

## Pemodelan Komponen HVDC Dan Analisa Aliran Daya Pada Sistem Terintegrasi AC-DC Dengan Metoda *Sequential Approach*

**Khairudin**

Staf Pengajar Jurusan Teknik Elektro Universitas Lampung

khai\_hasan@yahoo.com

**Abstrak**—Ketika interkoneksi sistem kelistrikan yang terpisah oleh perbedaan frekuensi ataupun oleh faktor geografis menjadi suatu keharusan, penerapan sistem gabungan HVDC akan menjadi alternatif pilihan yang patut dipertimbangkan. Pada makalah ini pemodelan komponen saluran transmisi DC dan analisa aliran daya pada sistem terintegrasi AC-DC akan didiskusikan. Variabel-variabel saluran DC yang digunakan untuk simulasi antara lain ialah tegangan DC pada terminal konverter, rasio tap transformator konverter, sudut penyalan rectifer, sudut pemadaman inverter, dan arus pada saluran transmisi HVDC. Penggunaan metode *sequential approach* yang berbasis pada metode *fast decouple*, memungkinkan untuk melakukan studi aliran daya pada sistem terintegrasi AC-DC tanpa harus melakukan modifikasi ulang terhadap algoritma studi aliran daya AC. Diagram alir, pengujian dan hasil dari metode ini menggunakan IEEE test system juga disertakan pada makalah ini.

Kata Kunci: HVDC, aliran daya, *fast decouple*, *sequential approach*

**Abstract**—*In a circumstance where two or more power systems are splitted up by the system frequency discrepancy or the geographical reasons become a must, the application of HVDC will be a considerable choice. In this paper, the modeling of DC transmission line components and the power flow analysis in an integrated AC-DC system will be discussed. The DC lines variables applied in the simulation are DC voltage at converter terminal, converter transformer tap ratio, rectifier firing angle, and current flowing in HVDC line. The use of sequential approach method based on fast decouple, allowing us to do the power flow analysis in AC-DC integrated system without an obligation to re-modify the AC power flow algorithm. Flow chart, the test and outcome, where in this method are using IEE test system will be incorporated in this paper.*

---

Naskah ini diterima pada tanggal 25 September 2009, direvisi pada tanggal 5 Nopember 2009 dan disetujui untuk diterbitkan pada tanggal 1 Desember 2009

*Keywords: HVDC, power flow, fast decouple, sequential approach*

### A. Pendahuluan

Pertumbuhan kapasitas pembangkitan di sebagian besar wilayah Indonesia, yang tidak mampu mengimbangi besarnya pertumbuhan konsumsi daya elektrik menyebabkan terjadinya krisis tenaga listrik. Hal ini diperburuk dengan kondisi geografis Indonesia yang sebagian besar luas wilayahnya merupakan lautan, sehingga mengakibatkan terisolasinya pulau-pulau yang mengalami krisis ketenagalistrikan.

Perhitungan-perhitungan ekonomis yang telah dilakukan memberikan informasi mengenai keuntungan penggunaan sistem transmisi arus searah (*DC system*) yang selama ini telah tergantikan oleh sistem transmisi arus bolak balik (*AC system*). Untuk saluran transmisi udara (*overhead line*) dengan jarak 600-1000 km, saluran transmisi HVDC lebih ekonomis dibandingkan saluran transmisi HVAC, sedangkan untuk saluran transmisi menggunakan kabel bawah laut dengan jarak lebih besar dari 80 km, penggunaan saluran transmisi HVDC lebih ekonomis jika dibandingkan dengan penggunaan saluran transmisi HVAC.[7]

Untuk wilayah Indonesia, dengan sebagian besar luas wilayahnya berupa lautan, maka sangat memungkinkan untuk menggunakan saluran transmisi DC sebagai penghubung antara sistem ketenagalistrikan di pulau satu dengan sistem ketenagalistrikan yang ada di pulau yang lain.

**B. Studi Aliran Daya Menggunakan Metode Fast Decouple**

Studi aliran daya adalah studi yang dilakukan untuk mendapatkan informasi mengenai parameter-parameter yang terdapat pada berbagai titik di dalam suatu sistem tenaga listrik, saat sistem tersebut dalam keadaan operasi tunak (*steady state*), baik pada saat sistem sedang berjalan maupun yang diharapkan terjadi pada masa yang akan datang. Informasi ini sangat dibutuhkan guna mengevaluasi kinerja sistem tenaga dan menganalisis kondisi pembangkitan maupun pembebanan.<sup>[5]</sup> Metode *fast decouple* merupakan salah satu metode yang paling sering digunakan di dalam analisis aliran daya, ini dikarenakan komputasi yang dilakukan dengan metode ini relatif lebih cepat dan lebih handal. Selain itu, metode ini juga tidak mengalami kesulitan konvergensi ketika harus menganalisis sistem tenaga yang memiliki rasio perbandingan resistansi dan reaktansi yang besar.

