistem kembali stabil setelah mencapai detik ke-9. Pada Gambar 15, ketika awal sistem di jalankan, sistem berjalan stabil. Sudut rotor generator 11 pada mulanya mengalami penyimpang senilai -6.6275° terhadap sumbu tetapnya. Sesaat setelah diberi gangguan pada bus 26, Sudut Rotor Generator 11 mengalami kenaikan hingga -14.7999° . Sistem kembali stabil setelah mencapai detik ke-10.

b. Saluran Monopolar HVDC Simulasi Aliran Daya

Simulasi aliran daya dilakukan untuk mengetahui kondisi awal sistem sebelum dilakukan analisis kestabilan transien sistem tenaga listrik. Simulasi aliran daya dilakukan menggunakan metode *Newton Rhapson*. Berikut ini hasil simulasi aliran daya yang ditunjukkan pada Tabel 13:

Tabel 13. Hasil Simulasi Aliran Daya Saluran Monopolar Pembebanan 70%

No. Bus	Tegangan		Beban		Generator	
	Magnitudo	Derajat	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)
1	1	-11.81	60.2	23.8	0	0
2	1	-11.8	99.4	-39.2	2073.4	293.0343
3	0.9997	-12.06	224	-97.3	0	0
4	0.9765	-16.19	473.2	149.1	0	0
5	0.9799	-15.72	508.9	32.9	0	0
6	0.9847	-14.35	445.2	177.1	0	0
7	0.9841	-15.59	331.1	245	0	0
8	0.9868	-16.52	240.1	67.9	0	0
9	0.9841	-16.83	767.9	55.3	0	0
10	0.9803	-15.69	375.2	116.2	0	0
11	1	-14.94	0	0	945.7	909.9274
12	0.995	-15.24	466.2	324.1	0	0
13	1	-14.87	455	189	255.5	577.8687
14	1	-14.5	0	0	452.9	1144.4590
15	0.9597	-12.73	95.9	33.6	0	0
16	0.9907	-13.88	353.5	227.5	0	0
17	0.9823	-10.64	-237.3	2.1	0	0
18	1	0.05	266	67.2	1669.5	723.9705
19	0.9691	-6.1	586.6	267.4	0	0
20	0.9489	-8.38	441.7	301	0	0
21	0.9853	-5.03	183.4	30.1	0	0
22	0.9924	-4.16	688.1	449.4	0	0
23	1	-3.96	102.2	14.7	413	824.1741
24	1	-2.2	301	143.5	227.5	3893.5150
25	0.961	-5.53	423.5	137.9	0	0
26	1	0	415.1	100.8	2092.083	3256.2430
27	0.9996	0	0	0	0	0
28	1	-2.2	0	0	0	0
Total					8129.583	11623.192

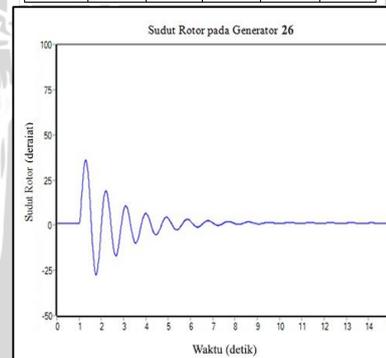
Sumber : Hasil Simulasi

Simulasi Kestabilan Peralihan

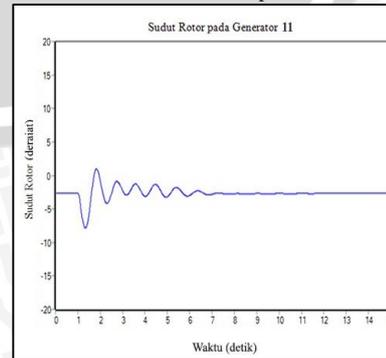
Simulasi kestabilan peralihan menggunakan perlakuan yang sama pada semua jenis saluran transmisi. Berikut ini simulasi pada Sistem Transmisi Jawa Bali 500 kV pembebanan 70% :

