ANALISIS PENGGUNAAN *HIGH VOLTAGE DIRECT CURRENT* (HVDC) PADA SISTEM TENAGA LISTRIK

Indri Kusuma Dewi.[1], Hadi Suyono,S.T.,M.T.,Ph.D.[2],Ir.Mahfudz Shidiq,M.T.[3]
[1]Mahasiswa Jurusan Teknik Elektro, [2,3]Dosen Jurusan Teknik Elektro, Universitas Brawijaya
Jalan MT Haryono 167, Malang 65145, Indonesia
E-mail: indrikusuma8@gmail.com

ABSTRAK

Tercatat rasio elektrifikasi di Indonesia tahun 2015 mencapai 87%. Untuk meningkatkan rasio elektrifikasi maka dibutuhkan peningkatan sistem tenaga listrik. Salah satu bagian sistem tenaga listrik yang utama adalah transmisi. Permasalahan umum yang terjadi dalam saluran transmisi adalah tegangan. Energi listrik dapat ditransmisikan dan didistribusikan dalam bentuk arus AC (*Alternating Current*) dan DC (*Direct Current*). Pada penelitian ini dikaji perbandingan tegangan dan rugi daya pada sistem dengan transmisi HVAC dan HVDC. Untuk mengetahui nilai tegangan dan rugi daya pada sistem dilakukan analisis aliran daya dengan menggunakan metode Newton Raphson. Konfigurasi saluran transmisi HVDC yang digunakan adalah *monopolar link* dan *bipolar link.* Pengujian penggunaan saluran transmsisi tersebut diterapkan pada sistem standar IEEE 30 Bus dengan kondisi pembebanan 70% dan 100%. Hasil yang didapatkan dengan menggunakan transmisi HVDC pada sistem standar IEEE 30 bus dapat mengurangi rugi daya aktif dan menambah rugi daya reaktif sistem.
Kata Kunci: transmisi HVDC, tegangan, rugi daya

ABSTRACT

Ratio of electrification in Indonesia was reaching 87% in 2015. For increasing the ratio of electrification, it needs upgrading of electrical power system. One of electrical power system parts is transmission. The common problem on transmission is level voltage. Electric power can be transmittted and distributted either by Alternating Current (AC) or Direct Current (DC). This research is studied about comparison between level voltage and power losses in system with HVAC and HVDC transmission. Level voltage and power losses in system are known by doing power flow with Newton Raphson method. Configurations of HVDC transmission are used monopolar link and bipolar link. The research of using HVDC transmission was done in IEEE 30 Bus Standar System and Interconnection Java Bali 500 kV with load condition 70% and 100%. Results that were gotten by using HVDC transmission in IEEE 30 Bus Standar System can decrease active power losses and increase reactive losses.
Keywords: HVDC transmission, voltage, power losses

I. PENDAHULUAN

Kebutuan energi listrik merupakan kebutuhan mutlak dalam kehidupan manusia. Seiring bertambahnya penduduk, maka kebutuhan energi listrik terus meningkat. Tercatat rasio elektrifikasi di Indonesia tahun 2015 mencapai 87 persen. Untuk meningkatkan rasio elektrifikasi, maka dibutuhkan peningkatan sistem tenaga listrik.

Sistem tenaga listrik terdiri dari tiga bagian utama yaitu pembangkit listrik, saluran transmisi dan saluran distribusi.

Dalam sistem tenaga listrik terdapat tiga macam kestabilan,yaitu stabilitas keseimbangan (*steady state*) , transien, dan dinamis. Permasalahan umum yang terjadi dalam stabilitas *steady state* adalah ketidakstabilan level tegangan dan daya. Energi listrik dapat ditransmisikan dan didistribusikan dengan jarak panjang dalam bentuk arus AC (*Alternating Current*) ataupun arus DC (*Direct Current*).

Akibat perkembangan teknologi elektronika daya, sistem HVDC (*High Voltage Direct Current*) dapat digunakan dan menguntungkan untuk transmisi tenaga pada jarak panjang, interkoneksi, dan transmisi kabel bawah laut .

Beberapa keuntungan yang dimiliki HVDC adalah tidak memiliki rugi daya reaktif, tidak ada masalah stabilitas, tidak ada *skin effect* dan efek Ferranti, dimungkinkan untuk dilakukan pengaturan daya. Jika dibandingkan dengan transmisi HVAC, jatuh tegangan dan rugi daya aktif yang ditimbulkan transmisi HVDC lebih kecil. Hal itu disebakan karena pada transmisi HVDC tidak memiliki komponen reaktif. Sedangkan pada transmisi HVAC, terdapat komponen reaktif yang merupakan penyebab utama terjadinya jatuh tegangan. Selain itu, dengan tidak adanya komponen reaktif maka saluran transmisi dapat menyalurkan daya aktif yang lebih besar atau dengan kata lain meningkatkan performansi sistem .

HVDC juga memilki beberapa kekurangan yaitu, adanya harmonisa yang dihasilkan oleh konverter, menghalangi aliran daya reaktif, adanya batasan kapasitas beban lebih, dan konverter menyerap daya reaktif yang besar.

Saat ini saluran transmisi yang digunakan di Indonesia adalah transmisi AC. Saluran transmisi di Indonesia terdiri dari saluran udara, bawah tanah dan bawah laut. Untuk saluran bawah laut digunakan untuk interkoneksi antar pulau, tetapi sementara ini digunakan di Jawa-Bali. Untuk interkoneksi Jawa-Bali digunakan transmisi bawah laut dan udara. Berdasarkan keuntungan yang dimiliki HVDC, maka transmisi HVDC dapat dijadikan alternatif transmisi di Indonesia.

Saat ini telah dibangun transmisi HVDC untuk interkoneksi Jawa Sumatera. Akan tetapi, untuk menerapakan transmisi HVDC ini dibutuhkan biaya yang mahal. Agar didapat performansi yang baik dalam penggunaan transmisi HVDC ini maka perlu diperhatikan konfigurasi sistem tenaga listrik dengan transmsisi HVDC yang tepat.

II. TINJAUAN PUSTAKA

A. Saluran Transmisi

Permasalahan utama yang terjadi pada saluran transmisi adalah tegangan. Oleh karena itu diperlukan standar agar didapat performansi sistem yang baik. Unjuk kerja saluran transmisi telah ditentukan pada aturan jaringan sistem tenaga listrik tahun 2007 oleh Kementrian Energi dan Sumber Daya Mineral Republik Indonesia,yaitu sebagai berikut:

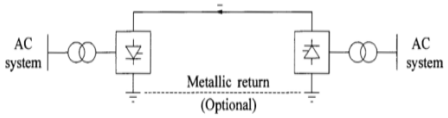
1. Frekuensi nominal 50 Hz,diusahakan untuk tidak lebih rendah dari 49,5 Hz atau lebih tinggi dari 50,5 Hz dan selama waktu keadaan (*emergency*) dan gangguan, frekuensi sistem diizinkan turun hingga 47,5 Hz atau naik hingga 52.0 Hz sebelum unit pembangkit diizinkan keluar dari operasi
2. Tegangan sistem harus dipertahankan dalam batas tertentu dalam keadaan nomal. Untuk tegangan nominal 20 kV,70 kV,dan 150 kV batas atas +5% dan batas bawah -10%. Untuk tegangan nominal 500 kV batas atas +5% dan batas bawah -5%.
3. Faktor daya (cos φ) pada jaringan transmisi minimum sebesar 0,85 *lagging*.