Untuk suatu sistem tenaga yang memiliki rasio perbandingan resistansi dan reaktansi yang besar, maka perubahan daya aktif  $\Delta P$  akan lebih sensitif terhadap perubahan sudut fasa  $\Delta \delta$ , daripada terhadap perubahan magnitudo tegangan  $\Delta V$ . Sebaliknya perubahan daya reaktif  $\Delta Q$  lebih sensitif terhadap perubahan  $\Delta V$ , daripada terhadap perubahan sudut fasa  $\Delta \delta$ . Persamaan yang digunakan untuk menyelesaikan studi aliran daya menggunakan metode *fast decouple* adalah<sup>[4]</sup> :

$$\frac{\Delta P}{|V|} = -B' \Delta \delta \tag{1}$$

$$\frac{\Delta Q}{|V|} = -B'' \Delta |V| \tag{2}$$

dimana :

$$B'_{ij} = -\frac{1}{X_{ij}} (i \neq j)$$

$$B'_{ii} = \sum_{i \neq j} \frac{1}{X_{ij}}$$

$$B''_{ij} = -B_{ij} (i \neq j)$$

$$B''_{ii} = \sum_{i \neq j} B_{ij}$$

Matriks  $B'$  merupakan matriks yang baris dan kolomnya disusun mulai dari  $(n-1)$ , dengan  $n$  adalah banyaknya bus pada sistem.  $B''$  merupakan suatu harga yang ditentukan dari baris dan kolomnya dengan  $(n-1-m)$ , dengan  $m$  merupakan banyaknya bus pengontrol tegangan pada sistem. Nilai pada kedua matriks ini tetap konstan selama interaksi berlangsung.

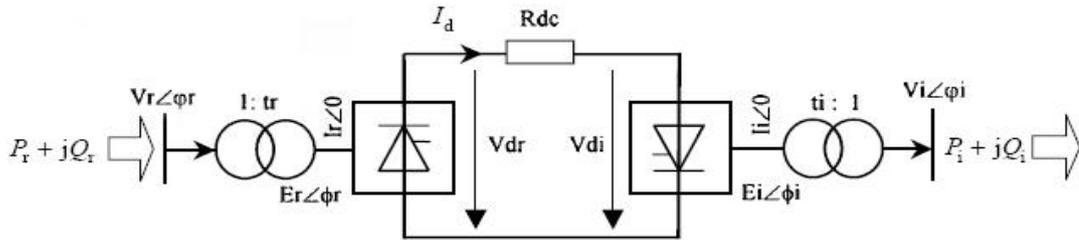
**C. Pemodelan Komponen Dc**

Untuk analisis aliran daya diperlukan operasi stasiun konverter dalam keadaan tunak, sehingga membutuhkan beberapa asumsi. Pertama, tegangan AC pada terminal bus sangat seimbang dan sinusoidal, pem-filteran sempurna terhadap semua arus dan tegangan harmonisa yang dihasilkan oleh konverter, dan asumsi yang terakhir yaitu admitansi magnetik belitan transformator diabaikan.

Gambar 1 menunjukkan suatu diagram skematik pemodelan dasar dari saluran transmisi DC yang menghubungkan antara busbar *rectifier* ( $r$ ) dengan busbar *inverter* ( $i$ ).

Variabel-variabel yang terdapat pada gambar di atas, dan perlu ditentukan saat studi aliran daya dilakukan adalah :

1.  $V$  : Tegangan fasa ke fasa pada bus sistem AC.
2.  $E \angle \phi$  : Tegangan AC fasa ke fasa pada sisi sekunder Trafo konverter
3.  $I \angle 0$  : Arus bolak-balik pada sisi sekunder trafo konverter
4.  $\alpha, \gamma$  : Sudut penyalan dan sudut pemadaman



Gambar 1. Diagram skematik pemodelan komponen saluran transmisi HVDC

5.  $t$  : Rasio *tap* trafo

6.  $V_d, I_d$  : Tegangan dan Arus searah pada saluran transmisi DC.

Pada hasil studi aliran daya, hanya akan tertarik pada besarnya tegangan busbar AC dan tegangan searah pada converter DC. Oleh karena itu nilai  $E$  seperti yang terdapat pada gambar 1 dapat diabaikan. Dengan cara yang sama, oleh karena studi aliran daya ini lebih tertarik terhadap arus pada saluran transmisi HVDC daripada arus pada sisi sekunder transformator, maka arus sekunder transformator dapat diabaikan. Sehingga  $I \angle 0$  juga dapat dihilangkan dari persamaan. Pada makalah ini, *Station* konverter dimodelkan sebagai suatu beban sistem tenaga AC. Pada studi aliran daya konvensional, suatu bus beban akan mempunyai daya aktif dan daya reaktif yang tetap, sedangkan untuk bus konverter, daya aktif dan reaktif bergantung pada besarnya magnitude tegangan AC atau dengan kata lain “*Active and Reactive Power Dependent to the AC Voltage*”.

