

## ABSTRAK

Saluran transmisi merupakan bagian terbesar dari sistem sehingga peluang terkenanya gangguan menjadi lebih besar. Titik gangguan pada saluran transmisi bisa dianggap sebagai penambahan bus baru terhadap sistem yang sudah ada. Metode yang dikembangkan oleh H. E. Brown memungkinkan kita memodifikasi matriks impedansi bus untuk mengakomodasi tambahan bus akibat gangguan pada saluran tersebut. Selanjutnya perhitungan gangguan dilakukan dengan menggunakan matriks impedansi bus hasil modifikasi.

Hasil yang diperoleh menunjukkan bahwa terdapat titik pada saluran transmisi – meskipun tidak semua – yang arus hubung singkatnya lebih kecil dibandingkan dengan arus hubung singkat pada bus yang mengapit saluran tersebut, sehingga patut dipertimbangkan dalam perencanaan sistem proteksi.

# MODIFIKASI MATRIKS IMPEDANSI BUS UNTUK PERHITUNGAN GANGGUAN HUBUNG SINGKAT SATU FASA KE TANAH PADA SALURAN TRANSMISI

## I. Pendahuluan

Selama ini analisa gangguan hubung singkat dilakukan dengan menganggap gangguan terjadi tepat pada bus dan menghitungnya dengan menggunakan matriks impedansi bus ( $Z_{bus}$ ). Namun kenyataan di lapangan menunjukkan bahwa gangguan yang sering terjadi adalah pada saluran itu sendiri. Agar diperoleh hasil perhitungan yang lebih teliti perlu dilakukan analisa gangguan dengan memperhatikan lokasi gangguan pada saluran.

Dalam penelitian ini, titik gangguan pada saluran transmisi dianggap sebagai penambahan bus baru pada sistem yang sudah ada. Matriks impedansi bus yang telah ada kemudian dimodifikasi untuk mengakomodasi penambahan bus baru tersebut. Perhitungan hubung singkat akhirnya dilakukan dengan mengikuti prosedur normal dengan menggunakan matriks impedansi bus yang telah dimodifikasi tersebut.

Metode yang paling umum digunakan dalam perhitungan gangguan hubung singkat pada sistem tenaga listrik adalah dengan menggunakan matriks impedansi bus. Metode ini dipilih karena dapat dengan mudah diterapkan baik pada sistem berukuran kecil maupun besar dan lebih jauh dapat dikembangkan dalam bentuk program komputer digital [1].

Untuk sistem tiga fasa dalam skala besar, gangguan hubung singkat tak simetris sulit untuk dianalisa. Namun hal ini dapat diatasi sejak diperkenalkannya metode komponen simetris oleh C. L. Fortescue [2]. Menurut Fortescue, sistem tiga fasa tidak seimbang dapat dinyatakan dalam tiga jaringan ekuivalen tiga fasa seimbang, yaitu : jaringan urutan positif, jaringan urutan negatif dan jaringan urutan nol. Dengan demikian, perhitungan gangguan tak simetris dapat diperlakukan sebagai jaringan tiga fasa seimbang dengan bantuan ketiga jaringan urutan tersebut.

Dalam analisa dan perhitungan gangguan hubung singkat yang selama ini dilakukan, letak gangguan dari bus terdekat tidak diperhitungkan dengan menganggap gangguan terjadi pada bus tersebut. Pada hal terdapat impedansi saluran yang tergantung pada besarnya jarak antara bus dan letak gangguan, sehingga pengabaian jarak akan mengurangi ketelitian perhitungan [6].

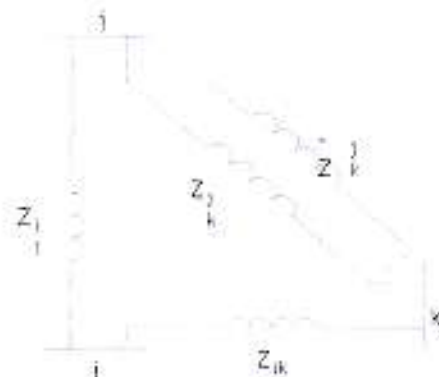
Dalam penelitian ini, titik gangguan pada saluran transmisi dianggap sebagai penambahan bus pada sistem yang telah ada. Matriks impedansi bus kemudian dimodifikasi untuk mengakomodasi penambahan bus baru tersebut. Prosedur ini dimungkinkan dengan menggunakan metode yang dikembangkan oleh H. E. Brown [4]. Brown memperkenalkan langkah-langkah perubahan matriks impedansi bus menjadi matriks impedansi bus yang baru, yaitu :

1. Penambahan bus baru ke bus referensi,
2. Penambahan saluran diantara bus yang sudah ada dengan bus referensi.
3. Penambahan bus baru melalui saluran ke bus yang sudah ada,
4. Penambahan saluran diantara dua bus yang sudah ada.

## II. Modifikasi Matriks Impedansi Bus Untuk Analisa Gangguan Di Saluran Transmisi.

Untuk dapat memodifikasi matriks impedansi bus yang lama menjadi matriks impedansi bus baru dilakukan langkah – langkah sebagai berikut :

1. Tambahkan impedansi baru sebesar minus impedansi lama pada bus j dan k yang telah ada seperti pada gambar 1.



Gambar 1. Penambahan impedansi –  $Z_{jk}$  pada bus j dan k yang telah ada  
Matriks impedansi bus berubah menjadi:

$$[Z_{bus}] = \begin{bmatrix} & & & & & & (Z_{1j} - Z_{jk}) \\ & & & & & & \vdots \\ & & & & & & (Z_{jn} - Z_{jk}) \\ & & & & & & (Z_{kj} - Z_{kk}) \\ & & & & & & \vdots \\ & & & & & & (Z_{nj} - Z_{nk}) \\ (Z_{ji} - Z_{ki}) \dots (Z_{kj} - Z_{kk}) \dots & & & & & & Z_{di} \end{bmatrix}$$

Dimana:  $Z_{sbl} = Z_{s1} + Z_{s2} - 2 Z_{s3} - Z_{s_{n-1},k}$

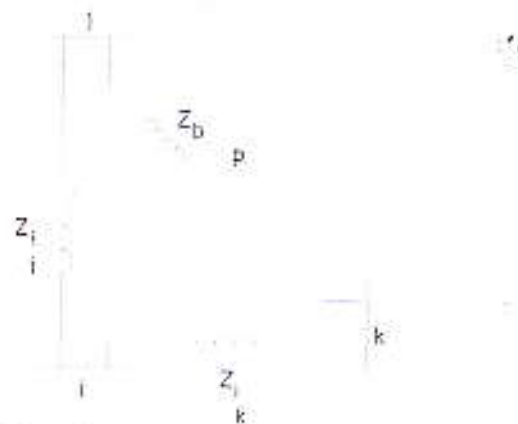
$Z_{s_{n-1},k}$  = impedansi asli saluran yang terganggu.