B. Konfigurasi Sistem HVDC

Berdasarkan jumlah konduktor maka *HVDC links* diklasifikasikan menjadi tiga,yaitu sebagai berikut:

a. Monopolar link

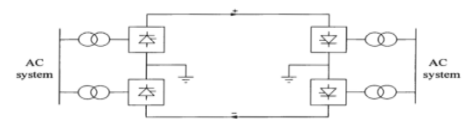
Monopolar link adalah sistem DC *link* yang menggunakan satu konduktor dan memerlukan dua konverter dengan arus balik melalui tanah atau air laut.



Gambar 1 *HVDC Monopolar link*
Sumber : Kundur (1994:465)

b. Bipolar link

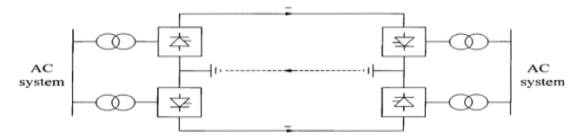
Bipolar link adalah sistem DC *link* yang menggunakan dua konduktor yang mengalirkan tegangan dengan polaritas positif dan polaritas negatif. Setiap terminal pada sistem *bipolar link* memiliki dua konverter yang terhubung seri dan tidak ada arus ke tanah.



Gambar 2 *HVDC Bipolar link*
Sumber: Kundur (1994:465)

c. Homopolar link

Homopolar link adalah sistem DC *link* yang menggunakan dua atau lebih konduktor yang mengalirkan tegangan dengan polaritas sejenis yaitu polaritas positif atau polaritas negatif.



Gambar 3 *HVDC* Homopolar link
Sumber: Kundur (1994:466)

C. Analisis Aliran Daya

Analisis aliran beban atau aliran daya merupakan solusi untuk sistem tenaga dalam kondisi operasi statis. Untuk memudahkan analisis aliran daya maka digunakan sistem per unit. Hal ini ditunjukkan dalam persamaan berikut:

$$\text{Nilai per unit} = \frac{\text{nilai sebenarnya}}{\text{nilai dasar}} \quad (1)$$

Nilai impedansi dasar dapat dinyatakan dengan persamaan

$$\text{Impedansi dasar} = \frac{(\text{kV_dasar_line-netral})2}{MVA_dasar_1\,\emptyset} \quad (2)$$

Dimana kV_dasar_line-netral adalah tegangan dasar saluran ke netral dalam kilo Volt sedangkan MVA_dasar_1Ø adalah daya dasar satu fasa dalam mega volt ampere.

Data-data saluran transmisi yang dibutuhkan yaitu resistansi saluran transmisi (p.u), reaktansi saluran transmisi dalam (p.u), tap trafo (biasanya bernilai 1), dan rating tegangan dalam kilo Volt (kV). Sedangkan data-data bus yang dibutuhkan

adalah besaran tegangan (|V|) dalam p.u, sudut fasa (δ), daya nyata (P), dan daya reaktif (Q). Bus diklasifikasikan menjadi tiga,yaitu:

a. Load bus

Pada bus ini daya nyata dan reaktif permintaan,P_d dan Q_d didapat dari sumber. *Load bus* disebut juga bus PQ.

b. Voltage controlled bus or generator bus

Merupakan bus sembarang pada sistem dimana besaran tegangan dapat dikendalikan. Daya nyata yang dibangkitkan generator dapat divariasikan dengan perubahan masukan penggerak mula. Sehingga pada *generator bus* atau PV bus, daya yang dibangkitkan P_g dan besaran tegangan $|V_g|$ dapat ditetapkan. Pada bus ini daya reaktif Q_g dan δ_g merupakan nilai yang tidak diketahui dan akan dihitung.

c. Slack Bus

Disebut juga *swing bus*, pada bus ini Pg dan Qg tidak diketahui. Pada bus ini ditentukan nilai tegangan,selain itu juga ditentukan nilai sudut fasa. Biasanya sudut fasa diberi nilai 0º , tegangan bus dihitung dengan mengacu pada tegangan bus ini.

D. Solusi Aliran Daya Newton Raphson

Pada suatu sistem tenaga,arus yang memasuki bus dapat ditulis ulang dalam bentuk matriks admitansi seperti persamaan berikut

$$Ii = \sum_{j=1}^{n} Yij\ Vj \quad (3)$$

Persamaan daya kompleks pada bus *i* adalah

$$P_i - jQ_i = V_i{}^* I_i \quad (4)$$

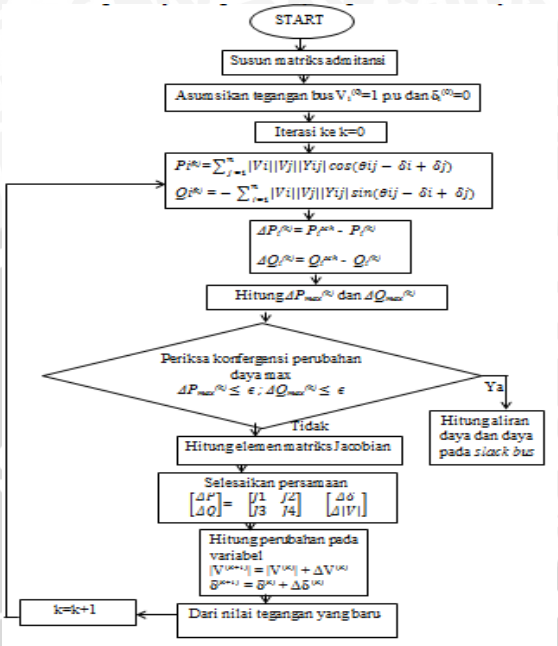
$$Pi = \sum_{j=1}^{n} |Vi||Vj||Yij|\ cos(\theta ij - \delta i + \delta j) \quad (5)$$

$$Qi = -\sum_{j=1}^{n} |Vi||Vj||Yij|\ sin(\theta ij - \delta i + \delta j) \quad (6)$$