Besarnya nilai tegangan  $V$  diambil dari nilai tegangan sistem AC terbaru, pada busbar konverter. Sehingga sekarang hanya tinggal menentukan besarnya nilai  $V_{dr}, V_{di}, t_r, t_i, \alpha, \gamma$ , dan  $I_d$ . Besarnya masing-masing variabel tersebut dapat ditentukan dengan persamaan-persamaan yang telah ada yaitu :

$$V_{dr} = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} t_r V_c \cos \alpha - \frac{3X_c}{\pi} I_d \quad (3)$$

$$V_{di} = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} t_i V_c \cos \gamma - \frac{3X_c}{\pi} I_d \quad (4)$$

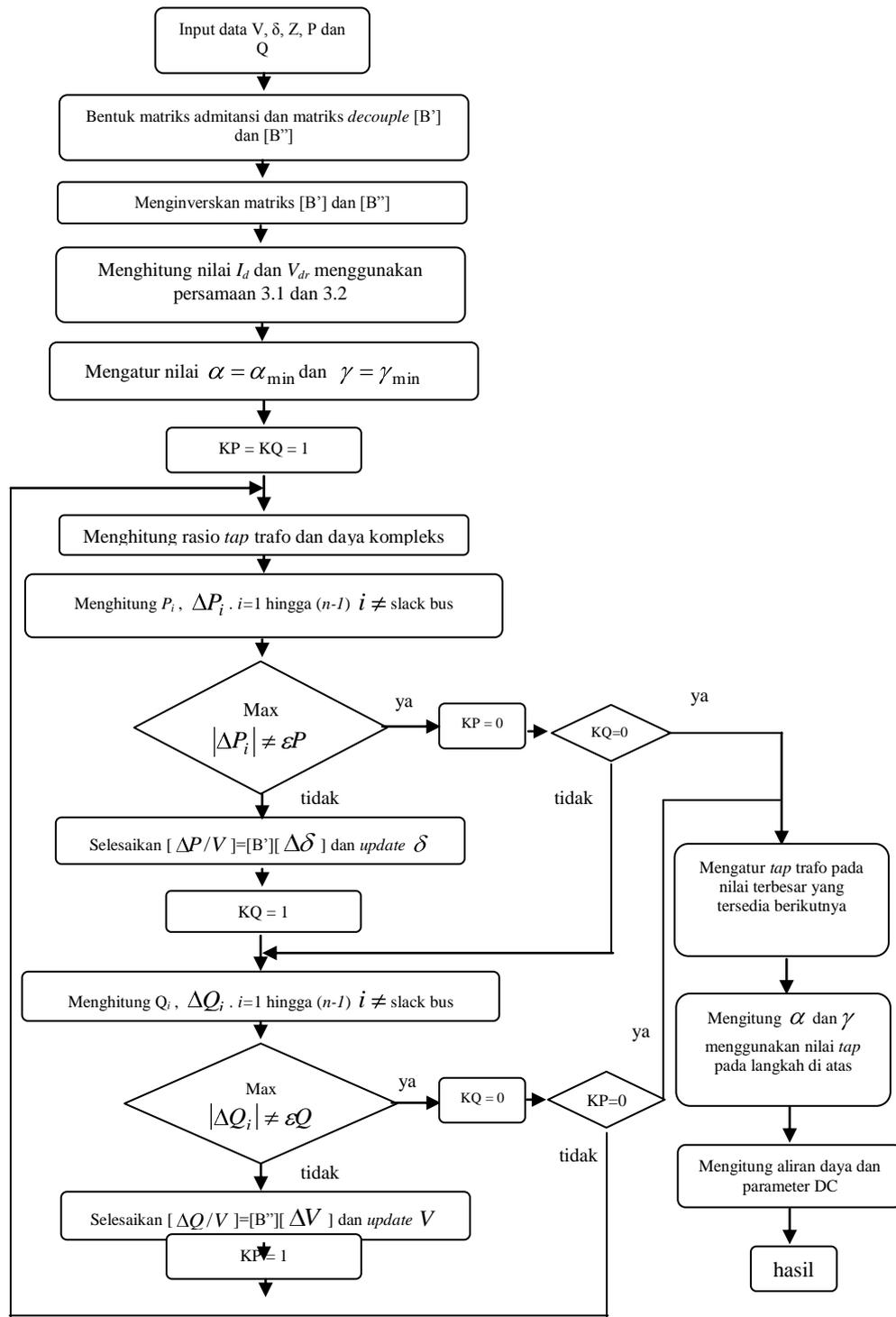
$$V_{dr} = V_{di} + R_{dc} I_d \quad (5)$$