2. Mengeliminasi baris dan kolom terakhir matriks impedansi bus baru dengan reduksi krom sehingga jumlah baris dan kolom sesuai dengan jumlah bus yang ada.

Persamaan reduksi krom ini dapat dirumuskan:

$$Z_{jk,baru} = Z_{jk} - \frac{Z_{jp} \cdot Z_{pk}}{Z_{pp}}$$

1. Tambahkan  $Z_b$  dari bus baru  $p$  ( lokasi gangguan pada saluran ) ke bus  $j$  yang sudah ada seperti pada gambar 2.



Gambar 2. Penambahan impedansi  $Z_b$  dari bus baru  $p$  ke bus  $j$

Menghasilkan :

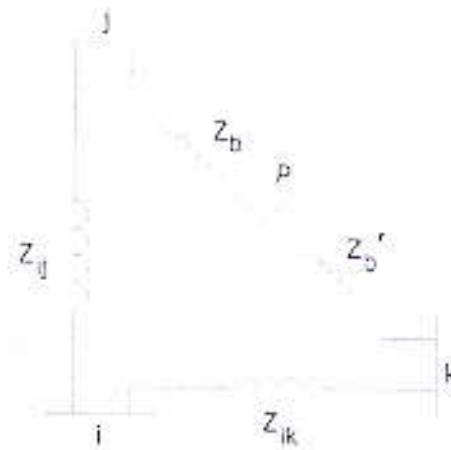
$$[Z_{bus}] = \left[ \begin{array}{cccc|c} & & & & Z_{11} \\ & & & & Z_{21} \\ & & & & \vdots \\ & & & & Z_{n1} \\ \hline Z_{11} & Z_{12} & \dots & Z_{1n} & Z_{11} + Z_b \end{array} \right]$$

Dimana:  $Z_{n1} = X_1 Z_{s_{n-1},k}$

$X_1$  = jarak gangguan dari bus  $j$  / panjang saluran  $jk$

$Z_{s_{n-1},k}$  =  $Z_{s_{n-1},k}$  ( dari langkah 2 )

2. Tambahkan  $Z_b'$  (impedansi sisa) antara bus p dan bus k yang telah ada seperti pada gambar 3.



Gambar 3. Penambahan impedansi  $Z_b'$  antara bus p dan k yang telah ada

Menghasilkan :

$$[Z_{bus}] = \begin{bmatrix} & & Z_{ij} & & \\ & & \vdots & & \\ & Z_{asli} & Z_{ij} & & \\ & & \vdots & & \\ & & Z_{ik} & & \\ & & & & \\ Z_{ij} & \dots & Z_{jn} & Z_{ij} + Z_b & \\ (Z_{p1} - Z_{k1}) & \dots & Z_{pn} - Z_{kn} & Z_{kb}' & \end{bmatrix}$$

Dimana:  $Z_{kb}' = Z_{ip} + Z_{ik} - 2Z_{pk} + Z_b'$

$$Z_b' = Z_{pk} = X_i Z_{bus,ik}$$

$X_i$  = jarak gangguan dari bus k / panjang saluran ik

3. Mengeliminasi baris dan kolom terakhir matriks impedansi bus baru dengan reduksi kron sehingga jumlah baris dan kolom sesuai dengan jumlah bus yang ada.

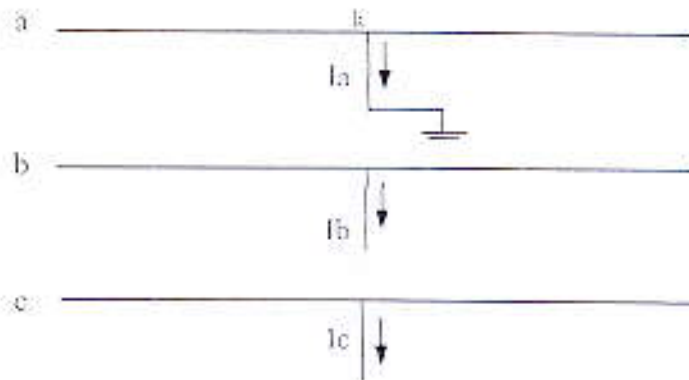
Persamaan reduksi kron ini dapat dirumuskan:

$$Z_{j_i, new} = Z_{jb} - \frac{Z_{jv} Z_{vk}}{Z_{vv}}$$

Matriks impedansi baru tersebut selanjutnya dapat digunakan untuk menghitung gangguan hubung singkat dengan lokasi gangguan pada bus bayangan yang dihentuk.

### III. Perhitungan Gangguan Hubung Singkat Satu Fasa ke Tanah

Untuk menganalisa gangguan satu fasa ke tanah, kita mengacu pada gambar saluran tiga fasa berikut ini :



Gambar 4. Diagram hubungan gangguan satu fasa ke tanah

Kondisi pada titik gangguan dinyatakan dengan persamaan berikut :

$$I_b = 0, \quad I_c = 0, \quad V_a = Z_f I_a$$

Arus fasa a dalam komponen simetris dinyatakan sebagai :

$$\begin{bmatrix} I_a^0 \\ I_a^1 \\ I_a^2 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \alpha & \alpha^2 \\ 1 & \alpha^2 & \alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

yang hasilnya adalah sebagai berikut :

$$I_a^0 = I_a^1 = I_a^2 = \frac{I_a}{3}$$

atau :

$$I_a = 3 I_a^0$$

Dalam analisis gangguan tak simetris, setiap jaringan urutan diperlakukan sendiri-sendiri kemudian digabungkan untuk mengetahui kondisi arus dan tegangan disetiap titik dalam sistem. Jika  $V_f$  adalah tegangan sesaat sebelum gangguan di bus k (bus gangguan), maka :

$$V_a^0 = - Z_{kk}^0 I_a^0$$

$$V_a^1 = V_f - Z_{kk}^1 I_a^1$$

$$V_a^2 = - Z_{kk}^2 I_a^2$$

Jika :