Dengan menjabarkan persamaan (5) dan (6) maka didapatkan persamaan dalam bentuk matriks,yaitu:

$$\begin{bmatrix} \Delta P_2^{(k)} \\ \vdots \\ \Delta P_n^{(k)} \\ \hline \Delta Q_2^{(k)} \\ \vdots \\ \Delta Q_n^{(k)} \end{bmatrix} = \left[\begin{array}{ccc|ccc} \frac{\partial P_2}{\partial \delta_2}^{(k)} & \cdots & \frac{\partial P_2}{\partial \delta_n}^{(k)} & \frac{\partial P_2}{\partial |V_2|}^{(k)} & \cdots & \frac{\partial P_2}{\partial |V_n|}^{(k)} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial P_n}{\partial \delta_2}^{(k)} & \cdots & \frac{\partial P_n}{\partial \delta_n}^{(k)} & \frac{\partial P_n}{\partial |V_2|}^{(k)} & \cdots & \frac{\partial P_n}{\partial |V_n|}^{(k)} \\ \hline \frac{\partial Q_2}{\partial \delta_2}^{(k)} & \cdots & \frac{\partial Q_2}{\partial \delta_n}^{(k)} & \frac{\partial Q_2}{\partial |V_2|}^{(k)} & \cdots & \frac{\partial Q_2}{\partial |V_n|}^{(k)} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial Q_n}{\partial \delta_2}^{(k)} & \cdots & \frac{\partial Q_n}{\partial \delta_n}^{(k)} & \frac{\partial Q_n}{\partial |V_2|}^{(k)} & \cdots & \frac{\partial Q_n}{\partial |V_n|}^{(k)} \end{array}\right] \begin{bmatrix} \Delta \delta_2^{(k)} \\ \vdots \\ \Delta \delta_n^{(k)} \\ \hline \Delta |V_2^{(k)}| \\ \vdots \\ \Delta |V_n^{(k)}| \end{bmatrix}$$

Berikut ini diagram alir perhitungan aliran daya dengan metode Newton Raphson



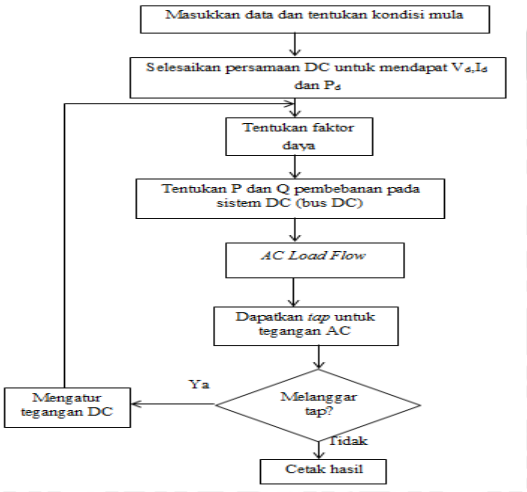
Gambar 4 *Flowchart* Perhitungan Aliran Daya dengan Metode Newton Raphson
Sumber:Murty (2007:114)

E.Metode Analisis Aliran Daya Sistem AC-DC

Terdapat dua metode untuk melakukan analisis aliran daya sistem AC-DC, yaitu

a. Metode Sekuensial (*Sequensial Method)*

Pada metode ini persamaan AC dan DC diselesaikan secara terpisah. Berikut diagram alir analisis aliran daya sistem AC-DC metode sekuensial



Gambar 5 *Flowchart* Analisis Aliran Daya Sistem AC-DC Metode Sekuensial

b. Metode Kesatuan (*Unified Method*)

Pada metode ini variabel AC dan DC digabungkan. Ada dua macam cara pada

metode ini yaitu *extended variable* dan *variable elimination*. Dengan menggunakan metode *extended variable* ada perubahan pada matriksnya,yaitu

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \\ \Delta R \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P}{\partial \delta} & \frac{\partial P}{\partial V/V} & \frac{\partial P}{\partial Xdc} \\ \frac{\partial Q}{\partial \delta} & \frac{\partial Q}{\partial V/V} & \frac{\partial Q}{\partial Xdc} \\ \frac{\partial R}{\partial \delta} & \frac{\partial R}{\partial V/V} & \frac{\partial R}{\partial Xdc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\delta \\ \Delta V/V \\ \Delta Xdc \end{bmatrix} \quad (7)$$

Sedangkan untuk metode *variable elimination* matriks di atas direduksi sehingga menjadi matriks berorde 2 x 2 atau dengan kata lain variabel DC telah dieliminasi.

III METODE PENELITIAN

Metodologi yang digunakan untuk pembahasan dalam skripsi ini yaitu sebagai berikut:

A.Studi Literatur

Studi literatur adalah memahami konsep tentang analisis aliran daya listrik dengan metode Newton Raphson, transmisi *High Voltage Direct Current* (HVDC), serta perangkat lunak untuk menyelesaikan analisis aliran daya yaitu PSSE.

B. Pengambilan Data

Data yang digunakan adalah data sistem standar IEEE 30 bus dan data sistem tenaga listrik Jawa Bali 500 kV.

C. Analisis Aliran Daya

Menggunakan metode Newton Raphson, tujuannya untuk mengetahui level tegangan dan rugi daya pada tiap bus. Dilakukan pada sistem dengan transmisi AC dan terintegrasi AC-DC.

D.Pemodelan Transmisi HVAC ke Dalam Transmisi HVDC

Pada penelitian ini digunakan transmisi DC dengan konfigurasi *monopolar link* dan *bipolar link*.

E. Analisis Hasil Simulasi

Setelah dilakukan analisis aliran daya pada sistem tenaga listrik dengan transmisi HVAC dan HVDC maka langkah selanjutnya adalah dilakukan analisis hasil perhitungan untuk menjawab rumusan masalah:

1. Bagaimana perbandingan jatuh tegangan dan rugi daya antara sistem tenaga listrik yang menggunakan transmisi HVDC dengan HVAC
2. Bagaimana perbandingan performansi antara transmisi HVAC dan HVDC

IV ANALISIS DAN PEMBAHASAN

Pada bab ini ditunjukkan hasil simulasi load flow pada sistem standar IEEE 30 bus dengan transmisi HVAC dan HVDC dengan kondisi pembebanan 100% dan 70%.

A. Sistem Standar IEEE 30 Bus

Data sistem standar IEEE 30 bus ini merupakan data validasi. Sumber data sistem standar IEEE 30 bus berasal dari jurnal *Optimal Load Flow with Steady State Security*.

Gambar 6 *Single Line Diagram* Sistem Tenaga Listrik Jawa Bali 500kV

Data saluran antar bus ditunjukkan pada Tabel 1. Resistansi (R), reaktansi (X) dan suseptansi (B) ditunjukkan dalam p.u.

Tabel 1. Data Saluran Sistem Standar IEEE 30 Bus

No. Saluran	Bus Awal	Bus Tujuan	R (p.u)	X (p.u)	1/2 B (p.u)
1	1	2	0,0192	0,0575	0,0264
2	1	3	0,0452	0,1652	0,0204
3	2	4	0,0570	0,1737	0,0184
4	2	5	0,0472	0,1983	0,0209
5	2	6	0,0581	0,1763	0,0187
6	3	4	0,0132	0,0379	0,0042
7	4	6	0,0119	0,0414	0,0045
8	4	12	0,0000	0,2560	0,0000
9	5	7	0,0460	0,1160	0,0102
10	6	7	0,0267	0,0820	0,0085
11	6	8	0,0120	0,0420	0,0045
12	6	9	0,0000	0,2080	0,0000
13	6	10	0,0000	0,5560	0,0000
14	6	28	0,0169	0,0599	0,0065
15	8	28	0,0636	0,2000	0,0214
16	9	11	0,0000	0,2080	0,0000
17	9	10	0,0000	0,1100	0,0000
18	10	20	0,0936	0,2090	0,0000
19	10	17	0,0324	0,0845	0,0000
20	10	21	0,0348	0,0749	0,0000
21	10	22	0,0727	0,1499	0,0000
22	12	13	0,0000	0,1400	0,0000
23	12	14	0,1231	0,2599	0,0000
24	12	15	0,0662	0,1304	0,0000
25	12	16	0,0945	0,1987	0,0000
26	14	15	0,2210	0,1997	0,0000
27	15	18	0,1073	0,2185	0,0000
28	15	23	0,1000	0,2020	0,0000
29	16	17	0,0524	0,1923	0,0000
30	18	19	0,0639	0,1292	0,0000
31	19	20	0,0340	0,0680	0,0000
32	21	22	0,0116	0,0236	0,0000
33	22	24	0,1150	0,1790	0,0000
34	23	24	0,1320	0,2700	0,0000
35	24	25	0,1885	0,3292	0,0000
36	25	26	0,2544	0,3800	0,0000
37	25	27	0,1093	0,2087	0,0000
38	27	29	0,2198	0,4153	0,0000
39	27	30	0,3202	0,6027	0,0000
40	28	27	0,0000	0,3960	0,0000
41	29	30	0,2399	0,4533	0,0000