Tabel 14. Sudut Rotor Generator 26 dan 11 Monopolar HVDC Pembebanan 70 %

t (detik)	Gen 26 (derajat)	Gen 11 (derajat)	t (detik)	Gen 26 (derajat)	Gen 11 (derajat)
0.0	1.1974	-2.6853	8.0	0.8069	-2.7170
1.0	1.1993	-2.6875	8.5	1.6638	-2.8069
1.3	36.0307	-7.8455	9.0	0.7660	-2.6823
1.5	7.1777	-5.1798	9.5	1.6223	-2.7994
2.0	3.0324	-1.1042	10.0	0.9154	-2.6666
2.5	-10.1266	-2.4689	10.5	1.4417	-2.7522
3.0	9.1337	-2.4009	11.0	1.0961	-2.6660
3.5	-9.7579	-1.3447	11.5	1.3009	-2.7027
4.0	6.5522	-3.1148	12.0	1.1892	-2.6674
4.5	-4.9596	-1.3603	12.5	1.2301	-2.6705
5.0	3.8354	-3.1639	13.0	1.2348	-2.6680
5.5	-1.5909	-1.9343	13.5	1.2024	-2.6596
6.0	2.2194	-2.9570	14.0	1.2447	-2.6654
6.5	0.2813	-2.4425	14.5	1.1892	-2.6576
7.0	1.2689	-2.7976	15.0	1.2410	-2.6666
7.5	1.3024	-2.7174			



Gambar 16 Sudut Rotor Generator 26 Monopolar HVDC Pembebanan 70%



Gambar 17 Sudut Rotor Generator 11 Monopolar HVDC Pembebanan 70%

Pada Gambar 16, ketika awal sistem di jalankan, sistem berjalan stabil. Sudut rotor generator 26 pada mulanya

mengalami penyimpang senilai 1.1974° terhadap sumbu tetapnya. Sesaat setelah diberi gangguan pada bus 26, sudut rotor generator 26 mengalami kenaikan hingga 36.0307° . Sistem kembali stabil setelah mencapai detik ke-10. Pada Gambar 17, ketika awal sistem di jalankan, sistem berjalan stabil. Sudut rotor generator 11 pada mulanya mengalami penyimpang senilai -2.6853° terhadap sumbu tetapnya. Sesaat setelah diberi gangguan pada bus 26, Sudut Rotor Generator 11 mengalami kenaikan hingga -7.8455° . Sistem kembali stabil setelah mencapai detik ke-8.

c. Saluran Bipolar HVDC
Simulasi Aliran Daya

Simulasi aliran daya dilakukan untuk mengetahui kondisi awal sistem sebelum dilakukan analisis kestabilan transien sistem tenaga listrik. Simulasi aliran daya dilakukan menggunakan metode *Newton Rhapson*. Berikut ini hasil simulasi aliran daya yang ditunjukkan pada Tabel 15:

Tabel 15. Hasil Simulasi Aliran Daya Bipolar HVDC Pembebanan 70%

No. Bus	Tegangan		Beban		Generator	
	Magnitude	Derajat	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)
1	1	-11.8	60.2	23.8	0	0
2	1	-11.8	99.4	-39.2	2073.4	293.0315
3	0.9997	-12.06	224	-97.3	0	0
4	0.9765	-16.19	473.2	149.1	0	0
5	0.9799	-15.72	508.9	32.9	0	0
6	0.9847	-14.34	445.2	177.1	0	0
7	0.9841	-15.58	331.1	245	0	0
8	0.9868	-16.52	240.1	67.9	0	0
9	0.9841	-16.82	767.9	55.3	0	0
10	0.9803	-15.69	375.2	116.2	0	0
11	1	-14.93	0	0	945.7	606.2545
12	0.995	-15.25	466.2	324.1	0	0
13	1	-14.87	455	189	255.5	402.5672
14	1	-14.49	0	0	452.9	731.3184
15	0.9597	-12.72	93.9	33.6	0	0
16	0.9907	-13.88	353.5	227.5	0	0
17	0.9823	-10.64	-237.3	-2.1	0	0
18	1	0.05	266	67.2	1669.5	422.9751
19	0.9691	-6.1	586.6	267.4	0	0
20	0.9489	-8.38	441.7	301	0	0
21	0.9853	-5.02	183.4	30.1	0	0
22	0.9924	-4.15	688.1	449.4	0	0
23	1	-3.95	102.2	14.7	413	547.8688
24	1	-2.19	301	143.5	227.5	5255.248
25	0.961	-5.53	423.5	137.9	0	0
26	1	0	415.1	100.8	2091.828	5400.86
27	0.9998	0	0	0	0	0
28	0.9998	-2.19	0	0	0	0
Total					8129.328	13660.124