$$V_a = V_a^0 + V_a^1 + V_a^2 = 0, \text{ dan } I_a^0 = I_a^1 = I_a^2$$

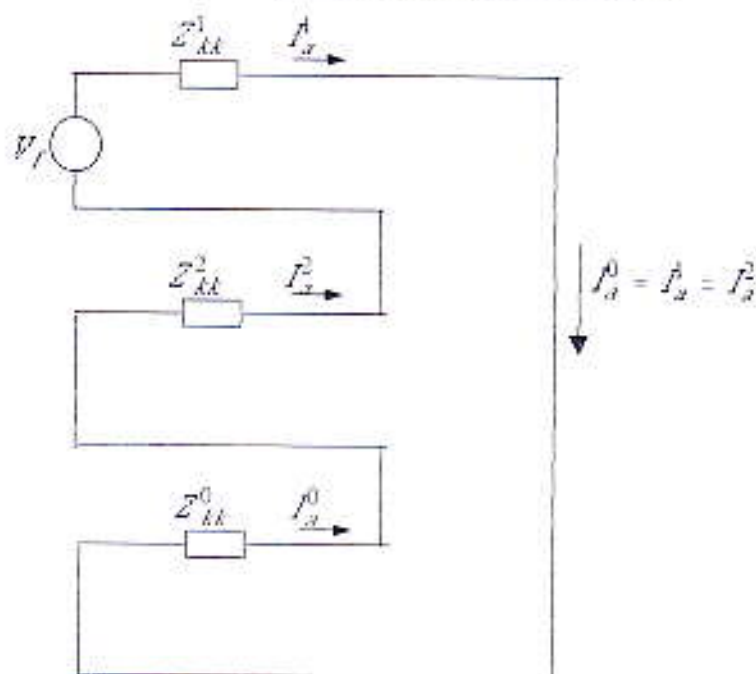
maka :

$$V_a = V_f - (Z_{kk}^0 + Z_{kk}^1 + Z_{kk}^2) I_a$$

atau :

$$I_a^0 = I_a^1 = I_a^2 = \frac{V_f}{Z_{kk}^0 + Z_{kk}^1 + Z_{kk}^2}$$

Rangkaian ekuivalen thevenin jaringan-jaringan urutan untuk gangguan hubung singkat satu fasa ke tanah, dihubungkan seperti pada gambar 5 berikut ini :



Gambar 5 Hubungan ekuivalen thevenin jaringan-jaringan urutan untuk hubung singkat satu fasa ke tanah

Besar tegangan di bus  $j$  untuk masing-masing jaringan urutan bisa dihitung dengan menggunakan persamaan berikut :

$$V_j^0 = - Z_{jk}^0 I_a^0$$

$$V_j^1 = V_f - Z_{jk}^1 I_a^1$$

$$V_j^2 = - Z_{jk}^2 I_a^2$$

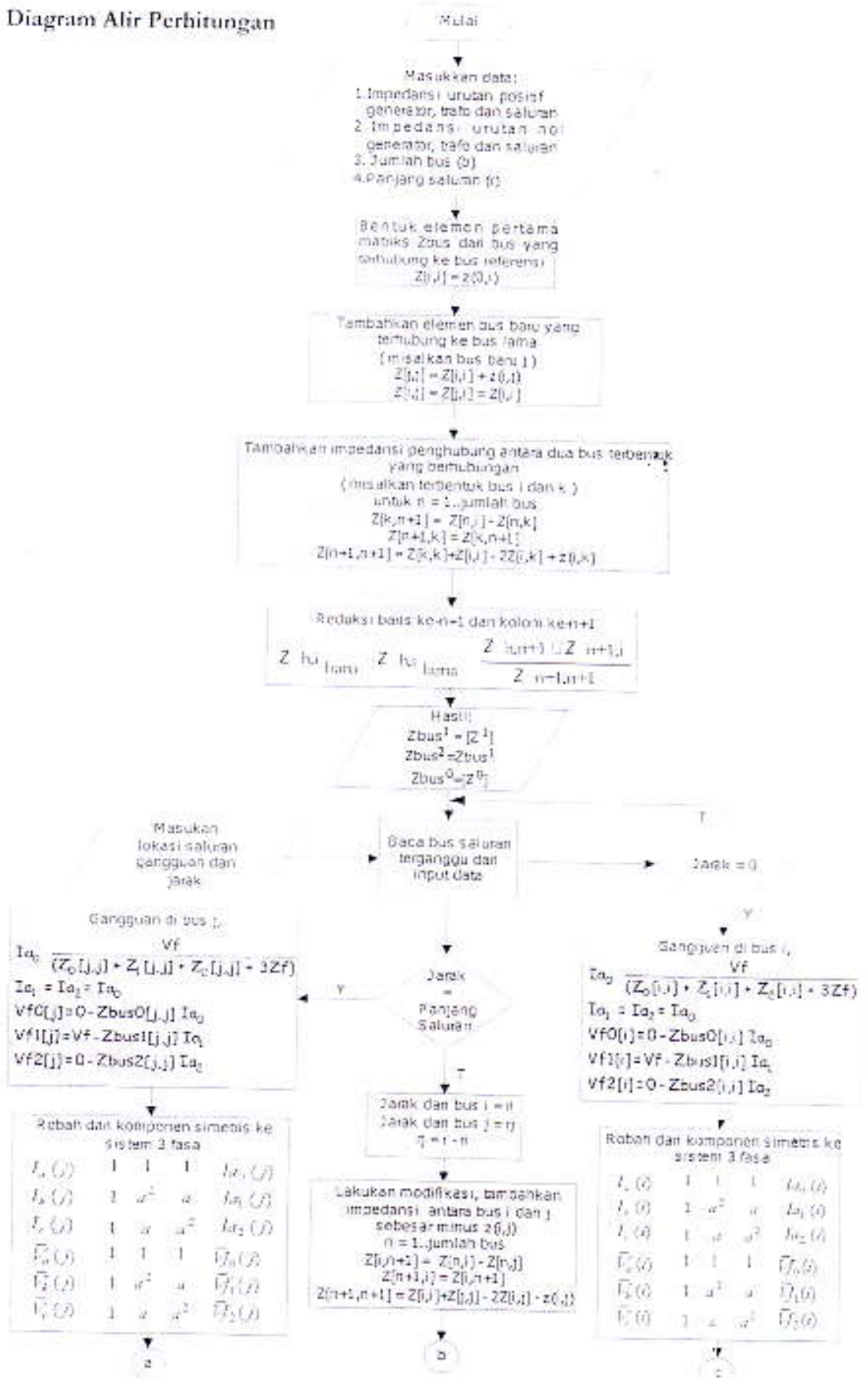
Dengan mengetahui tegangan setiap bus masing-masing jaringan acutan, arus setiap cabang selanjutnya bisa dihitung dengan menggunakan persamaan umum:

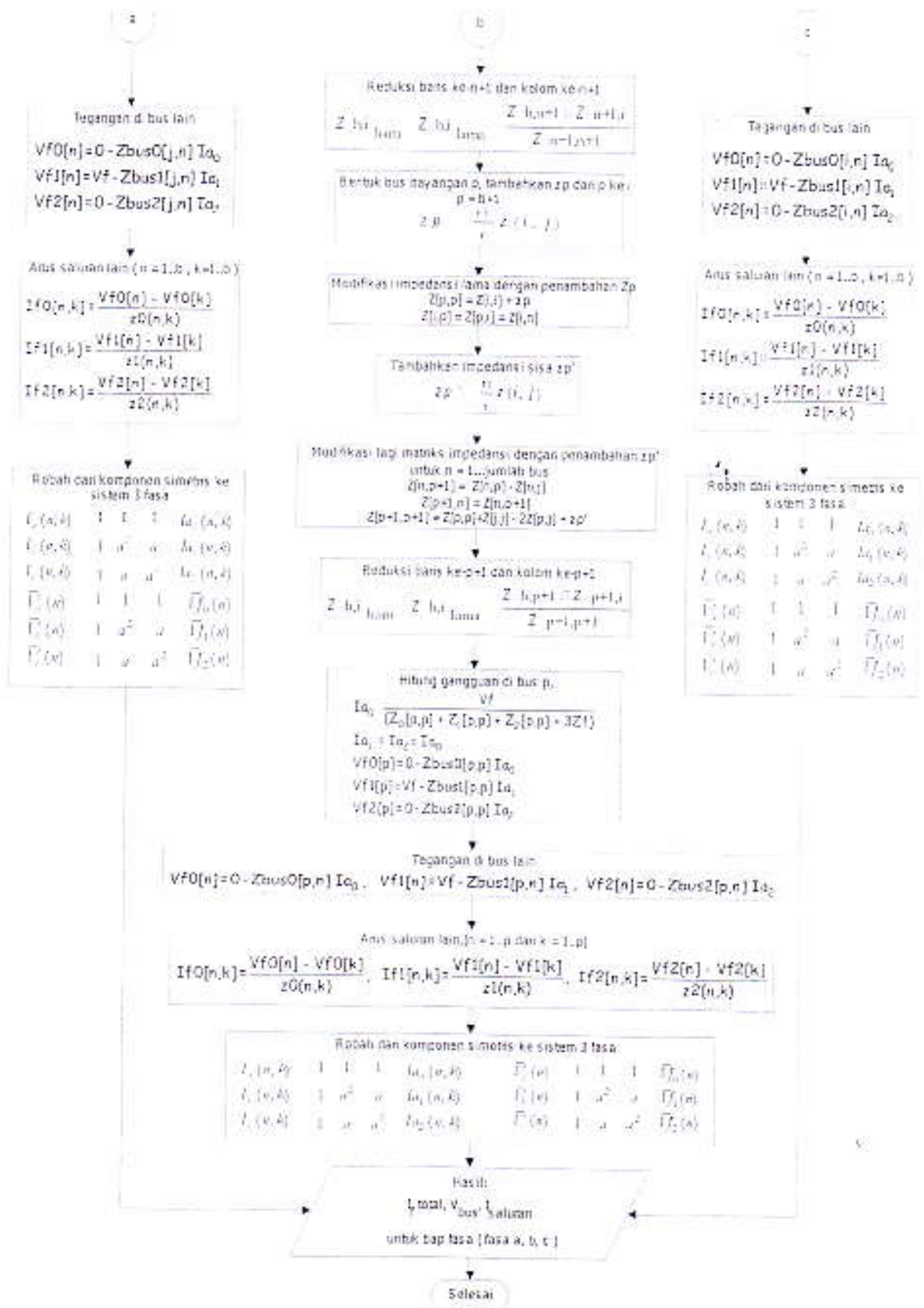
$$I_{ij} = \frac{V_i - V_j}{Z_{ij}}$$

Dimana  $Z_{ij}$  adalah impedansi primitif (impedansi asli) cabang.



#### IV. Diagram Alir Perhitungan





Gambar 6. Diagram alir perhitungan

## V. Hasil Dan Pembahasan

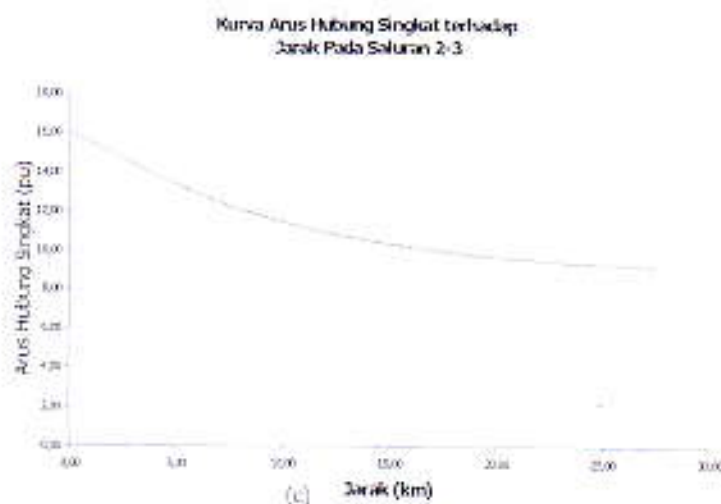
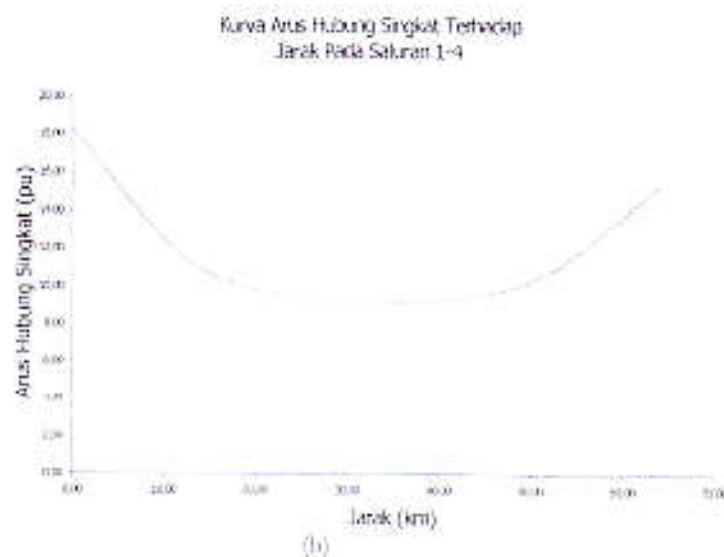
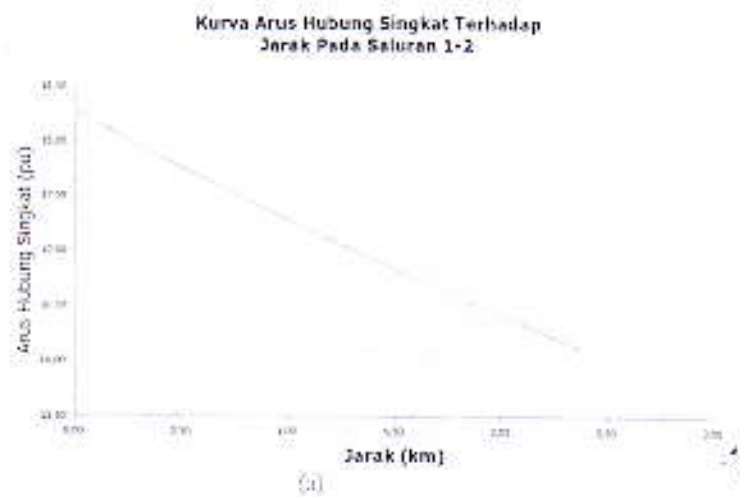
Dalam pembahasan ini data yang digunakan adalah sistem Sumbat – Riau, dan dapat dilihat di halaman lampiran. Generator+.txt dan generator0.txt adalah data impedansi urutan positif dan urutan nol generator, saluran+.txt dan saluran0.txt adalah impedansi urutan positif dan urutan nol saluran (termasuk trafo).