Pada tabel 2 ditunjukkan tipe bus. Kode bus 1 (*slack bus*), kode bus (PV bus), dan kode bus bus 0 (*load* bus).

Tabel 2. Data Pembebanan Sistem Standar IEEE 30 Bus

No. Bus	Tipe Bus	Tegangan		Beban 100%		Beban 70%	
		Magnitude	Derajat	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)
1	1	1,025	0,000	0,000	0,000	0	0
2	2	1,025	0,000	21,700	12,700	15,19	8,89
3	0	1,000	0,000	2,400	1,200	1,68	0,84
4	0	1,000	0,000	7,600	1,600	5,32	1,12
5	2	1,010	0,000	94,200	19,000	65,94	13,3
6	0	1,000	0,000	0,000	0,000	0	0,0
7	0	1,000	0,000	22,800	10,900	15,96	7,63
8	2	1,010	0,000	30,000	30,000	21	21
9	0	1,000	0,000	0,000	0,000	0	0
10	0	1,000	0,000	5,8	2,000	4,06	1,4
11	2	1,025	0,000	0,000	0,000	0	0
12	0	1,000	0,000	11,200	7,500	7,84	5,25
13	2	1,025	0,000	0,000	0,000	0	0
14	0	1,000	0,000	6,200	1,600	4,34	1,12
15	0	1,000	0,000	8,200	2,500	5,74	1,75
16	0	1,000	0,000	3,500	1,800	2,45	1,26
17	0	1,000	0,000	9,000	5,800	6,3	4,06
18	0	1,000	0,000	3,200	0,900	2,24	0,63
19	0	1,000	0,000	9,500	3,400	6,65	2,38
20	0	1,000	0,000	2,200	0,700	1,54	0,49
21	0	1,000	0,000	17,5	11,200	12,25	7,84
22	0	1,000	0,000	0,000	0,000	0	0
23	0	1,000	0,000	3,200	1,600	2,24	1,12
24	0	1,000	0,000	8,700	6,700	6,09	4,69
25	0	1,000	0,000	0,000	0,000	0	0
26	0	1,000	0,000	3,500	2,300	2,45	1,61
27	0	1,000	0,000	0,000	0,000	0	0
28	0	1,000	0,000	0,000	0,000	0	0
29	0	1,000	0,000	2,4	0,900	1,68	0,63
30	0	1,000	0,000	10,600	1,900	7,42	1,33

B. Pembebanan 100%

Penyelesaian analisis aliran daya dengan metode Newton Raphson didasarkan pada:

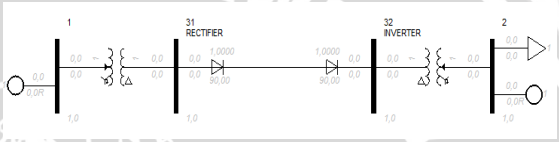
a. Base daya (MVA_{base}) = 100 MVA
b. Base tegangan (kV_{base})= 132/33 kV
c. Akurasi = 0,00001
d. Batas iterasi metode Newton Raphson adalah 20

Tabel 3 Hasil Simulasi Sistem Standar IEEE 30 Bus Sebelum Penggunaan Transmisi HVDC

No. Bus	Tegangan		Beban		Generator	
	Magnitude	Derajat	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)
1	1,0106	3,1	0	0	140	-20
2	1,0250	0	21,7	12,7	42,3207	-4,9846
3	1,0058	-1,6	2,4	1,2	0	0
4	1,0046	-2,65	7,6	1,6	0	0
5	1,0000	-6,22	94,2	19,0	35	44,7915
6	0,9968	-3,83	0	0,0	0	0
7	0,9897	-5,34	22,8	10,9	0	0
8	1,0000	-4,09	30	30	24,5	41,5107
9	0,9889	-6,43	0	0	0	0
10	1,0013	-7,23	5,8	2	0	0
11	1,0000	-7,84	0	0	21	31,9521
12	0,9909	-7,03	11,2	7,5	0	0
13	0,9952	-3,84	0	0	28	44,7
14	0,9772	-7,95	6,2	1,6	0	0
15	0,9751	-8	8,2	2,5	0	0
16	0,9879	-7,46	3,5	1,8	0	0
17	0,9917	-7,52	9	5,8	0	0
18	0,9721	-8,52	3,2	0,9	0	0
19	0,972	-8,58	9,5	3,4	0	0
20	0,9785	-8,3	2,2	0,7	0	0
21	0,9860	-7,76	17,5	11,2	0	0
22	0,9858	-7,76	0	0	0	0
23	0,9663	-8,29	3,2	1,6	0	0
24	0,9635	-8,29	8,7	6,7	0	0
25	0,9609	-8,37	0	0	0	0
26	0,9421	-8,84	3,5	2,3	0	0
27	0,9685	-8,12	0	0	0	0
28	0,9929	-4,28	0	0	0	0
29	0,9474	-9,5	2,4	0,9	0	0
30	0,9353	-10,49	10,6	1,9	0	0
Total			283,4	126,2	290,8207	137,9697

Dari Tabel 3 ditunjukkan daya pembangkitan generator sebesar 290,8207 MW dan 137,9697 MVAR dengan daya *charging* sebesar 16,5 MVAR. Sedangkan nilai tegangan tiap bus berkisar pada nilai 0,9353 hingga 1,0250 p.u. Batas nilai tegangan yang diperbolehkan 1±5% , sehingga bus yang tidak sesuai batasan adalah bus 26, 29, dan 30.

Selanjutnya, saluran transmisi AC yang semula menghubungkan bus 1 ke 2 diganti dengan saluran transmisi DC dengan konfigurasi *monopolar link*. Dalam rancangan ini ditambahkan dua bus yaitu, bus 31 (*rectifier*) dan bus 32 (*inverter*). Kedua bus tersebut memiliki level tegangan 350 kV, tegangan masukan *rectifier* diambil dari tegangan jaringan yang telah dinaikkan terlebih dahulu oleh trafo (132/350 kV). Tegangan pada saluran transmisi DC adalah 500 kV, untuk mendapatkan tegangan tersebut dengan mengatur sudut penyalaan (α) pada *rectifier*.



