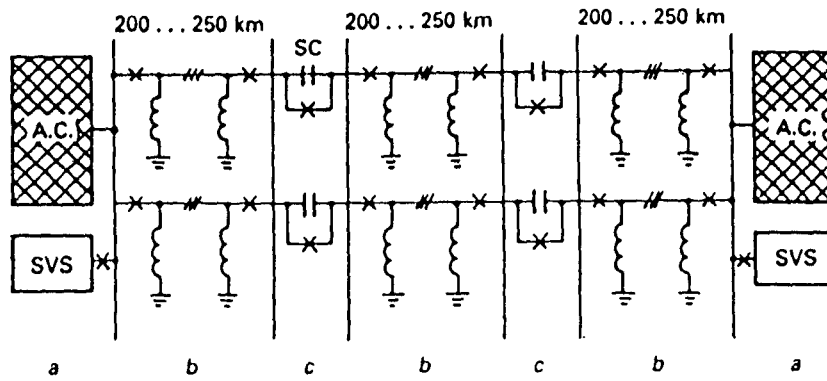


V. PERBANDINGAN TRANSMISI TEGANGAN TINGGI SEARAH DAN BOLAK-BALIK

Instalasi sistem transmisi tegangan tinggi mempunyai dua tujuan yaitu :

- a. Sebagai interkoneksi antara dua sistem kelistrikan
- b. Sebagai media penyaluran energi dari satu sistem kelistrikan ke sistem kelistrikan yang lain.

Apabila digunakan sebagai sistem interkoneksi, maka transmisi tegangan tinggi searah lebih sesuai digunakan. Transmisi tegangan tinggi bolak-balik kurang sesuai karena seringkali sistem yang diinterkoneksi mempunyai frekuensi yang berbeda. Hal ini tidak bisa dilakukan pada transmisi AC. Susunan transmisi tegangan tinggi bolak-balik adalah seperti pada gambar 5.1.



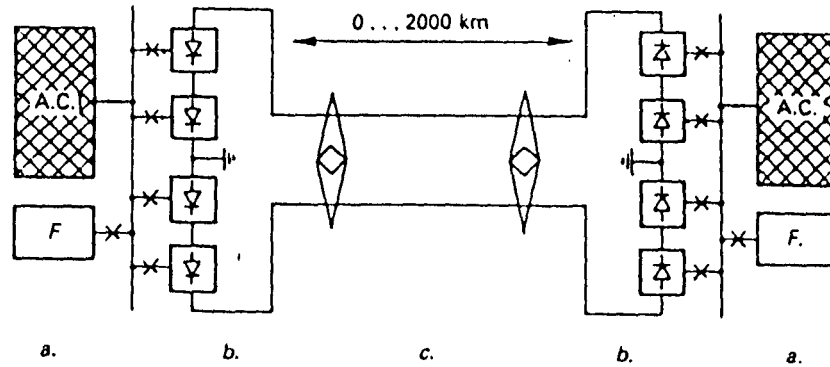
GAMBAR 5.1¹

SISTEM TRANSMISI TEGANGAN TINGGI BOLAK-BALIK

KE TERANGAN: A= SISTEM AC, B= SALURAN TRANSMISI AC, C= SUBSTASIUN, SVS= STATIC VAR SOURCE, SC= SERIES CAPACITORS

Apabila tujuan instalasi sebagai media penyaluran energi dari suatu sistem kelistrikan ke sistem kelistrikan yang lain, ada beberapa cara yang dapat dipergunakan. Untuk tiap kasus, pemilihan jenis transmisi yang digunakan banyak ditentukan oleh pertimbangan ekonomis. Apabila jarak transmisi cukup jauh maka transmisi tegangan tinggi searah lebih menguntungkan secara ekonomis meskipun untuk transmisi tegangan tinggi searah stasiun searah ini diperlukan tambahan stasiun konverter. Susunan transmisi tegangan tinggi searah adalah seperti pada gambar 5.2.