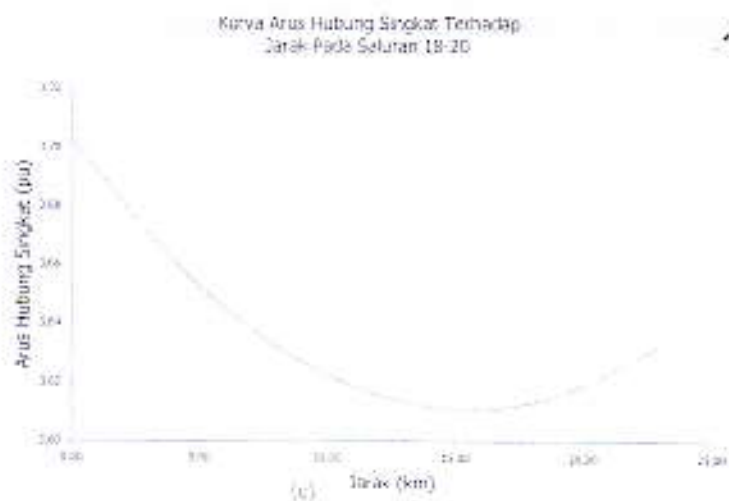
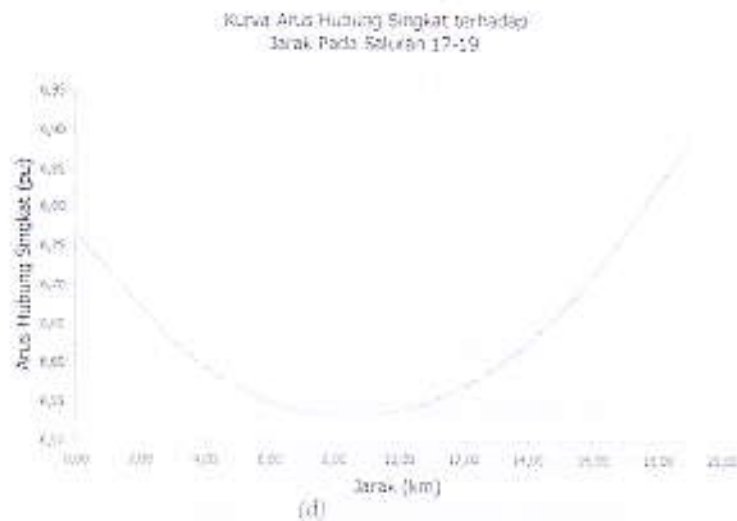
Untuk setiap saluran yang ditinjau, hubung singkat satu fasa disimulasikan terjadi pada titik-titik yang berjarak  $0, \frac{1}{5}, \frac{2}{5}, \frac{3}{5}, \frac{4}{5}$  dan  $\frac{5}{5}$  dari bus yang disebut pertama. Untuk saluran 1-2 yang panjangnya 2,417 km misalnya, hubung singkat disimulasikan terjadi pada jarak 0, 0,4834, 0,9668, 1,4502, 1,9336 dan 2,417 km dari bus 1.

Dengan bantuan program komputer berdasarkan algoritma pada halaman 8 diperoleh hasil-hasil yang dirangkum dalam tabel 1 berikut ini :

Lokasi Gangguan	Jarak Gangguan (km)	Arus Gangguan (pu)
Saluran 1-2	0	18,275
	0,483	17,779
	0,966	17,316
	1,450	16,881
	1,933	16,472
	2,417	16,088
Saluran 1-4	0	18,275
	12,790	11,331
	25,580	9,401
	38,370	9,207
	51,160	10,532
	63,951	15,265
Saluran 2-3	0	16,088
	5,946	12,951
	10,992	11,175
	16,448	10,119
	21,984	9,491
	27,480	9,1802
Saluran 17-19	0	6,766
	3,8	6,601
	7,6	6,534
	11,4	6,557
	15,2	6,672
	19	6,887
Saluran 18-20	0	3,703
	4,6	3,656
	9,2	3,626
	13,8	3,612
	18,4	3,614
	23	3,632

Hasil yang diperoleh dalam tabel 1 kemudian dibuatkan kurva hubungan arus hubung singkat terhadap jarak, akan tampak seperti pada gambar 7 di bawah ini :





Gambar 7. Kurva arus hubung singkat terhadap jarak pada berbagai saluran

Dari gambar 7.(a) dan (c) tampak bahwa arus hubung singkat satu fasa ke tanah pada saluran transmisi 1-2 semakin kecil dengan bertambahnya jarak dari bus 1. Hal ini sesuai dengan yang dihipotesiskan oleh karena pada bus 1 terhubung generator sedangkan pada bus 2 tidak, arus hubung singkat hampir berasal dari bus 1. Pada saluran 2-3 kasus yang sama terjadi meskipun baik bus 2 maupun bus 3 tidak terdapat generator. Hal ini terjadi karena jarak antara bus 2 terhadap bus 1 dimana terdapat generator lebih kecil dibandingkan jarak antara bus 3 terhadap bus 5 dimana juga terdapat generator. Faktor berikutnya adalah bahwa generator pada bus 1 mempunyai kapasitas yang jauh lebih besar dibandingkan dengan kapasitas generator pada bus 5, arus hubung singkat hampir semuanya berasal dari bus 2.

Pada gambar 7.(b), (d) dan (e) arus hubung singkat pada saluran umumnya lebih kecil dibandingkan dengan pada bus dimana saluran-saluran tersebut tersambung. Arus hubung singkat datang dari bus di kedua sisi saluran, namun demikian nilainya lebih kecil karena jaraknya relatif jauh dari bus yang padanya terhubung generator berkapasitas besar atau generator terdekat mempunyai kapasitas kecil.