Gambar 7 Konfigurasi Saluran HVDC *Monopolar Link* dari Bus 1 ke Bus 2

Tabel 4 Parameter Transmisi DC Konfigurasi *Monopolar Link* pada Sistem Standar IEEE 30 Bus

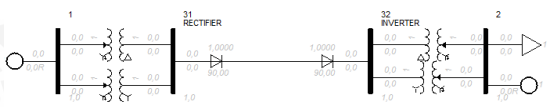
	Rectifier	Inverter
Bus	31	32
Reaktansi komutasi	0,002 Ω	0,002 Ω
Sudut kontrol minimum	66,4824°	66,4829°
Sudut kontrol maksimum	67,7233°	67,7239°
Regulasi transformator	0,51	0,51
Resistansi saluran DC	0,016 Ω	
Set value	330 MW	

Tabel 5 Hasil Simulasi Sistem Standar IEEE 30 Bus Setelah Adanya Transmisi HVDC dengan Konfigurasi *Monopolar Link*

No. Bus	Tegangan		Beban		Generator	
	Magnitude	Derajat	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)
1	1,0000	3,26	0	0	140	78,1717
2	1,0250	0	21,7	12,7	40,9377	72,1544
3	1,0100	-1,7	2,4	1,2	0	0
4	1,0124	-2,8	7,6	1,6	0	0
5	1,0000	-6,2	94,2	19	35	43,2538
6	0,9997	-3,87	0	0	0	0
7	0,9915	-5,36	22,8	10,9	0	0
8	1,0000	-4,09	30	30	24,5	33,2079
9	0,9919	-6,39	0	0	0	0
10	1,0014	-7,15	5,8	2	0	0
11	1,0000	-7,74	0	0	21	26,0639
12	1,0033	-7,17	11,2	7,5	0	0
13	1,0000	-3,99	0	0	28	75,4315
14	0,9881	-8,06	6,2	1,6	0	0
15	0,9844	-8,07	8,2	2,5	0	0
16	0,9951	-7,47	3,5	1,8	0	0
17	0,9940	-7,48	9	5,8	0	0
18	0,9776	-8,54	3,2	0,9	0	0
19	0,9770	-8,54	9,5	3,4	0	0
20	0,9823	-8,25	2,2	0,7	0	0
21	0,9866	-7,69	17,5	11,2	0	0
22	0,9866	-7,69	0	0	0	0
23	0,9730	-8,32	3,2	1,6	0	0
24	0,9666	-8,27	8,7	6,7	0	0
25	0,9638	-8,36	0	0	0	0
26	0,9451	-8,82	3,5	2,3	0	0
27	0,9712	-8,12	0	0	0	0
28	0,9952	-4,31	0	0	0	0
29	0,9502	-9,49	2,4	0,9	0	0
30	0,9380	-10,47	10,6	1,9	0	0
31	0,9999	3,25	0	0	0	0
32	0,9999	0,01	0	0	0	0
Total			283,4	126,2	289,4377	328,2832

Dalam Tabel 5 ditunjukkan nilai daya beban sebesar 283,4 MW dan 126,2 MVAR dengan daya pembangkitan generator dan *slack bus* sebesar 289,4377 MW dan 328,2832 MVAR. Sedangkan nilai tegangan tiap bus berkisar antara 0,9380 p.u hingga 1,0250 p.u.

Selanjutnya digunakan transmisi HVDC dengan konfigurasi *bipolar link*. Rancangan ini masih tetap mengganti saluran yang menghubungkan antara bus 1 dan bus 2 dengan saluran DC. Pada rancangan ini digunakan konfigurasi bipolar link dengan 2 jembatan penyearah yang disusun seri sehingga digunakan 2 buah transformator.



Gambar 8 Konfigurasi Saluran HVDC *Bipolar Link* dari Bus 1 ke Bus 2

Tabel 6 Parameter Transmisi DC Konfigurasi *Bipolar Link* pada Sistem Standar IEEE 30 Bus

	Rectifier	Inverter
Bus	31	32
Reaktansi komutasi	0,002 Ω	0,002 Ω
Sudut kontrol minimum	78,4913°	78,4916°
Sudut kontrol maksimum	79,0740°	79,0743°
Regulasi transformator	0,51	0,51
Resistansi saluran DC		0,016 Ω
Set value		330 MW

Tabel 7 Hasil Simulasi Sistem Standar IEEE 30 Bus Setelah Adanya Transmisi HVDC dengan Konfigurasi *Bipolar Link*

No. Bus	Tegangan		Beban		Generator	
	Magnitude	Derajat	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)
1	0,9998	0	0	0	140	150
2	1,0250	0	21,7	12,7	40,557	311,8553
3	1,0038	-2,98	2,4	1,2	0	0
4	1,0045	-3,63	7,6	1,6	0	0
5	1,0000	-6,58	94,2	19	35	44,7624
6	0,9966	-4,58	0	0	0	0
7	0,9895	-5,93	22,8	10,9	0	0
8	1,0000	-4,84	30	30	24,5	41,9921
9	0,9888	-7,21	0	0	0	0
10	1,0013	-8,04	5,8	2	0	0
11	1,0000	-8,65	0	0	21	31,9592
12	0,9906	-7,93	11,2	7,5	0	0
13	0,9950	-4,8	0	0	28	44,7
14	0,9769	-8,83	6,2	1,6	0	0
15	0,9748	-8,87	8,2	2,5	0	0
16	0,9877	-8,31	3,5	1,8	0	0
17	0,9917	-8,34	9	5,8	0	0
18	0,9719	-9,36	3,2	0,9	0	0
19	0,9719	-9,42	9,5	3,4	0	0
20	0,9784	-9,14	2,2	0,7	0	0
21	0,9860	-8,57	17,5	11,2	0	0
22	0,9858	-8,57	0	0	0	0
23	0,9661	-9,14	3,2	1,6	0	0
24	0,9634	-9,11	8,7	6,7	0	0
25	0,9609	-9,16	0	0	0	0
26	0,9421	-9,63	3,5	2,3	0	0
27	0,9685	-8,9	0	0	0	0
28	0,9927	-5,03	0	0	0	0
29	0,9474	-10,28	2,4	0,9	0	0
30	0,9352	-11,27	10,6	1,9	0	0
31	0,9997	0	0	0	0	0
32	0,9998	0	0	0	0	0
Total			283,4	126,2	289,0570	625,2690

Dalam Tabel 7 ditunjukkan nilai daya beban sebesar 283,4 MW dan 126,2 MVAR dengan daya pembangkitan generator sebesar 289,0570 MW dan 625,2690 MVAR. Sedangkan nilai tegangan tiap bus berkisar antara 0,95352 p.u dan 1,0250 p.u.