1. J. AFRILLAGA, HVDC Transmission hal 207



GAMBAR 5.2¹

SISTEM TRANSMISI TEGANGAN TINGGI SEARAH

KETERANGAN: A= SISTEM AC, B= STASIUN KONVERTER, C= SALURAN TRANSMISI DC, F= FILTER

Dalam pemilihan jenis transmisi yang akan dipergunakan, faktor biaya bukanlah satu-satunya faktor yang menentukan. Ada beberapa hal lain yang perlu dipertimbangkan, antara lain adalah:

- a. Keandalan sistem selama beroperasi dan waktu terjadi gangguan.
- b. Kapasitas pembebanan maksimum (maximum loading capability) dari sistem .
- c. Kemungkinan pengembangan sistem transmisi

1. J. ARRILLAGA, HVDC Transmission hal 207

1. SALURAN TRANSMISI SEBAGAI MEDIA PENYALURAN ENERGI

Apabila saluran transmisi lebih ditekankan sebagai media penyaluran energi maka penggunaan transmisi tegangan tinggi searah adalah tepat. Untuk kapasitas daya saluran yang sama, biaya pada saluran lebih rendah dibandingkan dengan transmisi tegangan bolak-balik, meskipun pada transmisi tegangan tinggi searah diperlukan biaya tambahan untuk stasiun konverter.

Dalam penentuan jenis transmisi yang akan dipergunakan, jarak penyaluran selalu merupakan pertimbangan utama. Pengaruh jarak penyaluran terhadap karakteristik transmisi dibahas pada bagian di bawah ini.

1.1 Daya Reaktif Dan Regulasi Tegangan

Pada over head line yang jauh pada transmisi tegangan tinggi AC dan kabel-kabel transmisi AC, daya reaktif pada saluran seringkali menimbulkan masalah. Pada saluran transmisi dengan nilai induktansi L dan kapasitas C untuk tiap satuan panjang, yang bekerja pada tegangan V dan arus I akan menghasilkan daya reaktif sebesar :

$$Q_C = \omega CV^2$$

dan mengkonsumsi daya reaktif sebesar :

$$Q_L = \omega LI^2$$

untuk setiap satu satuan panjang saluran. Daya reaktif yang dihasilkan akan sama besar dengan daya yang dikonsumsi jika

dipenuhi :

$$wCV^2 = wLI^2$$

sehingga :

$$\frac{V}{I} = \frac{L}{C} = Z_S$$

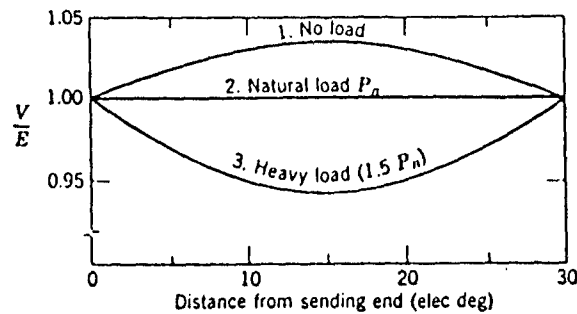
Pada kondisi seperti ini impedansi beban adalah Z_S , yang disebut dengan surge impedance dari saluran. Surge impedance dari OHL dengan satu konduktor adalah 400 Ω dan OHL dengan bundle konduktor adalah 300 Ω , sedangkan pada kabel hanya sekitar 15 sampai 25 Ω .

Daya pada saluran adalah sebesar:

$$P_n = VI = \frac{V^2}{Z_S}$$

P_n adalah surge impedance loading atau disebut juga beban alami (natural load). Dari persamaan di atas terlihat bahwa beban alami tidak tergantung pada jarak penyaluran, tetapi hanya bergantung pada tegangan kerja (sebanding dengan pangkat dua) dan berbanding terbalik dengan surge impedance.