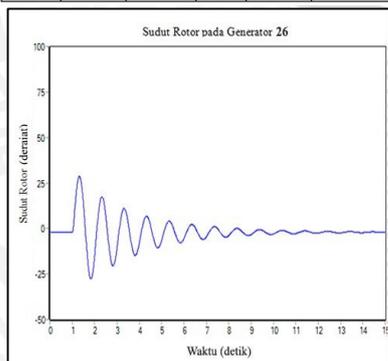
Sumber : Hasil Simulasi

Simulasi Kestabilan Peralihan

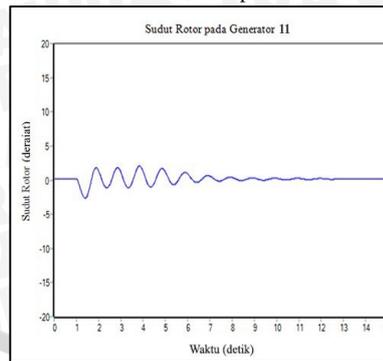
Simulasi kestabilan peralihan menggunakan perlakuan yang sama pada semua jenis saluran transmisi. Berikut ini simulasi pada Sistem Transmisi Jawa Bali 500 kV pembebanan 70%:

Tabel 16. Sudut Rotor Generator 26 dan 11 Bipolar HVDC Pembebanan 70 %

t (detik)	Gen 26 (derajat)	Gen 11 (derajat)	t (detik)	Gen 26 (derajat)	Gen 11 (derajat)
0.0	-2.0514	0.1696	8.0	-3.8246	0.3814
1.0	-2.0604	0.1730	8.5	-0.6181	-0.0249
1.3	28.6934	-2.6270	9.0	-3.3356	0.2943
1.5	12.0159	-2.1381	9.5	-0.9697	0.0072
2.0	-13.7120	1.3284	10.0	-3.0007	0.2691
2.5	5.7483	-0.6196	10.5	-1.2292	0.0370
3.0	-9.7858	1.1035	11.0	-2.7495	0.2563
3.5	2.3491	-0.3371	11.5	-1.4392	0.0736
4.0	-7.2808	1.2096	12.0	-2.5370	0.2407
4.5	1.6693	-0.4403	12.5	-1.6108	0.1102
5.0	-6.4373	1.2262	13.0	-2.3959	0.2185
5.5	0.9964	-0.3991	13.5	-1.7381	0.1407
6.0	-5.4038	0.9415	14.0	-2.2851	0.2080
6.5	0.4059	-0.2466	14.5	-1.8285	0.1563
7.0	-4.5208	0.6014	15.0	-2.2225	0.2033
7.5	-0.1373	-0.1032			



Gambar 18 Sudut Rotor Generator 26 Bipolar HVDC Pembebanan 70%



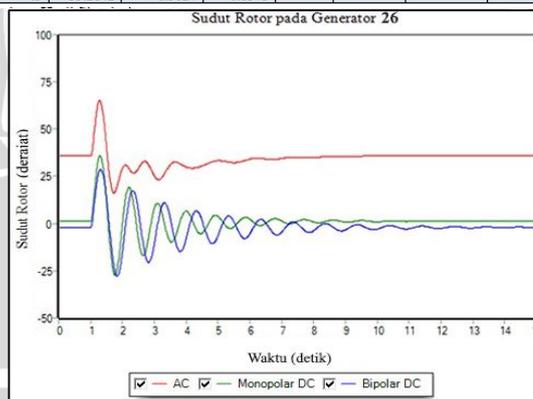
Gambar 19 Sudut Rotor Generator 11 Bipolar HVDC Pembebanan 70%

Pada Gambar 18, ketika awal sistem di jalankan, sistem berjalan stabil. Sudut Rotor Generator 26 pada mulanya mengalami penyimpang senilai -2.0514° terhadap sumbu tetapnya. Sesaat setelah diberi gangguan pada bus 26, Sudut Rotor Generator 26 mengalami kenaikan hingga 28.6934° . Sistem kembali stabil setelah mencapai detik ke-13. Pada Gambar 19, ketika awal sistem di jalankan, sistem berjalan stabil. Sudut Rotor Generator 11 pada mulanya mengalami penyimpang senilai 0.1696° terhadap sumbu tetapnya. Sesaat setelah diberi gangguan pada bus 26, Sudut Rotor Generator 11 mengalami kenaikan hingga -2.6270° . Sistem kembali stabil setelah mencapai detik ke-12.