Tabel 8 Perbandingan Nilai Jatuh Tegangan Tiap Bus antara Sistem Standar IEEE 30 Bus Menggunakan Transmisi AC dengan Transmisi DC

No. Bus	Jatuh Tegangan pada Sistem dengan Transmisi AC (%)	Jatuh Tegangan pada Sistem dengan Transmisi DC *Monopolar Link* (%)	Jatuh Tegangan pada Sistem dengan Transmisi DC *Bipolar Link* (%)
1	-1,40	-2,44	-2,49
2	0,00	0,00	0
3	0,58	1,01	0,37
4	0,46	1,24	0,45
5	-0,99	-0,99	-0,99
6	-0,32	-0,03	-0,34
7	-1,03	-0,85	-1,05
8	-0,99	-0,99	-0,99
9	-1,11	-0,81	-1,12
10	0,13	0,14	0,13
11	-2,44	-2,44	-2,44
12	-0,91	0,33	-0,94
13	-2,91	-2,44	-2,93
14	-2,28	-1,19	-2,31
15	-2,49	-1,56	-2,52
16	-1,21	-0,49	-1,23
17	-0,83	-0,60	-0,84
18	-2,79	-2,24	-2,81
19	-2,8	-2,30	-2,81
20	-2,15	-1,77	-2,16
21	-1,40	-1,34	-1,40
22	-1,42	-1,34	-1,42
23	-3,37	-2,70	-3,39
24	-3,65	-3,34	-3,66
25	-3,91	-3,62	-3,92
26	-5,79	-5,49	-5,79
27	-3,15	-2,88	-3,15
28	-0,71	-0,48	-0,73
29	-5,26	-4,98	-5,26
30	-6,47	-6,20	-6,45
31	-	-0,02	-0,07
32	-	-0,02	-0,04
Rata-rata	**-2,02**	**-1,59**	**-1,95**

Dari Tabel 8 dapat dilihat bahwa setelah menggunakan transmisi HVDC ada nilai tegangan yang diperbaiki, tetapi ada pula yang tidak diperbaiki dari batas yang diperbolehkan. Hal itu tampak pada nilai tegangan di bus 26, 29, dan 30. Tegangan dapat diperbaiki karena pada saluran transmisi HVDC tidak memiliki komponen reaktif yang dapat menjadi penyebab utama jatuh tegangan. Dengan menggunakan saluran transmisi HVDC konfigurasi *monopolar link*, nilai jatuh tegangan lebih baik daripada dua sistem lainnya.

Tabel 9 Perbandingan Nilai Rugi Daya Sistem Standar IEEE 30 Bus Menggunakan Transmisi AC dengan Transmisi DC

Rugi Daya	Sistem dengan Transmisi AC	Sistem dengan Transmisi DC (*Monopolar Link*)	Sistem dengan Transmisi DC (*Bipolar Link*)
Daya Aktif (MW)	7,4200	6,0200	5,6800
Daya Reaktif (MVAR)	31,2600	446,0400	926,0300
Daya Aktif (%)	2,61	2,07	1,96
Daya Reaktif (%)	20,43	77,80	88,00

Dari Tabel 9 dapat diketahui dengan menggunakan transmisi HVDC maka rugi daya aktif sistem dapat berkurang. Hal itu dikarenakan transmisi HVDC tidak memiliki komponen reaktif maka saluran transmisi dapat menyalurkan daya aktif yang lebih besar atau dengan kata lain meningkatkan performansi sistem. Transmisi HVDC dengan konfigurasi *bipolar link* dapat mengurangi rugi daya aktif lebih besar daripada

konfigurasi *monopolar link*. Akan tetapi, dengan menggunakan transmisi HVDC rugi daya reaktif yang dihasilkan lebih besar. Hal itu disebabkan karena transmisi HVDC terdiri dari konverter yang sifatnya menyerap daya reaktif. Transmisi HVDC dengan konfigurasi *bipolar link* menghasilkan rugi daya reaktif yang lebih besar bila dibandingkan dengan konfigurasi *monopolar link*.

C. Pembebanan 70%

Pada kondisi ini, data saluran sistem tetap namun hal yang membedakan adalah kondisi pembebanan yaitu 70%. Penyelesaian analisis aliran daya dengan metode Newton Raphson didasarkan pada:

a. Base daya (MVA_{base}) = 100 MVA
b. Base tegangan (kV_{base})= 132/33 kV
c. Akurasi = 0,00001
d. Batas iterasi metode Newton Raphson adalah 20

Tabel 10 Hasil Simulasi Sistem Standar IEEE 30 Bus Sebelum Penggunaan Transmisi HVDC

No. Bus	Tegangan		Beban		Generator	
	Magnitude	Derajat	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)
1	1,0040	1,63	0	0	80	-20
2	1,0250	0	15,19	8,89	60,1294	-12,9552
3	1,0068	-1,71	1,68	0,84	0	0
4	1,0071	-2,45	5,32	1,12	0	0
5	1,0000	-4,87	65,94	13,3	20	30,6672
6	0,9994	-3,24	0	0,0	0	0
7	0,9940	-4,28	15,96	7,63	0	0
8	1,0000	-3,47	21	21	14	24,8008
9	0,9940	-5,13	0	0	0	0
10	1,0010	-5,80	4,06	1,4	0	0
11	1,0000	-6,25	0	0	12	19,2555
12	1,0001	-5,71	7,84	5,25	0	0
13	0,9994	-3,3	0	0	16	44,7
14	0,9899	-6,34	4,34	1,12	0	0
15	0,9876	-6,36	5,74	1,75	0	0
16	0,9953	-5,97	2,45	1,26	0	0
17	0,9954	-6,01	6,3	4,06	0	0
18	0,9836	-6,72	2,24	0,63	0	0
19	0,9832	-6,73	6,65	2,38	0	0
20	0,9871	-6,54	1,54	0,49	0	0
21	0,9907	-6,17	12,25	7,84	0	0
22	0,9907	-6,16	0	0	0	0
23	0,9803	-6,54	2,24	1,12	0	0
24	0,9767	-6,51	6,09	4,69	0	0
25	0,9755	-6,49	0	0	0	0
26	0,9627	-6,81	2,45	1,61	0	0
27	0,9811	-6,28	0	0	0	0
28	0,9967	-3,58	0	0	0	0
29	0,9668	-7,21	1,68	0,63	0	0
30	0,9585	-7,88	7,42	1,33	0	0
Total			198,4	88,3	202,1294	86,4683

Dari tabel 10 ditunjukkan nilai beban sebesar 198,4 MW dan 88,3 MVAR, nilai tersebut merupakan pembebnana 70%. Sedangkan daya pembangkitan generator sebesar 202,1294 MW dan 86,4683 MVAR dengan *charging* 16,5 MVAR. Nilai tegangan berkisar antara 0,9585 p.u hingga 1,0250 p.u. Batas nilai tegangan yang diperbolehkan 1±5%. Sehingga tampak bahwa tidak ada nilai tegangan yang berada di bawah ataupun di atas batas yang diperbolehkan.

Selanjutnya, transmisi yang menghubungkan bus 1 ke bus 2 diganti dengan saluran transmisi DC konfigurasi *monopolar link*. Gambar konfigurasi yang digunakan masih sama dengan Gambar 7 yang membedakan adalah parameter yang digunakan yaitu sudut kontrol inverter dan *set value*. Parameter tersebut ditunjukkan pada tabel berikut ini.