Jika saluran transmisi hanya terbebani oleh beban alami maka magnitudo tegangan adalah selalu sama di mana saja dan daya reaktif pada saluran adalah nol, seperti terlihat pada kurva 2 pada gambar 5.3.



GAMBAR 5.3¹

**MAGNITUDE TEGANGAN SEPANJANG SEPERDUABELAS PANJANG
GELOMBANG DIBANDING DENGAN TEGANGAN TERMINAL E**

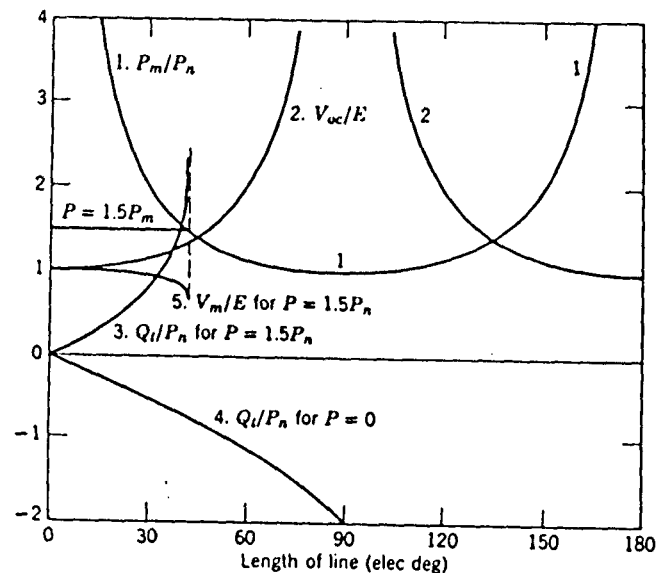
Di dalam prakteknya, saluran transmisi tidak bisa selalu beroperasi pada beban alami. Pada transmisi OHL biasanya beban adalah lebih besar dari pada beban alami. Jika beban lebih besar daripada beban alami maka daya reaktif yang dikonsumsi saluran adalah lebih besar daripada daya reaktif yang dihasilkan saluran, oleh sebab itu daya reaktif harus dicatu dari ujung saluran. Apabila tegangan pada kedua ujung saluran sama besar, maka daya reaktif yang dicatu dari kedua ujung ini sama besar. Magnitude tegangan pada saluran transmisi tidak sama besar, magnitude terkecil pada bagian tengah saluran transmisi, seperti terlihat pada kurva 3 gambar 5.3.

Apabila beban saluran lebih kecil daripada beban alami maka daya reaktif yang dihasilkan saluran adalah lebih

1. E.W.KIMBARK, Direct Current Transmission hal 21

besar daripada daya reaktif yang dikonsumsi, sehingga daya reaktif ini disalurkan pada kedua ujung saluran transmisi.

Jadi untuk mendapatkan tegangan yang sama pada kedua ujung saluran, harus ada pengaturan daya reaktif. Pada beban ringan daya reaktif harus ditarik dari saluran, sebaliknya pada beban tinggi daya reaktif harus dicatukan. Daya reaktif yang harus ditarik atau dicatukan ini selain bergantung pada nilai beban juga bergantung pada jarak penyaluran. Perubahan daya reaktif yang diperlukan terhadap jarak penyaluran dapat dilihat pada kurva 3 dan kurva 4 dari gambar 5.4.



GAMBAR 5.4¹

KARAKTERISTIK SALURAN DENGAN RUGI-RUGI YANG DIABAIKAN
DENGAN TEGANGAN PADA KEDUA UJUNG SALURAN YANG SAMA BESAR

1. E.W.KIMBARK, Direct Current Transmission hal 22

Jika dikehendaki tegangan pada ujung pengirim yang tetap dan faktor daya pada ujung penerima yang tetap maka tegangan ujung penerima akan berubah terhadap beban. Pada beban ringan tegangan menjadi tinggi, sebaliknya pada beban tinggi tegangan menjadi rendah. Perubahan tegangan pada ujung penerima ini semakin besar jika jarak penyaluran semakin jauh (sampai seperempat panjang gelombang) . Untuk transmisi jarak jauh perubahan tegangan pada ujung penerima ini sangat besar dan tidak bisa ditoleransi lagi, sehingga harus dilakukan pengaturan daya reaktif agar tegangan pada ujung penerima bisa tetap. Pada saluran OHL dengan panjang saluran lebih dari 400 km, daya reaktif biasanya disuplai ke terminal. Untuk saat ini biasanya digunakan shunt kapasitor.

