

Analisis Gangguan Pada Sistem Tenaga Listrik Jawa Bali 500 kV Menggunakan Power World Simulator

¹Dwi Ajiatmo, ²Imam Robandi, ³Machrus Ali, ⁴Betta Aidya Suroya

^{1,3,4}Program Studi Teknik Elektro Universitas Darul ‘Ulum Jombang 61413

²Departemen Teknik ELEktro Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya 60111

¹ajiatmo@gmail.com, ²robandi@ee.its.ac.id, ³machrus7@gmail.com

Abstract, Short circuit is one type of interference that often occurs in electric power systems. The interference if it lasts a long time will affect the quality and continuity of electrical power distribution as well as the reliability and safety of the equipment on the system. To minimize the possibility of interference and to minimize the consequences caused by interference, an analysis of disturbances in the electric power system is needed. This study discusses the classification and analysis of disturbances in the electric power system. The type of interference in the electric power system is classified into two, namely symmetry and non-symmetrical interference. Symmetry disturbances are three phase disturbances which are described by the equation of the sequence of the symmetry component system. Sequence equations from the symmetry component system are positive sequence equations, negative sequence equations, and zero sequence equations. Non-symmetrical interference is a disorder that often occurs in electric power systems, namely the interference of one network to the ground, network interference to the network and interference of two networks to the ground. This research is to classify and to analyze the types of disturbances in the Java-Bali electric power system 500 kV 20 buses in the form of a single line diagram, using Power World Simulator and ETAP Software applications. The simulation results are calculated and display the simulation design of the power system with the tools contained in the program.

Intisari, Hubung singkat merupakan salah satu jenis gangguan yang sering terjadi pada sistem tenaga listrik. Gangguan tersebut jika berlangsung lama akan mempengaruhi kualitas dan kontinuitas penyaluran daya listrik serta keandalan dan keamanan peralatan pada sistem. Untuk memperkecil kemungkinan terjadi gangguan dan untuk memperkecil akibat yang ditimbulkan oleh gangguan, maka diperlukan suatu analisis terhadap gangguan pada sistem tenaga listrik. Penelitian ini membahas mengenai klasifikasi dan analisis gangguan pada sistem tenaga listrik. Jenis gangguan pada sistem tenaga listrik diklasifikasikan menjadi dua yaitu gangguan simetri dan gangguan tak simetri. Gangguan simetri yaitu gangguan tiga fasa yang digambarkan dengan persamaan urutan dari sistem komponen simetri. Persamaan urutan dari sistem komponen simetri yaitu persamaan urutan positif, persamaan urutan negatif dan persamaan urutan nol. Gangguan tak simetri merupakan gangguan yang sering

terjadi dalam sistem tenaga listrik yaitu gangguan satu jaringan ke tanah, gangguan jaringan ke jaringan dan gangguan dua jaringan ke tanah. Penelitian ini adalah untuk mengklasifikasikan dan untuk menganalisis jenis-jenis gangguan pada sistem tenaga listrik Jawa-Bali 500 kV 20 bus dalam bentuk single line diagram, menggunakan software aplikasi Power World Simulator dan Software ETAP. Hasil simulasi diperoleh perhitungan dan menampilkan desain simulasi dari sistem tenaga dengan tool yang terdapat pada program.

Kata Kunci: Power World Simulator, Jenis-jenis Gangguan, Transmisi Jawa-Bali 500 kV

I. PENDAHULUAN

Sistem tenaga listrik telah berperan sangat luas dalam perkembangan dan peningkatan kesejahteraan hidup manusia di segala bidang. Kualitas daya listrik dan penyelirannya harus selalu ditingkatkan untuk mencapai stabilitas daya dan efisiensi jaringan. Diantaranya dengan optimasi jaringan dengan merekonfigurasi jaringan atau perbaikan saluran agar diperoleh efisiensi yang baik[1][2]. Dalam sistem tenaga listrik juga tidak terlepas dari gangguan-gangguan, baik yang berupa gangguan internal maupun gangguan eksternal. Gangguan yang terjadi pada sistem tenaga listrik hampir semua berupa gangguan yang tidak simetri yaitu gangguan satu jaringan ke tanah, gangguan jaringan ke jaringan dan gangguan dua jaringan ke tanah [3][4]. Karena setiap gangguan tidak simetri menyebabkan adanya aliran arus tidak seimbang dalam sistem.

Hubung singkat yang terjadi dalam sistem tenaga dapat berupa gangguan tiga fasa. Akibat dari hubung singkat tiga fasa yaitu mengakibatkan harga impedansi sama dengan nol yang disebut dengan *bolted* hubung singkat atau mengakibatkan harga impedansi tidak sama dengan nol. Tipe lain dari gangguan tiga fasa meliputi *one-conductor-open* dan *two-conductor-open*, yaitu yang terjadi ketika kerusakan konduktor atau ketika satu atau dua fasa dari *circuit breaker* terbuka karena suatu gangguan atau kelalaian [5][6]

Kemungkinan terjadi gangguan hubung singkat tiga fasa sangat kecil, ketika gangguan keseimbangan tiga fasa terjadi dalam sistem tenaga listrik maka kemungkinan komponen simetri yang terjadi adalah persamaan urutan

positif, persamaan urutan negatif dan persamaan urutan nol [2]. Sedangkan jika gangguan ketidaksimetrian terjadi dalam sistem keseimbangan tenaga listrik, maka komponen simetri yang terjadi yaitu persamaan urutan yang hanya terhubung pada gangguan lokal. Perhitungan dari arus gangguan dilakukan dengan cara menyederhanakan perhitungan dengan menggunakan persamaan urutan. Seperti pada gangguan keseimbangan tiga fasa, gangguan ketidaksimetrian mempunyai dua komponen arus gangguan yaitu pada komponen AC meliputi arus subtransient, arus transient, arus steady-state dan pada komponen DC[7][8].