$$P_{dr} = V_{dr} I_d \text{ atau } P_{di} = V_{di} I_d \quad (6)$$

Biasanya besarnya daya aktif yang ada pada sisi *inverter* ( $P_{di}$ ) sudah ditentukan oleh data yang ada. Selain itu tegangan pada sisi *inverter* nilai minimum sudut penyalan ( $\alpha$ ) dan sudut pemadaman ( $\gamma$ ) juga ditentukan oleh data yang ada. Oleh karena semua variabel dari komponen HVDC telah diperoleh maka pemodelan komponen HVDC di atas dianggap selesai.

#### D. Integrasi Persamaan Saluran Transmisi HVDC dengan Studi Aliran Daya AC

*Sequential approach* (pendekatan berurutan) digunakan untuk mengintegrasikan suatu persamaan saluran transmisi HVDC kedalam studi aliran daya AC. Dengan menggunakan pendekatan ini, penyelesaian persamaan AC dan persamaan DC dilakukan secara terpisah, sehingga tidak memerlukan modifikasi signifikan terhadap algoritma studi aliran daya AC yang telah ada. Untuk interaksi pada sistem AC, bus konverter dianggap sebagai bus beban. Namun untuk bus beban dengan stasiun konverter terkoneksi kepadanya, bus tersebut tidak mengikuti aturan untuk bus beban sistem AC, melainkan mengikuti aturan pemodelan di atas.



Gambar 2. Diagram alir studi aliran daya pada sistem terintegrasi AC-DC

**E. Algoritma Studi Aliran Daya AC-DC**

Persamaan untuk pemodelan saluran transmisi HVDC telah didapatkan, dan sekarang tinggal bagaimana cara untuk mengintegrasikannya kedalam studi aliran

daya AC. Diagram alir untuk aliran daya untuk sistem terintegrasi AC-DC dapat dilihat pada gambar 2. Jika  $P_{di}$  ditentukan, dan kemudian mengetahui  $V_{di}$ , kemudian menghitung  $I_d$  dengan menggunakan persamaan (6) kemudian menggunakan

persamaan (5) untuk mengetahui tegangan  $V_{dr}$ . Untuk menjaga agar konsumsi daya reaktif konverter tetap minimum, maka sudut  $\alpha$  dan sudut  $\gamma$  sebisa mungkin dijaga sedekat dengan nilai minimumnya. Menggunakan nilai  $V_i$  dan  $V_r$  terbaru dari setiap interaksi sistem AC. Setelah selesai dengan variabel DC, maka kita menyelesaikan perhitungan daya aktif dan daya reaktif pada tiap-tiap konverter. Daya kompleks pada konverter 'k' dinyatakan sebagai :

$$S_k = P_d + P_d \tan \phi \quad (7)$$

dimana :

$$\tan \phi = \operatorname{sgn}(x) \frac{2u + \sin(2k) - \sin(2k + 2u)}{\cos(2k) - \cos(2k + 2u)}$$

$$u = \cos^{-1} \left[ \frac{2V_d}{V_0} - \cos \theta(k) \right] - \theta(k)$$

dimana  $V_0 = \sqrt{2/\pi} V_c$ ,  $k = \alpha$  dan  $x=(+)$  jika konverter tersebut ialah *rectifier* dan  $k = \gamma$  dan  $x= (-)$  jika konverter tersebut adalah *inverter*.

Setiap interaksi dari sistem AC akan dilakukan dengan mengasumsikan konverter sebagai beban daya kompleks seperti yang telah disebutkan di atas. Hal tersebut akan memberikan nilai tegangan  $V_i$  dan  $V_r$  baru, dan nilai tegangan  $V_i$  dan  $V_r$  baru ini digunakan untuk menentukan nilai  $t_r$  dan  $t_i$  serta untuk menentukan daya kompleks pada konverter untuk interaksi berikutnya. Rasio *tap* transformator akan berubah-ubah terus untuk setiap interasinya, hal ini tidak mungkin digunakan untuk menentukan nilai *tap* transformator yang tepat, hal ini dikarenakan karena masalah konvergensi. Pada kasus ini nilai yang digunakan ialah nilai terbesar yang tersedia berikutnya. Setelah hasilnya sesuai dengan yang diinginkan, maka dengan menggunakan persamaan 1 dan 2 untuk menentukan besarnya sudut  $\alpha$  dan  $\gamma$ .