Kesulitan lain pada transmisi pada tegangan tinggi bolak-balik adalah adanya batasan daya yang dapat disalurkan untuk panjang saluran tertentu. Ini dapat dijelaskan dengan acuan kurva 1 dalam gambar. Dari gambar tersebut dapat dilihat bahwa untuk saluran sepanjang 1 daya maksimum yang dapat disalurkan adalah mengikuti kurva 1, yaitu dengan persamaan :

$$P_m = P_n \sec \theta$$

dimana :

$$\theta = l \sqrt{LC} = \frac{2\pi l}{\lambda} = \beta l$$

adalah panjang saluran dalam derajat listrik, l adalah panjang saluran sesungguhnya dan λ adalah panjang gelombang

tegangan bolak-balik. Bila beban jauh lebih besar dari natural load maka ada pembatasan jarak penyaluran. Sebagai contoh pada gambar 5.4 adalah pada saat daya yang disalurkan lebih besar dari pada beban alami, yaitu:

$$P_m = 1,5 P_n$$

sehingga

$$1,5 P_n = P_n \sec \theta$$

$$1,5 = \sec \theta$$

$$\theta = \arccos 1,5 = 41,8^\circ = 0,73 \text{ rad}$$

dengan nilai $\theta = 41,8^\circ$ dan frekuensi 50 Hz, panjang saluran l dapat dihitung sebagai berikut:

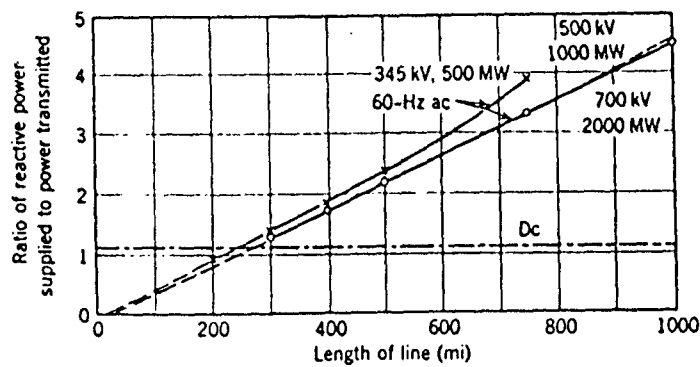
$$\begin{aligned} \theta &= \frac{2\pi l}{\lambda} \\ \lambda &= \frac{3 \times 10^8}{50} \\ l &= \frac{\lambda \theta}{2\pi} = \frac{3 \times 10^8}{50} \times \frac{0,37}{2\pi} \\ &= 697,09 \text{ km} \end{aligned}$$

Jadi dengan daya penyaluran sebesar 1,5 kali beban alami, pada jarak 697,09 Km daya reaktif yang harus dicatukan ke saluran menjadi sangat besar (kurva 3) dan tegangan pada tengah saluran turun (kurva 5). Dengan perkataan lain untuk saluran transmisi sepanjang 697,09 Km daya yang dapat disalurkan adalah terbatas sebesar 1,5 kali beban alami saja.

Untuk mengatasi masalah-masalah pada transmisi tegangan tinggi bolak-balik ini maka diperlukan kompensasi baik secara seri ataupun shunt. Kompensasi ini dipasang pada setiap selang jarak penyaluran tertentu.