d. Perbandingan Sudut Rotor

Tabel 17. Perbandingan Sudut Rotor Generator 26 Pembebanan 70%

t (detik)	Jenis Saluran			t (detik)	Jenis Saluran		
	AC	Monopolar HVDC	Bipolar HVDC		AC	Monopolar HVDC	Bipolar HVDC
0.0	35.7727	1.1974	-2.0514	8.0	35.0758	0.8069	-3.8246
1.0	35.7727	1.1993	-2.0604	8.5	35.5873	1.6638	-0.6181
1.3	65.2810	36.0307	28.6934	9.0	35.5870	0.7660	-3.3356
1.5	37.1438	7.1777	12.0159	9.5	35.7290	1.6223	-0.9697
2.0	30.0411	3.0324	-13.7120	10.0	35.8734	0.9134	-3.0007
2.5	29.6419	-10.1266	-5.7483	10.5	35.8416	1.4417	-1.2292
3.0	24.7999	9.1337	-9.7858	11.0	35.9577	1.0961	-2.7495
3.5	31.5576	-9.7579	2.3491	11.5	35.9284	1.3009	-1.4392
4.0	29.8219	6.5522	-7.2808	12.0	35.9528	1.1892	-2.5370
4.5	30.6088	-4.9596	1.6693	12.5	35.9577	1.2301	-1.6108
5.0	33.3466	3.8354	-6.4373	13.0	35.9308	1.2348	-2.3959
5.5	32.2743	-1.5909	0.9964	13.5	35.9371	1.2024	-1.7381
6.0	34.1768	2.2194	-5.4038	14.0	35.9069	1.2447	-2.2851
6.5	34.1787	0.2813	0.4059	14.5	35.8962	1.1892	-1.8285
7.0	34.5383	1.2689	-4.5208	15.0	35.8780	1.2410	-2.2225
7.5	35.2142	1.3024	-0.1373				



Gambar 20. Perbandingan Sudut Rotor Generator 26 Pembebanan 70%

Dapat kita lihat pada Gambar 20, transmisi HVDC jenis Bipolar memiliki sudut penyimpangan yang paling kecil dibanding dengan yang lain, yaitu senilai -2.0514° . Sedangkan transmisi HVDC jenis Monopolar memiliki sudut penyimpangan kedua terkecil, senilai 1.1974° . Sudut penyimpangan terbesar terjadi pada saluran transmisi AC senilai 35.7727° . Puncak Sudut Rotor terendah terjadi pada saluran transmisi HVDC jenis Bipolar, yakni senilai 28.6934° .

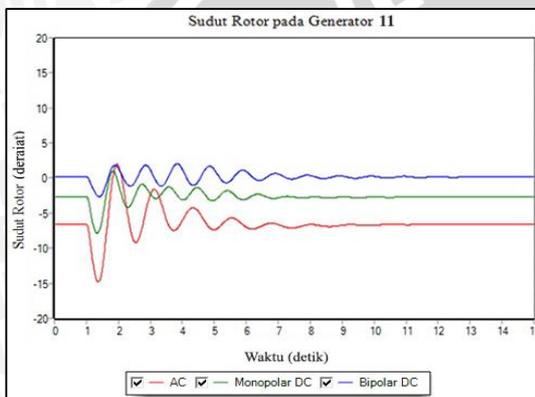
Puncak Sudut Rotor urutan kedua, terjadi pada saluran transmisi HVDC jenis Monopolar, yakni senilai 36.0307°. Sedangkan saluran transmisi AC menjadi saluran yang memiliki puncak sudut rotor tertinggi, yakni senilai 65.2810°.

Tabel 18. Perbandingan sudut awal dan puncak sudut rotor Generator 26

Saluran Transmisi	AC	Monopolar HVDC	Bipolar HVDC
Sudut awal	35.7727°	1.1974°	-2.0514°
Puncak Sudut Rotor	65.2810°	36.0307°	28.6934°

Tabel 19. Perbandingan Sudut Rotor Generator 11 Pembebanan 70%

t (detik)	Jenis Saluran			t (detik)	Jenis Saluran		
	AC	Monopolar HVDC	Bipolar HVDC		AC	Monopolar HVDC	Bipolar HVDC
0.0	-6.6275	-2.6853	0.1696	8.0	-6.6165	-2.7170	0.3814
1.0	-6.6275	-2.6875	0.1730	8.5	-6.8924	-2.8069	-0.0249
1.3	-14.7999	-7.8455	-2.6270	9.0	-6.7078	-2.6823	0.2943
1.5	-12.1945	-5.1798	-2.1381	9.5	-6.6731	-2.7994	0.0072
2.0	1.6231	-1.1042	1.3284	10.0	-6.7106	-2.6666	0.2691
2.5	-9.1240	-2.4689	-0.6196	10.5	-6.5877	-2.7522	0.0370
3.0	-2.1163	-2.4009	1.1035	11.0	-6.6466	-2.6660	0.2563
3.5	-6.1278	-1.3447	-0.3371	11.5	-6.5889	-2.7027	0.0736
4.0	-5.8678	-3.1148	1.2096	12.0	-6.5963	-2.6674	0.2407
4.5	-4.7978	-1.3603	-0.4403	12.5	-6.6047	-2.6705	0.1102
5.0	-7.3419	-3.1639	1.2262	13.0	-6.5883	-2.6680	0.2185
5.5	-5.6761	-1.9343	-0.3991	13.5	-6.6117	-2.6596	0.1407
6.0	-7.0226	-2.9570	0.9415	14.0	-6.6044	-2.6654	0.2080
6.5	-6.7610	-2.4425	-0.2466	14.5	-6.6157	-2.6576	0.1563
7.0	-6.6322	-2.7976	0.6014	15.0	-6.6211	-2.6666	0.2033
7.5	-7.0769	-2.7174	-0.1032				