## F. Hasil Dan Pembahasan

Dua jaringan sistem tenaga yang disimulasikan pada makalah ini ialah:

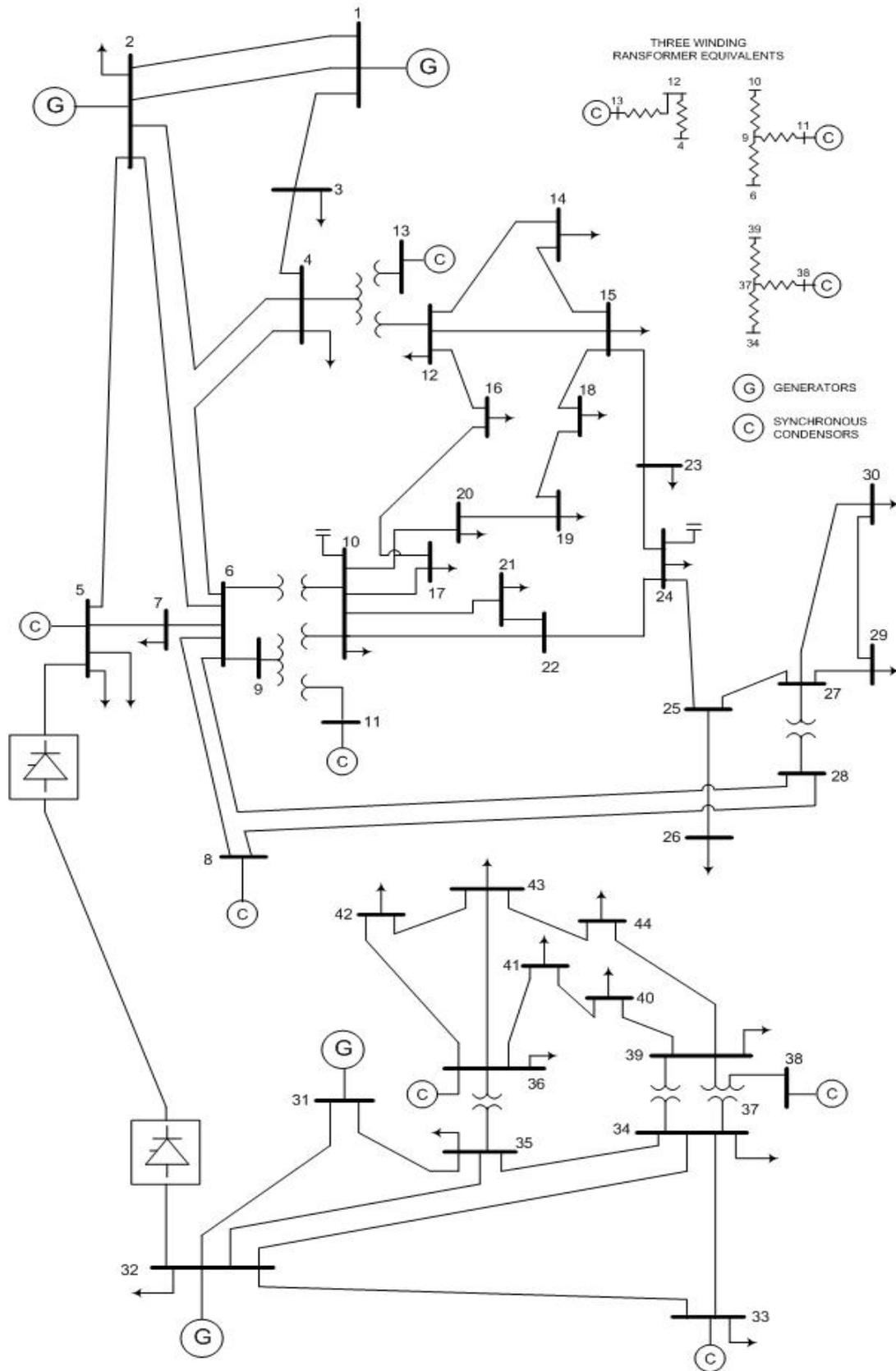
- IEEE 14 Bus *Test System*, yang merepresentasikan suatu bagian pada *American Electric Power System*, memiliki 2 buah generator dan memiliki 3 bus dengan *synchronous condensor*.
- IEEE 30 Bus *Test System*, yang merepresentasikan suatu bagian pada *American Electric Power System*, memiliki 2 buah generator dan memiliki 4 bus dengan *synchronous condensor*.

Kedua sistem tenaga tersebut di atas, dihubungkan oleh saluran transmisi HVDC antara bus 32 (bus 2 pada IEEE 14 Bus *Test System*) dan bus 5 (bus 5 pada IEEE 30 Bus *Test System*). Karakteristik saluran transmisi HVDC yang digunakan untuk menghubungkan kedua sistem tenaga tersebut dapat dilihat pada tabel berikut. Diagram satu garis kedua sistem tenaga tersebut, setelah dihubungkan oleh saluran transmisi HVDC dapat dilihat pada gambar 3.