Tabel 11 Parameter Transmisi DC Konfigurasi *Monopolar Link* pada Sistem Standar IEEE 30 Bus

	Rectifier	Inverter
Bus	31	32
Reaktansi komutasi	0,002 Ω	0,002 Ω
Sudut kontrol minimum	66,4824°	66,4826°
Sudut kontrol maksimum	67,7233°	67,7236°
Regulasi transformator	0,51	0,51
Resistansi saluran DC		0,016 Ω
Set value		170 MW

Tabel 12 Hasil Simulasi Sistem Standar IEEE 30 Bus Setelah Adanya Transmisi HVDC dengan Konfigurasi *Monopolar Link*

No. Bus	Tegangan		Beban		Generator	
	Magnitude	Derajat	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)
1	1,0000	-0,21	0	0	80	50,1398
2	1,0250	0	15,19	8,89	59,6767	36,0322
3	1,0070	-2,53	1,68	0,84	0	0
4	1,0082	-3,04	5,32	1,12	0	0
5	1,0000	-5,08	65,94	13,3	20	30,3834
6	0,9998	-3,67	0	0,0	0	0
7	0,9942	-4,63	15,96	7,63	0	0
8	1,0000	-3,9	21	21	14	23,7897
9	0,9944	-5,58	0	0	0	0
10	1,0010	-6,26	4,06	1,4	0	0
11	1,0000	-6,7	0	0	12	18,2596
12	1,0020	-6,25	7,84	5,25	0	0
13	1,0000	-3,88	0	0	16	50,4628
14	0,9916	-6,87	4,34	1,12	0	0
15	0,9891	-6,88	5,74	1,75	0	0
16	0,9964	-6,47	2,45	1,26	0	0
17	0,9958	-6,48	6,3	4,06	0	0
18	0,9844	-7,21	2,24	0,63	0	0
19	0,9840	-7,21	6,65	2,38	0	0
20	0,9877	-7,02	1,54	0,49	0	0
21	0,9908	-6,62	12,25	7,84	0	0
22	0,9908	-6,62	0	0	0	0
23	0,9814	-7,04	2,24	1,12	0	0
24	0,9772	-6,98	6,09	4,69	0	0
25	0,9760	-6,95	0	0	0	0
26	0,9632	-7,27	2,45	1,61	0	0
27	0,9815	-6,73	0	0	0	0
28	0,9970	-4,01	0	0	0	0
29	0,9672	-7,66	1,68	0,63	0	0
30	0,9589	-8,32	7,42	1,33	0	0
31	0,9999	-0,21	0	0	0	0
32	0,9999	0	0	0	0	0
Total			198,4	88,3	201,6767	209,0675

Dari Tabel 12 ditunjukkan nilai daya yang dibangkitkan generator sebesar 201,6767 MW dan 209,0675 MVAR dengan daya *charging* 13,8 MVAR.

Tabel 13 Parameter Transmisi DC Konfigurasi *Bipolar Link* pada Sistem Standar IEEE 30 Bus

	Rectifier	Inverter
Bus	31	32
Reaktansi komutasi	0,002 Ω	0,002 Ω
Sudut kontrol minimum	78,4913°	78,4915°
Sudut kontrol maksimum	79,0740°	79,0742°
Regulasi transformator	0,51	0,51
Resistansi saluran DC		0,016 Ω
Set value		170 MW

Tabel 14 Hasil Simulasi Sistem Standar IEEE 30 Bus Setelah Adanya Transmisi HVDC dengan Konfigurasi *Bipolar Link*

No. Bus	Tegangan		Beban		Generator	
	Magnitude	Derajat	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)
1	0,9999	0	0	0	80	150
2	1,0250	0	15,19	8,89	59,6745	123,9358
3	1,0065	-2,43	1,68	0,84	0	0
4	1,0077	-2,96	5,32	1,12	0	0
5	1,0000	-5,06	65,94	13,3	20	30,5013
6	0,9995	-3,63	0	0,0	0	0
7	0,9940	-4,59	15,96	7,63	0	0
8	1,0000	-3,85	21	21	14	24,3851
9	0,9941	-5,54	0	0	0	0
10	1,0010	-6,22	4,06	1,4	0	0
11	1,0000	-6,67	0	0	12	19,1444
12	0,9999	-6,17	7,84	5,25	0	0
13	1,0000	-3,81	0	0	16	43,6797
14	0,9897	-6,8	4,34	1,12	0	0
15	0,9875	-6,81	5,74	1,75	0	0
16	0,9952	-6,42	2,45	1,26	0	0
17	0,9954	-6,44	6,3	4,06	0	0
18	0,9835	-7,15	2,24	0,63	0	0
19	0,9832	-7,17	6,65	2,38	0	0
20	0,9871	-6,98	1,54	0,49	0	0
21	0,9907	-6,59	12,25	7,84	0	0
22	0,9907	-6,59	0	0	0	0
23	0,9803	-6,98	2,24	1,12	0	0
24	0,9767	-6,94	6,09	4,69	0	0
25	0,9756	-6,91	0	0	0	0
26	0,9628	-7,22	2,45	1,61	0	0
27	0,9812	-6,69	0	0	0	0
28	0,9968	-3,97	0	0	0	0
29	0,9669	-7,62	1,68	0,63	0	0
30	0,9586	-8,28	7,42	1,33	0	0
31	0,9998	0	0	0	0	0
32	0,9999	0	0	0	0	0
Total			198,4	88,3	201,6745	391,6463

Tabel 15 Perbandingan Nilai Jatuh Tegangan Tiap Bus antara Sistem Standar IEEE 30 Bus Menggunakan Transmisi AC dengan Transmisi DC

No. Bus	Jatuh Tegangan pada Sistem dengan Transmisi AC (%)	Jatuh Tegangan pada Sistem dengan Transmisi DC *Monopolar Link* (%)	Jatuh Tegangan pada Sistem dengan Transmisi DC *Bipolar Link* (%)
1	-2,05	-2,44	-2,45
2	0,00	0,00	0,00
3	0,68	0,70	0,65
4	0,71	0,82	0,77
5	-0,99	-0,99	-0,99
6	-0,06	-0,02	-0,05
7	-0,60	-0,58	-0,60
8	-0,99	-0,99	-0,99
9	-0,60	-0,56	-0,59
10	0,10	0,10	0,10
11	-2,44	-2,44	-2,44
12	0,01	0,22	-0,01
13	-2,50	-2,44	-2,44
14	-1,01	-0,82	-1,03
15	-1,24	-1,08	-1,25
16	-0,47	-0,35	-0,48
17	-0,46	-0,42	-0,46
18	-1,64	-1,55	-1,65
19	-1,68	-1,60	-1,68
20	-1,29	-1,23	-1,29
21	-0,93	-0,92	-0,93
22	-0,93	-0,92	-0,93
23	-1,97	-1,85	-1,97
24	-2,33	-2,27	-2,33
25	-2,45	-2,40	-2,44
26	-3,73	-3,68	-3,72
27	-1,89	-1,85	-1,88
28	-0,33	-0,30	-0,32
29	-3,32	-3,28	-3,31
30	-4,15	-4,11	-4,14
31	-	-0,01	-0,02
32	-	-0,01	-0,01
Rata-rata	**-1,29**	**-1,16**	**-1,21**

Dari Tabel 15 ditunjukkan bahwa nilai tegangan tiap bus pada sistem dengan menggunakan transmisi AC maupun DC tidak ada yang melebihi batas yang diperbolehkan. Akan tetapi, dengan penggunaan transmisi DC konfigurasi *monopolar link* nilai diperoleh nilai tegangan yang lebih baik.