Sedangkan pada transmisi tegangan tinggi searah tidak dijumpai masalah daya reaktif ini pada saluran transmisinya karena faktor daya di dalam saluran searah adalah selalu satu. Jatuh tegangan (voltage drop) pada saluran transmisi hanya merupakan jatuh tegangan resistif RI saja. Saluran transmisi DC sendiri tidak membutuhkan daya reaktif tetapi stasiun konverter di kedua ujung saluran membutuhkan daya reaktif yang diambil dari kedua sistem listrik bolak-balik yang dihubungkan oleh saluran transmisi. Daya reaktif ini ditarik oleh stasiun konverter bergantung pada daya yang disalurkan, dan tidak bergantung pada jarak penyaluran.

Jadi baik pada transmisi tegangan tinggi bolak-balik ataupun tegangan tinggi searah tetap diperlukan suatu pencatutan daya reaktif. Pada transmisi tegangan tinggi bolak-balik besar daya reaktif yang harus dicatukan bergantung pada jarak penyaluran. Dari kurva 5.5 dapat dilihat untuk jarak penyaluran di atas 400 Km daya reaktif yang dibutuhkan oleh transmisi tegangan tinggi searah/DC adalah lebih sedikit daripada daya reaktif yang diperlukan oleh transmisi tegangan tinggi AC.



GAMBAR 5.5¹

PERBANDINGAN DAYA REAKTIF YANG DIPERLUKAN PADA SALURAN
TEGANGAN TINGGI AC DAN HVDC

1.2. Kestabilan

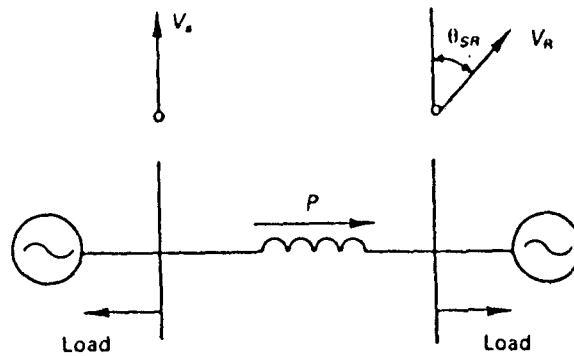
Masalah kestabilan ini menyangkut pada dua hal yaitu overhead lines dan kabel.

Transmisi pada overhead lines : Berdasarkan kurva 5.6, daya yang dapat disalurkan sepanjang saluran transmisi AC adalah mengikuti persamaan

$$P = \frac{V_s V_r}{X_{sr}} \sin \theta_{sr},$$

dimana V adalah tegangan rms dari sistem listrik AC, X adalah reaktansi seri dan θ adalah sudut beban dan S, R menyatakan ujung pengirim dan ujung penerima.

1. E.W.KIMBARK, Direct Current Transmission hal 24

GAMBAR 5.6¹

ALIRAN DAYA PADA SISTEM AC

Daya maksimum terjadi pada saat sudut $\theta = 90^\circ$, sehingga :

$$P_m = \frac{V_s V_r}{X_{sr}}$$

Nilai P_m ini adalah saat dicapainya batas kestabilan tunak. Nilai daya maksimum merupakan hasil kali tegangan pada kedua ujung saluran dibagi dengan reaktansi seri. Nilai reaktansi seri ini sebanding dengan panjang saluran. Jadi untuk tegangan tertentu, daya yang dapat disalurkan selain dibatasi oleh batas kestabilan tunak juga berbanding terbalik dengan panjang saluran.

Untuk menghindari gangguan kestabilan biasanya diusahakan nilai beban yang kecil, yaitu dibawah batas kestabilan peralihan. Batas kestabilan peralihan bernilai sekitar setengah dari batas kestabilan tunak, dan ini bersesuaian dengan nilai sudut $\theta = 30^\circ$. Jadi pada saluran

1. J.ARRILAGA, HVDC Transmission hal 209

transmisi AC, sudut θ dijaga di bawah 30° .

Sebaliknya pada transmisi HVDC tidak ada masalah kestabilan. Sistem listrik AC yang menghubungkan saluran DC tidak perlu beroperasi secara serempak. Tetapi pada transmisi DC masalah *overloading* harus lebih dibatasi.