Tabel 1. Karakteristik saluran transmisi HVDC

	Rectifier	Inverter
Nomor Bus	32	5
Reaktansi Komutasi	0.126	0.07275
Sudut Kontrol Min.	7	11
Range Regulasi Trafo	±15%	±15%
Jumlah Posisi <i>Tap</i>	27	19
Resistansi Saluran Transmisi DC	0.00334	
Setting Aliran Daya DC	0.5857	
Tegangan DC Inverter	1.284	

\*) Dalam P.U. dengan *base* MVA = 100 MVA.  
*Base* Tegangan =100 KV



Gambar 3. IEEE 14 bus dan 30 bus *test system* dengan saluran transmisi HVDC pada bus 32 dan bus 5.

Tabel 2. Hasil perhitungan studi aliran daya pada sistem terintegrasi AC-DC

Bus No.	Voltage Mag.	Angle Degree	Load MW	Generation Mvar	Inject MW	Bus No.	Voltage Mag.
1	1.0600	0.000	0	0	195.206	1	1.0600
2	1.0430	-3.886	21.7	12.7	40	2	1.0430
3	1.0228	-6.390	2.4	1.2	0	3	1.0228
4	1.0141	-7.692	7.6	1.6	0	4	1.0141
5	1.0100	-8.787	94.2	19	0	5	1.0100
6	1.0126	-8.991	0	0	0	6	1.0126
7	1.0032	-9.442	22.8	10.9	0	7	1.0032
8	1.0100	-9.700	30	30	0	8	1.0100
9	1.0515	-12.095	0	0	0	9	1.0515
10	1.0450	-13.721	5.8	2	0	10	1.0450
11	1.0820	-12.095	0	0	0	11	1.0820
12	1.0576	-13.163	11.2	7.5	0	12	1.0576
13	1.0710	-13.163	0	0	0	13	1.0710
14	1.0427	-14.031	6.2	1.6	0	14	1.0427
15	1.0382	-14.097	8.2	2.5	0	15	1.0382
16	1.0452	-13.673	3.5	1.8	0	16	1.0452
17	1.0398	-13.914	9	5.8	0	17	1.0398
18	1.0285	-14.659	3.2	0.9	0	18	1.0285
19	1.0258	-14.801	9.5	3.4	0	19	1.0258
20	1.0299	-14.588	2.2	0.7	0	20	1.0299
21	1.0328	-14.168	17.5	11.2	0	21	1.0328
22	1.0333	-14.156	0	0	0	22	1.0333
23	1.0277	-14.437	3.2	1.6	0	23	1.0277
24	1.0222	-14.545	8.7	6.7	0	24	1.0222
25	1.0196	-14.091	0	0	0	25	1.0196
26	1.0019	-14.509	3.5	2.3	0	26	1.0019
27	1.0265	-13.551	0	0	0	27	1.0265
28	1.0111	-9.654	0	0	0	28	1.0111
29	1.0067	-14.773	2.4	0.9	0	29	1.0067
30	0.9952	-15.65	10.6	1.9	0	30	0.9952
31	1.0600	0.000	0	0	294.993	31	1.0600
32	1.0450	-6.706	21.7	12.7	40	32	1.0450
33	1.0100	-14.272	94.2	19	0	33	1.0100
34	1.0149	-11.624	47.8	4	0	34	1.0149
35	1.0189	-10.030	7.6	1.6	0	35	1.0189
36	1.0700	-15.705	11.2	7.5	0	36	1.0700
37	1.0506	-14.599	0	0	0	37	1.0506
38	1.0900	-14.599	0	0	0	38	1.0900
39	1.0339	-16.169	29.5	16.6	0	39	1.0339
40	1.0327	-16.369	9	5.8	0	40	1.0327
41	1.0476	-16.156	3.5	1.8	0	41	1.0476
42	1.0535	-16.559	6.1	1.6	0	42	1.0535
43	1.0471	-16.602	13.5	5.8	0	43	1.0471
44	1.0214	-17.383	14.9	5	0	44	1.0214
Total			542.4	207.6	570.199	Total	

Hasil perhitungan studi aliran daya pada sistem terintegrasi AC-DC dengan menggunakan metode *sequential approach* terbagi menjadi dua, yang pertama ialah hasil dari studi aliran daya itu sendiri, dan yang kedua ialah hasil perhitungan variabel saluran transmisi DC. Tabel 2 dan tabel 3 menunjukkan kedua hasil tersebut secara berurutan.