Tabel 16 Perbandingan Nilai Rugi Daya Sistem Standar IEEE 30 Bus Menggunakan Transmisi AC dengan Transmisi DC

Rugi Daya	Sistem dengan Transmisi AC	Sistem dengan Transmisi DC (*Monopolar Link*)	Sistem dengan Transmisi DC (*Bipolar Link*)
Daya Aktif (MW)	3,7400	3,4000	3,2900
Daya Reaktif (MVAR)	16,5800	231,2300	481,6000
Daya Aktif (%)	1,85	1,68	1,63
Daya Reaktif (%)	16,10	72,35	84,50

Dari Tabel 16 dapat diketahui dengan menggunakan transmisi HVDC maka rugi daya aktif sistem dapat berkurang. Transmisi HVDC dengan konfigurasi *bipolar link* dapat mengurangi rugi daya aktif lebih besar daripada konfigurasi *monopolar link*. Akan tetapi, nilai pengurangan rugi daya aktif pada kondisi pembebanan 70% ini tidak signifikan. Dengan menggunakan transmisi HVDC rugi daya reaktif yang dihasilkan lebih besar. Hal itu disebabkan karena transmisi HVDC terdiri dari konverter yang sifatnya menyerap daya reaktif. Transmisi HVDC dengan konfigurasi *bipolar link* menghasilkan rugi daya reaktif yang lebih besar bila dibandingkan dengan konfigurasi *monopolar link*. Hal itu disebabkan karena jumlah konverter pada konfigurasi *bipolar link* lebih banyak daripada *monopolar link*. Semakin banyak jumlah konverter maka semakin banyak pula daya reaktif yang diserap sehinga menjadi rugi daya reaktif sistem.

V KESIMPULAN DAN SARAN

A. KESIMPULAN

Berdasarkan data yang diperoleh dari pengujian saluran trasmsisi HVDC pada sistem tenaga listrik maka dapat diambil beberapa kesimpulan, yaitu :

1. Penempatan saluran transmisi HVDC dapat mengurangi deviasi tegangan, rugi-rugi daya aktif , dan menambah rugi daya reaktif pada sistem.
2. Pada kondisi pembebanan 100% , dengan menggunakan saluran transmisi HVDC konfigurasi *monopolar link* tegangan di bus 29 pada sistem standar IEEE 30 bus yang semula di bawah batas yang diperbolehkan menjadi lebih baik atau tidak lagi di bawah batas.
3. Penggunaan saluran transmisi HVDC menghasilkan rugi daya aktif lebih kecil daripada saluran transmisi HVAC, yaitu 2,07% dengan konfigurasi *monopolar link*, 1,96% dengan konfigurasi *bipolar link* pada kondisi pembebanan 100%. Untuk pembebanan 70% , rugi daya aktif sebesar

1,68% dengan konfigurasi *monopolar link* dan 1,63% untuk konfigurasi *bipolar link*.

4. Penggunaan saluran transmisi HVDC menyebabkan rugi daya reaktif lebih besar daripada saluran transmisi HVAC, 77,80% dengan konfigurasi *monopolar link*, 88,00% dengan konfigurasi *bipolar link* dalam kondisi pembebanan 100%. Dalam kondisi pembebanan 70%, rugi daya reaktif sebesar 72,35% untuk konfigurasi *monopolar link* dan 84,50% untuk *bipolar link*.

B. SARAN

1. Penentuan saluran transmisi HVAC yang akan diganti ke saluran transmisi HVDC dapat dilakukan dengan pertimbangan yang lain atau perkembangan teknologi transmisi HVDC agar didaptkan hasil yang lebih optimal.
2. Dapat menggunkaan komponen-komponen pembentuk saluran transmisi HVDC secara lengkap sehingga dapat memperbaiki tegangan secara signifikan dan mereduksi rugi-rugi daya pada sistem lebih besar.
3. Dapat menggunakan konfigurasi saluran transmisi HVDC yang lain agar menjadi pembanding dengan konfigurasi yang sebelumnya.
4. Dapat memperhitungkan biaya komponen-komponen pembentuk saluran transmisi HVDC, pemasangan, dan jarak saluran transmisi sehingga didapatkan keseimbangan antara aspek ekonomis dan optimasi.

DAFTAR PUSTAKA

[1] Alsac, O. & Stott, B. 1974. *Optimal Load Flow with Steady State Security*, Manchester: IEEE Transaction On Power Apparatus System.

[2] Firman, D.S & Ursam, P.T. 2014. Perancangan Transmisi DC Pada Saluran Bawah Laut. Jakarta: Universitas Katolik Indonesia Atma Jaya.

[3] Himawan, A. 2015. *Rasio Elektrifikasi Indonesia Jelang Akhir 2015 Capai 87 Persen*.www.suara.com/bisnis/2015/10/27/141531/rasio-elektrifikasi-indonesia-jelang-akhir-2015-capai-87-persen (diakses pada tanggal 10 Februari 2016).

[4] Kundur, Prabha. 1994. *Power System Stability and Control*. California: Mcgraw Hill,Inc.

[5] Li,Y.Zhang,Z.Rehtanz,C.Luo,L.Ruberg,S.&Liu,F. 2011.*Study on Steady and Transient State Characteristics of a New HVDC Transmission System Based on an Inductive Filtering Method*. *IEEE Transaction on Power Electronic*. 26(7):1976-1986.

[6] Manguelle,J.S.,Todorovic,M.H.,Chi,S.,Gunturi,K.S.&Datta,R. 2014. *Power Transfer Capability of HVAC Cables for Subsea Transmission and Distribution Systems*. *IEEE Transaction on Industry Applications.*50 (4): 2382-2391.

[7] Menteri Energi dan Sumber Daya Mineral.2007. *Peraturan Menteri Energi dan Sumber Daya Mineral Nomor 3 Tahun 2007: Aturan Jaringan Sistem Tenaga Listrik Jawa-Madura-Bali*. Jakarta : Menteri Energi dan Sumber Daya Mineral.

[8] Menteri Energi dan Sumber Daya Mineral. 2014. *Proyek Transmisi Sumatera Dan Transmisi Sumatera – Jawa Dicanangkan*. www.esdm.go.id (diakses pada tanggal 9 10 Februari 2016)

[9] Murty,P.S.R. 2007. *Power System Analysis*. India: BS Publications.

[10] Saadat,Hadi. 1999. *Power System Analysis*. Singapore: McGraw Hill,Inc.

[11] Singh,S.N. 2012. *High Voltage DC Transmission*. India: Indian Institute of Technology Kanpur

[12] Stevenson,W. 1990. *Analisis Sistem Tenaga Listrik*. Jakarta:Erlangga.

[13] Supriatna, G. 2013. *Optimasi Sistem Interkoneksi 500 kV Jawa-Bali dengan Aliran Daya Optimal MINOPF*. Bandung: Tugas Akhir, UPI.