Hasil yang diperoleh dalam penelitian ini menunjukkan bahwa besar arus hubung singkat tidak seragam. Sebagian, nilai terkecil berada pada bus, sebagian yang lain berada pada saluran transmisi pada jarak tertentu dari bus. Dengan demikian, jika sistem proteksi harus mampu mengantisipasi arus gangguan terkecil yang terjadi dalam sistem tenaga, maka perhitungan gangguan harus pula mempertimbangkan gangguan pada saluran transmisi - sebagaimana yang dilakukan dalam penelitian ini - disamping perhitungan pada bus.

## VI. Kesimpulan

1. Gangguan pada saluran transmisi bisa dihitung dengan menggunakan matriks impedansi bus yang telah dimodifikasi, dengan menganggap titik gangguan sebagai penambahan bus baru terhadap sistem yang sudah ada.
2. Arus gangguan pada saluran transmisi bisa lebih kecil dibandingkan dengan arus gangguan pada bus di kedua ujungnya sehingga patut dipertimbangkan dalam perencanaan sistem proteksi.

## Daftar Pustaka

1. John J. Grainger and William D. Stevenson, Jr., "Power System Analysis," Mc Graw Hill, Inc., New York, 1994.
2. C. L. Fortescue, "Method of Symmetrical Coordinates Applied to the Solution of Polyphase Network," Transaction of AIEE, Vol. 37, 1918.
3. G. W. Stagg and A. H. El-Abiad, "Computer Method in Power System Analysis," Mc Graw Hill, Inc., New York, 1968.
4. H. H. Brown, "Solution of Large Network by Matrix Method" 2<sup>nd</sup> edition, John Wiley & Sons, Inc., New York, 1985.
5. J. Arillaga and C. P. Arnold, "Computer Analysis of Power System," John Wiley & Sons, Inc., New York, 1990.
6. W. A. Lewis, "The Transmission of Electric Power," Illinois Institute of Technology Chicago, Illinois, 1984.

### Ucapan terima Kasih

Pada kesempatan ini, kami ingin menyampaikan terima kasih kepada ketua Lembaga Penelitian Universitas Andalas atas bantuan dana yang diberikan.

### Personalia Peneliti

#### 1. Peneliti Utama

Nama : Abdul Rajah, M.T.  
Tempat/Tanggal Lahir : Seppong/24 Oktober 1971  
Pangkat/Golongan : Ahli Madya/IIIa  
Pekerjaan : Dosen Teknik Elektro, Unand  
Jabatan : Ketua Peneliti

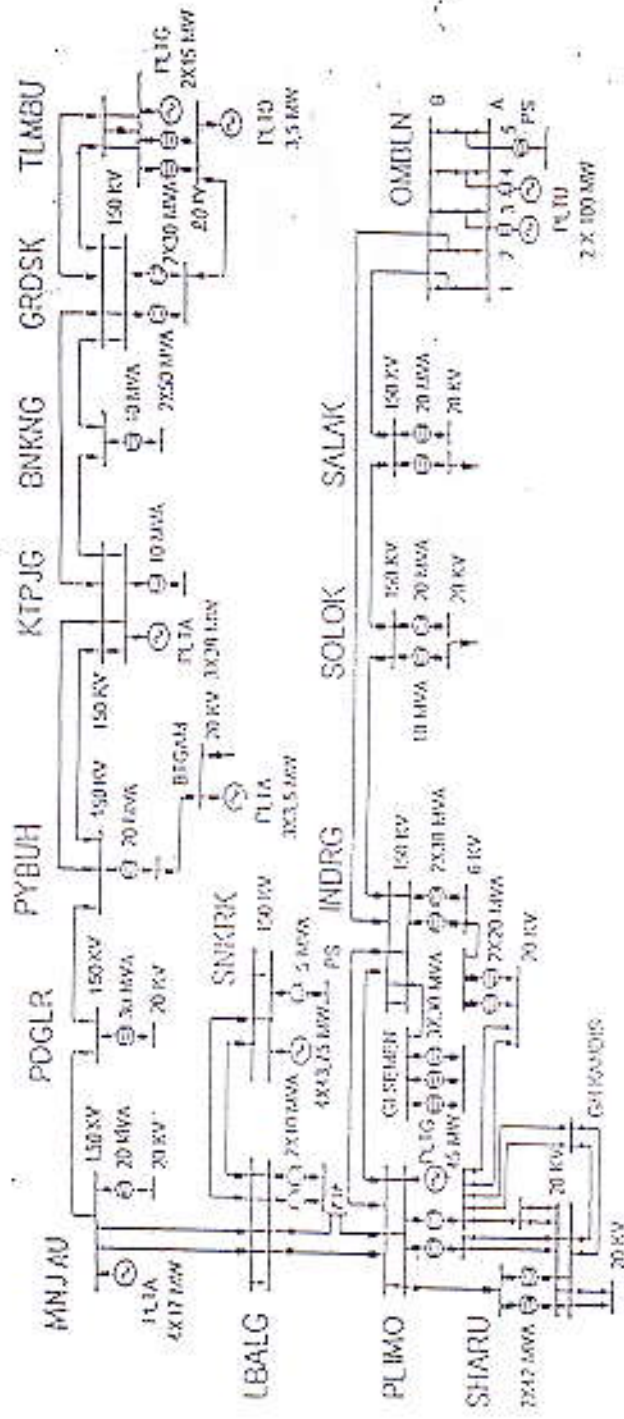
#### 2. Anggota

Nama : Ichwan Yelfianhar  
Pekerjaan : Mahasiswa Teknik Elektro Unand  
Jabatan : Anggota

#### 3. Pembimbing

Nama : Ir. Refdinal Nazir, PhD.  
Tempat/Tanggal Lahir : Padang/28 September 1958  
Pangkat/Golongan : Penata Tk. I/IIIa  
Pekerjaan : Dosen Teknik Elektro, Unand  
Jabatan : Pembimbing