Transmisi pada kabel : Transmisi tegangan tinggi dengan kabel jarang digunakan karena mahal dan jika terjadi kerusakan memerlukan waktu perbaikan yang lama. Penggunaan dengan kabel ini biasanya hanya untuk transmisi yang melewati laut.

1.3 Kapasitas Daya Pada Saluran

Bila saluran AC dan saluran DC menggunakan konduktor dan isolator yang sama dan arus yang mengalir dibatasi oleh kenaikan temperatur maka besar arus searah adalah sama dengan rms arus bolak-balik. Juga apabila penyekat kedua saluran sama, dan penyekat mempunyai kemampuan untuk menahan tegangan puncak yang sama maka tegangan searah adalah sebesar $\sqrt{2}$ kali tegangan rms bolak-balik.

Pada saluran transmisi DC, daya pada setiap konduktor adalah sebesar:

$$p_d = V_d I_d$$

dan daya pada saluran transmisi AC pada setiap konduktor adalah :

$$p_a = V_a I_a \cos \phi$$

di mana I_d dan I_a adalah arus yang mengalir pada konduktor

dan V_d dan V_a adalah tegangan dari konduktor ke bumi dan $\cos \phi$ adalah faktor daya. Sehingga perbandingan daya pada setiap konduktor untuk saluran transmisi searah dan saluran transmisi bolak-balik adalah :

$$\frac{P_d}{P_a} = \frac{V_d I_d}{V_a I_a \cos \phi} = \frac{\sqrt{2}}{\cos \phi}$$

Dari perbandingan di atas dapat diketahui bahwa harga perbandingannya selalu di atas satu, karena nilai $\cos \phi$ selalu kurang dari satu. Apabila dimisalkan harga $\cos \phi = 0,945$ maka harga perbandingan di atas adalah 1,5.

Dan apabila dilakukan perbandingan antara transmisi tegangan bolak-balik tiga phase, dengan tiga konduktor dan transmisi tegangan searah dwi kutub, maka didapat :

$$P_d = 2 \times p_d$$

$$P_a = 3 \times p_a$$

sehingga perbandingan daya pada kedua sistem transmisi tersebut adalah :

$$\frac{P_d}{P_a} = \frac{2 p_d}{3 p_a} = \frac{2}{3} \cdot \frac{3}{2} = 1$$

Dari hasil perbandingan di atas dapat dilihat bahwa saat faktor daya sebesar 0,945, kedua saluran transmisi mempunyai kapasitas penyaluran daya yang sama.

Jadi dari perhitungan di atas terbukti bahwa saluran DC adalah lebih sederhana dan murah karena hanya menggunakan dua konduktor. Konsekuensinya pada overhead lines saluran DC hanya membutuhkan 2/3 dari isolator pada transmisi AC dan tower pada saluran DC lebih sederhana dan

murah.

Pada kedua saluran AC dan DC, rugi-rugi daya tiap konduktor adalah sama besar, oleh karena itu rugi-rugi daya pada transmisi tegangan tinggi searah dwikutub hanya $2/3$ dari total rugi-rugi daya pada saluran transmisi AC tiga phase.

Bila kabel yang digunakan selain overhead lines, maka batas stress yang diperbolehkan pada kabel untuk saluran dwi, kutub DC lebih tinggi dari kabel pada transmisi AC tiga phase.

Perbandingan daya per konduktor yang dapat disalurkan antara transmisi DC dengan transmisi AC bisa mencapai 4 kali.¹

2. SALURAN TRANSMISI SEBAGAI INTERKONEKSI SISTEM KELISTRIKAN

Interkoneksi antara dua sistem kelistrikan mempunyai beberapa keuntungan, antara lain adalah:

- a. Interkoneksi akan lebih meningkatkan keandalan sistem kelistrikan, dibandingkan jika sistem listrik tersebut beroperasi secara terpisah.
- b. Khusus untuk pembangkitan daya dengan energi air, dengan interkoneksi maka dimungkinkan untuk penyusunan jadwal operasi pembangkit tenaga air secara lebih optimal. Hal ini berkaitan dengan jumlah cadangan air yang selalu

1. E.W.KIMBARK, Direct Current Transmission hal 30

berfluktuasi pada musim-musim tertentu.