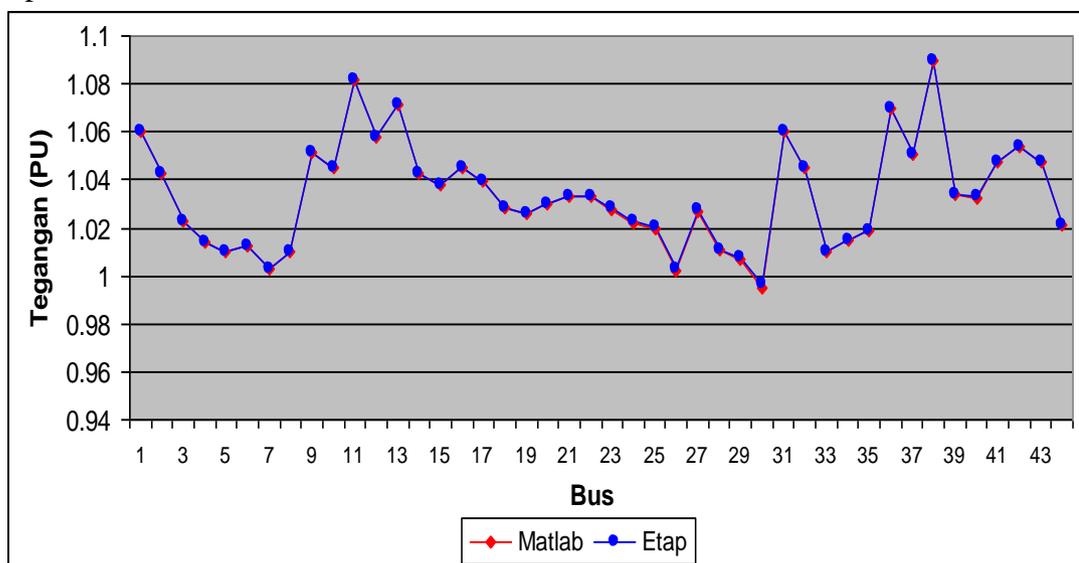
Tabel 3. Hasil komponen DC

Tegangan DC	1.2855	1.2840
Tap Transformator	0.9605	0.9832
Sudut Kontrol	8.5633	11.1628
Daya Aktif	58.6390	58.5700
Daya Reaktif	25.3010	20.5080
Power Faktor	0.9182	0.9438
Arus DC	0.4562	
Tegangan DC	1.2855	1.2840

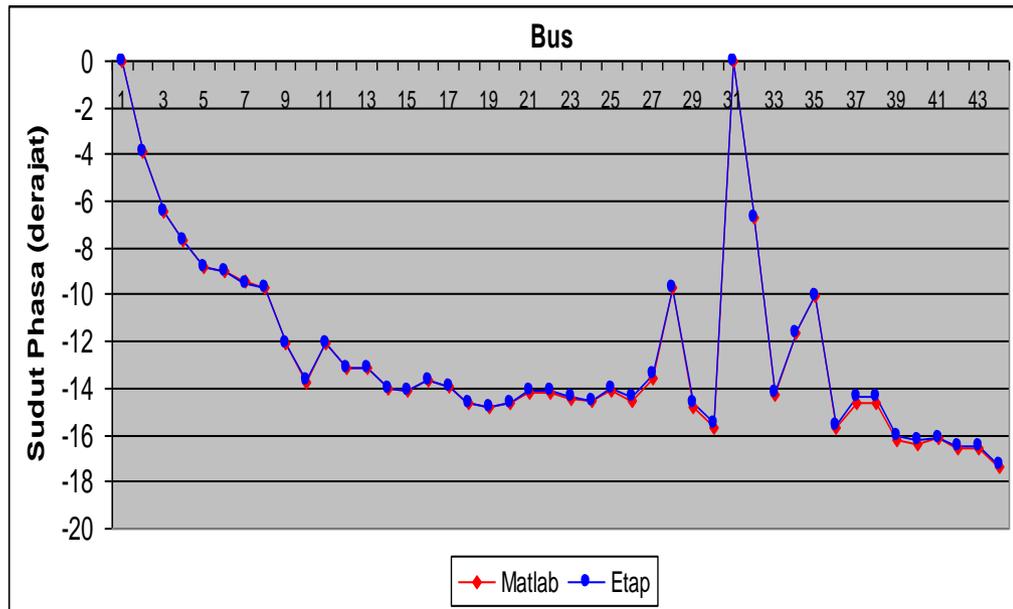
Dari kedua tabel hasil perhitungan aliran daya tersebut, diketahui bahwa dengan menggunakan program studi aliran daya ini, dengan rasio kesalahan maksimum 0.0001, perhitungan aliran daya diselesaikan setelah melakukan 31 langkah iterasi ditambah dengan 1 iterasi berikutnya untuk mendapatkan hasil komponen DC.