# DIAGRAM SATU GARIS SISTEM SUMBAR RIAU



UPB Sumbar Riau

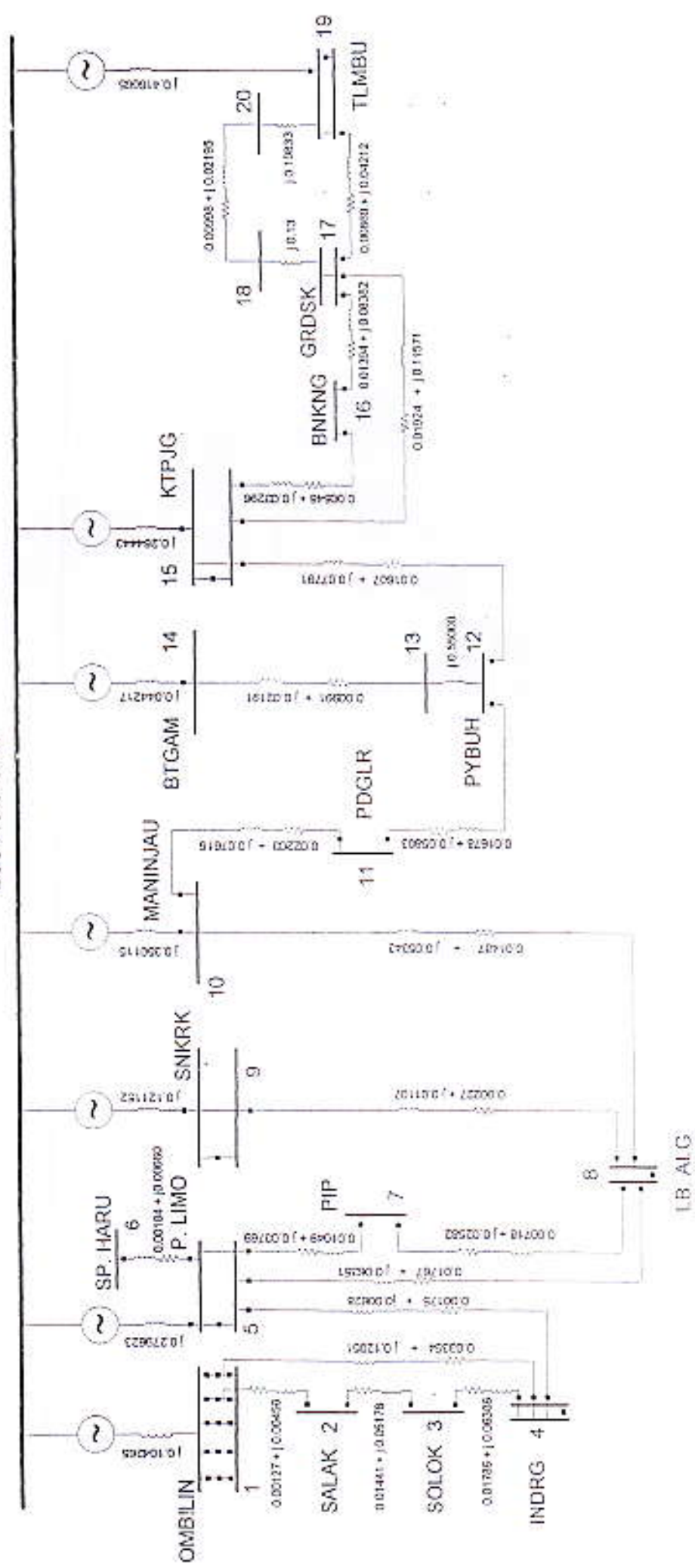
LAMPIRAN





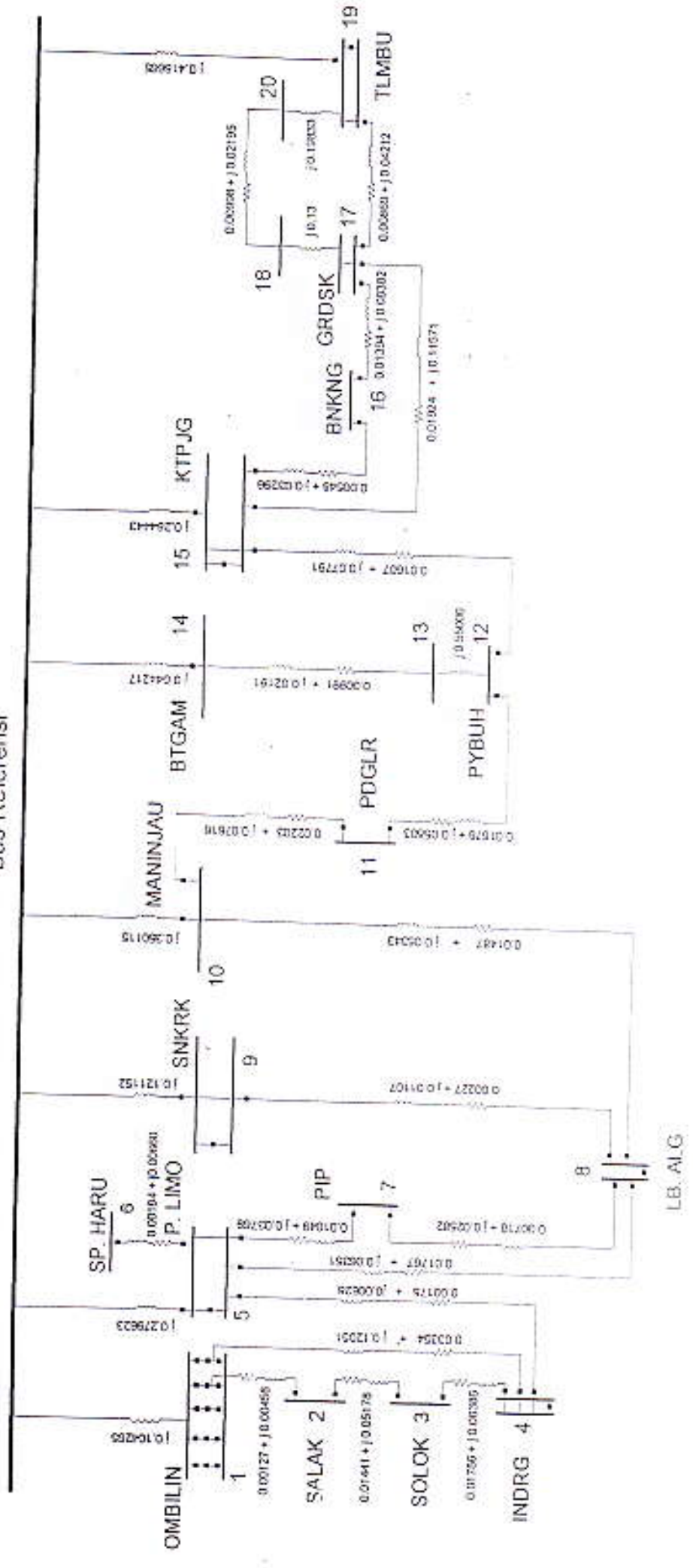
# Jaringan Ekuivalen Urutan Positif Saluran Transmisi Sistem Sumbang - Riau