Di dalam prakteknya seringkali penggunaan saluran transmisi tegangan tinggi bolak-balik sebagai interkoneksi antara dua sistem kelistrikan kurang sesuai.

Seringkali rating daya yang ekonomis pada interkoneksi nilainya sangat kecil dibandingkan dengan kapasitas daya sistem listrik. Pada kasus seperti ini saluran bolak-balik tidak akan mampu mengatasi aliran daya juga akan mengganggu kestabilan kedua sistem listrik, Untuk itu penggunaan saluran searah lebih disarankan, karena saluran searah mempunyai pengendalian aliran daya yang cepat tanpa memperhatikan kondisi pada sistem listrik bolak-balik. Di samping itu penggunaan saluran searah tidak akan mengganggu kestabilan kedua sistem kelistrikan bolak-balik.

Interkoneksi dengan saluran bolak-balik mengurangi nilai impedansi dari keseluruhan sistem. Hal ini menyebabkan meningkatnya arus hubung singkat. Arus hubung singkat ini bisa melebihi kemampuan pemutus rangkaian, atau juga bisa menyebabkan gangguan pada komponen lain.

Apabila kedua sistem listrik bolak-balik yang hendak diinterkoneksi mempunyai frekuensi yang berbeda misalnya 50 Hz dan 60 Hz, maka tidak mungkin digunakan saluran bolak-balik. Untuk kasus seperti ini digunakan saluran searah sebagai interkoneksi dua sistem kelistrikan dengan frekuensi berbeda. Contoh proyek yang digunakan untuk keperluan ini adalah jaringan Sakuma dan Shin-Shinano di Jepang.

Meskipun kedua sistem kelistrikan yang hendak di-

interkoneksi mempunyai frekuensi sama, tetapi mempunyai prinsip pengendalian yang berbeda maka penggunaan saluran bolak-balik juga kurang ekonomis. Prinsip pengendalian yang berbeda ini misalnya dikarenakan kedua sistem kelistrikan yang di-interkoneksi terletak pada dua negara yang berbeda. Penggunaan saluran searah untuk keperluan aliran daya dari satu sistem kelistrikan ke sistem kelistrikan yang lain tidak akan terjadi tanpa adanya pengendalian picuan pada stasiun konverter.

3. PROSPEK PENGGUNAAN HVDC TRANSMISSION DI INDONESIA

Penggunaan HVDC di Indonesia kemungkinan besar untuk penyaluran daya dari pulau Sumatra ke pulau Jawa. Di pulau Sumatra akan dibangun stasiun konverter di Bukit Asam, suatu daerah tambang batubara di Sumatra Utara dan stasiun inverter yang akan dibangun di Merak, Jawa Barat. Dimana saluran transmisinya adalah Overhead line sepanjang 360 km yang melewati Bukit Asam dan Ketapang dan kabel bawah laut sepanjang 35 km yang melewati Ketapang dan Merak.

Perlu dipertimbangkan pula keberadaan anak gunung Krakatau yang dapat meletus dalam jangka waktu yang tidak dapat diperkirakan, yang dapat mengganggu kestabilan dari sistem transmisi HVDC. Gambar 5.7 menunjukkan lokasi saluran transmisi HVDC yang menghubungkan pulau Jawa dan pulau Sumatra.



GAMBAR 5.7 1]

LOKASI SALURAN TRANSMISI HVDC YANG MENGHUBUNGAN
SUMATRA DAN JAWA

1. Kertas kerja seminar " Direct Current Transmission " di Jakarta, hal 196