Gambar 21. Perbandingan Sudut Rotor Generator 11 Pembebanan 70%

Dapat kita lihat pada Gambar , transmisi HVDC jenis Bipolar memiliki sudut penyimpangan yang paling kecil dibanding dengan yang lain, yaitu senilai 0.1696°. Sedangkan transmisi HVDC jenis Monopolar memiliki sudut penyimpangan kedua terkecil, senilai -2.6853°. Sudut penyimpangan terbesar terjadi pada saluran transmisi AC senilai -6.6275°. Puncak Sudut Rotor terendah terjadi pada saluran transmisi HVDC jenis Bipolar, yakni senilai -2.6270°. Puncak Sudut Rotor urutan kedua, terjadi pada saluran transmisi HVDC jenis Monopolar, yakni senilai -7.8455°. Sedangkan saluran transmisi AC menjadi saluran yang memiliki puncak sudut rotor tertinggi, yakni senilai -14.7999°.

Tabel 20. Perbandingan sudut awal dan puncak sudut rotor Generator 5

Saluran Transmisi	AC	Monopolar HVDC	Bipolar HVDC
Sudut awal	-6.6275°	-2.6853°	0.1696°
Puncak Sudut Rotor	-14.7999°	-7.8455°	-2.6270°

V. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil simulasi saluran transmisi HVDC yang telah dilakukan, maka dapat diambil beberapa kesimpulan sebagai berikut:

1. Penggunaan Saluran Transmisi HVDC jenis Bipolar dapat meningkatkan Kestabilan Peralihan pada Sistem Tenaga Listrik.

2. Penggunaan Saluran Transmisi HVDC dapat mengurangi penyimpangan sudut rotor saat awal sistem bekerja. Hal ini dibuktikan melalui simulasi yang telah dilakukan. Sudut rotor awal Generator 26 pada saluran Transmisi HVDC jenis Bipolar senilai 0.3944°, jenis Monopolar senilai 14.9003°, saluran Transmisi AC senilai 40.1386°. Sedangkan sudut rotor awal Generator 11 pada saluran Transmisi HVDC jenis Bipolar senilai -3.5128°, jenis Monopolar senilai -7.0223°, saluran Transmisi AC senilai -9.1589°.
3. Penggunaan Saluran Transmisi HVDC jenis Bipolar dapat mengurangi angka puncak sudut rotor ketika sistem terjadi gangguan. Puncak Sudut Rotor Generator 26 pada saluran Transmisi HVDC jenis Bipolar senilai 51.8514°, jenis Monopolar senilai 76.7310°, saluran Transmisi AC senilai 100.5043°. Sedangkan puncak Sudut Rotor Generator 11 pada saluran Transmisi HVDC jenis Bipolar senilai -11.0378°, jenis Monopolar senilai -18.3962°, saluran Transmisi AC senilai -30.0778°.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] W. Stevenson, Analisis Sistem Tenaga Listrik, Jakarta: Erlangga, 1996.
- [2] S. Sudirham, Analisis Rangkaian Listrik, Bandung: ITB, 2010.
- [3] V. A. N. Behraves, "New Comparison of HVDC and HVAC Transmission," *IJEIR* 1(3), p. 2277 – 5668, 2012.
- [4] T. Gönen, Electrical Power Transmission System Engineering Analysis and Design, California: John Wiley & Sons. Inc., 1988.
- [5] P. Kundur, Power System Stability and Control, California: Mcgraw Hill, Inc, 1994.
- [6] Alsac, O. & Stott, B. 1974. *Optimal Load Flow with Steady State Security*. Manchester: IEEE Transaction On Power Apparatus and System.
- [7] S. S. S. Dandawate, "Analysis of Effect on Transient Stability of Interconnected Power System by Introduction of HVDC Link," *IJERA* 3(3), pp. 1383-1387, 2013.