Bus Referensi



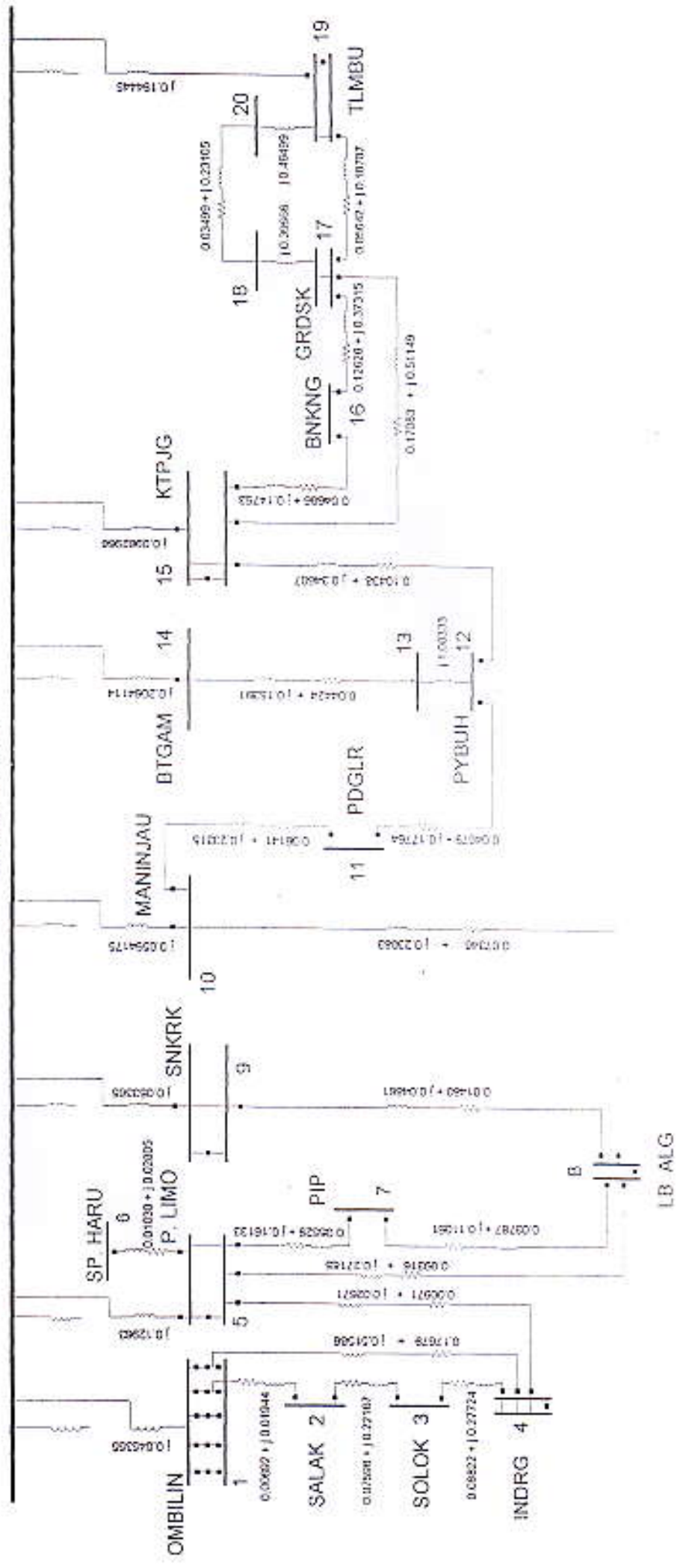
# Jaringan Ekuivalen Urutan Negatif Saluran Transmisi Sistem Sumbang - Riau

Bus Referensi



# Jaringan Ekuivalen Urutan Nol Saluran Transmisi Sistem Sumbar - Riau

## Bus Referensi



## Lampiran

### Data Sistem Sumbar-Riau

#### Generator++.txt

Bus	ke Bus	Impedansi Perunit	
		R	X
0	1	0.0	0.104265
0	5	0.0	0.279623
0	9	0.0	0.121152
0	10	0.0	0.350115
0	14	0.0	0.044217
0	15	0.0	0.264443
0	19	0.0	0.416665

#### Generator0.txt

Bus	ke Bus	Impedansi Perunit	
		R	X0+3Xn
0	1	0.0	0.045355
0	5	0.0	0.12963
0	9	0.0	0.053365
0	10	0.0	0.0594175
0	14	0.0	0.206411
0	15	0.0	0.096296
0	19	0.0	0.194445

#### Saluran++.txt

Bus	ke Bus	Impedansi Perunit	
		R	X
1	2	0.00127	0.00456
1	4	0.03354	0.12051
2	3	0.01441	0.05178
3	4	0.01786	0.06386
4	5	0.00175	0.00628
5	6	0.00184	0.00660
5	7	0.01049	0.03769
5	8	0.01767	0.06351
7	8	0.00718	0.02582
8	9	0.00227	0.01107
8	10	0.01487	0.05343
10	11	0.02203	0.07616
11	12	0.01678	0.05803
12	13	0.00000	0.55000
12	15	0.01607	0.07791
13	14	0.00991	0.02191
15	16	0.00548	0.03296
15	17	0.01924	0.11571
16	17	0.01394	0.08302
17	18	0.00000	0.13
17	19	0.00869	0.04212
18	20	0.00998	0.02195
19	20	0.00000	0.19833

#### Saluran0.txt

Bus	ke Bus	Impedansi Perunit	
		R0	X0
1	2	0.00692	0.01944
1	4	0.17679	0.51586
2	3	0.07596	0.22167
3	4	0.08822	0.27724
4	5	0.00971	0.02671
5	6	0.01030	0.02805
5	7	0.05529	0.16133
5	8	0.09316	0.27185
7	8	0.03787	0.11051
8	9	0.01480	0.04861
8	10	0.07346	0.23083
10	11	0.06141	0.23315
11	12	0.04679	0.17764
12	13	0.00000	1.08333
12	15	0.10438	0.34607
13	14	0.04424	0.15391
15	16	0.04686	0.14753
15	17	0.17083	0.51149
16	17	0.12626	0.37315
17	18	0.00000	0.39666
17	19	0.05642	0.18707
18	20	0.03499	0.23105
19	20	0.00000	0.46499

#### Panjang Saluran

Saluran	Panjang Saluran (km)	
Bus ke Bus		
1	2	2.417
1	4	63.951
2	3	27.48
3	4	34.054
4	5	6.66
5	6	7.0
5	7	20.0
5	8	33.7
7	8	13.7
8	9	12.0
8	10	56.7
10	11	42.0
11	12	32.0
12	13	1.0
12	15	85.1
13	14	15.0
15	16	18.4
15	17	64.6
16	17	46.8
17	18	1.0
17	19	19.0
18	20	23.0
19	20	1.0