Tipe bus yang terhubung dengan saluran transmisi DC juga memberikan kontribusi terhadap jumlah iterasi yang dilakukan. Jika salah satu (atau keduanya) stasiun konverter terhubung ke bus pengatur tegangan maka konvergensi yang dilakukan akan lebih cepat dibandingkan dengan saat stasiun konverter tersebut terhubung dengan bus beban. Jika kedua stasiun konverter terhubung dengan *slack bus*, maka komponen-komponen DC akan konvergen pada perhitungan pertama. Hal ini dikarenakan magnitudo dan sudut fasa pada *slack bus* tersebut konstan selama perhitungan berlangsung. Oleh karena besarnya daya aktif dan reaktif dari stasiun konverter bergantung pada besarnya tegangan AC, maka ketika tegangan AC pada bus konstan, daya aktif dan daya reaktif serta komponen DC lainnya juga akan tetap konstan.

Grafik profil tegangan dan sudut fasa masing-masing bus dapat dilihat pada gambar 4 dan 5.



Gambar 4. Profil tegangan bus dengan saluran transmisi HVDC pada bus 32 dan bus 5



Gambar 5. Sudut phasa bus dengan saluran transmisi HVDC pada bus 32 dan bus 5

Grafik tegangan dan sudut phasa di atas menunjukkan bahwa perhitungan aliran daya pada sistem terintegrasi AC-DC menggunakan metode *sequential approach*, tidak memberikan pengaruh terhadap magnitude tegangan pada bus pengontrol tegangan maupun *slack bus*. Perubahan magnitude tegangan hanya terjadi pada bus beban. Besarnya perubahan magnitude tegangan terbesar terjadi pada bus 3 dengan perubahan tegangan sebesar 0.0013 (dalam satuan p.u.). Sedangkan untuk sudut phasa, perubahan hanya terjadi pada bus beban dan bus pengontrol tegangan. Perubahan sudut phasa terbesar terjadi pada bus 27 dengan perubahan sudut phasa sebesar  $6.361^\circ$ .

### G. Simpulan

1. Pemodelan komponen saluran transmisi HVDC, memberikan informasi mengenai variabel-variabel DC yang perlu ditentukan saat studi aliran daya pada sistem terintegrasi AC-DC antara lain ialah : Tegangan phasa ke phasa pada bus sistem AC (V), Sudut penyalaan dan sudut

pemadaman ( $\alpha, \gamma$ ), Rasio *tap* trafo( $t$ ), dan Tegangan serta arus searah pada saluran transmisi DC ( $V_d, I_d$ ).

2. Dengan menggunakan metode *sequential approach*, perhitungan aliran daya pada sistem terintegrasi AC-DC, dapat dilakukan tanpa melakukan modifikasi algoritma perhitungan aliran daya AC.
3. Tipe bus yang terhubung dengan saluran transmisi HVDC, juga memberikan pengaruh terhadap kecepatan perhitungan aliran daya yang dilakukan.
4. Saluran transmisi HVDC mengakibatkan terjadinya perubahan magnitude tegangan dan sudut phasa pada bus beban, untuk bus pengontrol tegangan perubahan hanya terjadi pada sudut phasanya, sedangkan pada *slack bus* keduanya tetap.

### H. Daftar Pustaka

- [1] Arrillaga, J. and B, Smith. 1998. AC-DC Power System Analysis. The Institution of Electrical Engineers. London.

- [2] Arrillaga, J. C, Arnold. and B, Harher. 1983. Computer Modelling of Electrical Power System. John Willey and Sons. New York.
- [3] Arrillaga, J. 1998. High Voltage Direct Current Transmission 2nd Edition. The Institution of Electrical Engineers. London.
- [4] Saadat, Hadi. 1999. Power System Anlysis. WCB/McGraw-Hill. Singapore.
- [5] Graiger, John J. and William D. Stevenson. 1994. Power System Anlysis. McGraw-Hill. Singapore.
- [6] Hamma dan Tadjuddin. Oktober 2000. Prospek Penggunaan Transmisi HVDC Dengan Kabel Laut di Indonesia. Nomor 33. Tahun VI. Elektro Indonesia.
- [7] Koshcheev, L. A. Basic Principles of Interstate Electrical Power links Organization in North-East Asia. High Voltage Direct Current Transmission Research Institute. St-Petersburg.
- [8] IEC Commitee SC22F. Terminology for High Voltage Direct Current Transmission. IEC reference number 22F/37/CDV.
- [9] Woodford, Denis A. 1998. HVDC Transsmission. Manitoba HVDC Research Center. Kanada.
- [10] Cekdin, Cekmas. 2007. Sistem Tenaga Listrik: Contoh Soal dan Penyelesaiannya dengan Menggunakan Matlab. ANDI. Yogyakarta.
- [11] Sanghavi, H.A. and Banerjee, S.K. 1989. Load Flow Analysis of Integrated AC-DC Power System. IEEE. Vol 37. No.44. pp746-751.