Pada penelitian ini menggunakan Power World Simulator untuk menganalisis arus gangguan simetri dan arus gangguan tidak simetri. Power World Simulator adalah bentuk tampilan simulasi desain sistem tenaga yang seluruh desain simulasi menggunakan hubungan dan interaksi yang tinggi antar elemen-elemen dari sistem tenaga listrik. Power World Simulator menampilkan solusi perhitungan dari masalah-masalah pada sistem tenaga listrik dengan cara memperkirakan, mendemonstrasikan perhitungan dan menampilkan desain simulasi dari sistem tenaga dengan *tool* yang terdapat pada program[1][9].

Penelitian ini adalah untuk analisis gangguan pada sistem tenaga listrik dengan cara mensimulasikan gangguan menggunakan Power World Simulator dengan objek gangguan sistem jaringan transmisi Jawa-bali 500 kV 20 bus [10].

Gangguan terjadi ketika dua atau lebih konduktor beroperasi normal dengan potensial yang berbeda saling berhubungan satu sama lain. Hubungan tersebut mungkin terjadi karena pergesekan konduktor dengan konduktor atau hubungan langsung konduktor dengan tanah[2].

Analisis gangguan atau hubung singkat adalah suatu sistem analisis yang esensial untuk digunakan pada teknik sistem tenaga listrik. Analisis disini digunakan untuk memperoleh arus gangguan dan tegangan fasa terganggu dengan cara menghitung persamaan urutan dari komponen simetri. Permasalahan disini yaitu menganalisis gangguan pada sistem tenaga listrik Jawa-Bali 500 kV 20 bus menggunakan bentuk simulasi. Untuk mensimulasikan sistem digunakan Power World Simulator. Tujuan dari penulisan penelitian ini yaitu untuk mengklasifikasikan dan untuk menganalisis jenis-jenis gangguan pada sistem tenaga listrik Jawa-Bali 500 kV 20 bus menggunakan Power World Simulation.

II. KAJIAN PUSTAKA

2.1. Power World

Power world simulator adalah bentuk analisis dan simulasi dari sistem tenaga dengan menggunakan suatu program komputer dalam bentuk desain *single line diagram*. Power World Simulator menampilkan solusi perhitungan dari masalah-masalah pada sistem tenaga dengan cara memperkirakan, mendemonstrasikan perhitungan dan menampilkan desain simulasi dari sistem tenaga dengan *tool* yang terdapat pada program.

Simulator merupakan hasil integrasi atau penggabungan dari element-element sistem tenaga yang digambar dalam bentuk tampilan *single line diagram*. Inti dari Simulator yaitu tampilan aliran dari sistem tenaga untuk memperoleh solusi secara efektif dari 60.000 kasus. Untuk membuat simulasi yang benar digunakan analisis tampilan dengan *Power Flow Standalone*. Tampilan *Power Flow Standalone* tidak sama dengan tampilan yang didapat pada tampilan *Power Flow*, tetapi *Power Flow Standalone* pada simulator menggunakan sistem visual yang menggunakan diagram animasi satu garis dengan warna dan mempunyai kemampuan untuk merencanakan desain sistem tenaga[11][12]. Lebih dari itu, desain sistem tenaga dapat dimodifikasi pada tampilan layar dan dapat memodifikasi tampilan desain sistem tenaga yang sudah ada dengan menggunakan editor grafik simulator *full-featured*. Jaringan transmisi dapat ditampilkan atau tidak ditampilkan dari tampilan layar, transmisi baru dan generator dapat tampilan dalam keadaan yang lebih stabil, tampilan tersebut dapat dilakukan hanya dengan menekan bagian pada mouse. Simulator digunakan secara luas dalam bentuk tampilan grafik dan animasi dengan memanfaatkan perintah yang ada dari beberapa karakter pada sistem, problem dan *constraint*.

Simulator juga menggunakan medium dari perkembangan simulasi yaitu *over time power system*, beban, generator, pengganti variasi durasi *over time*, perintah untuk mengulang keadaan sistem tenaga yang ditampilkan. Sebagai tambahan dalam perencanaan, Power World Simulator menggunakan penambahan *economic dispatch*, analisis ekonomi daerah kerja, perhitungan faktor distribusi transfer tenaga (Power Transfer Distribution Factor atau PTDF), analisis hubung singkat dan analisis kemungkinan gangguan. Perencanaan ini sangat mempermudah dalam mengoperasikan dan menjalankan sistem tenaga dan instalasi dengan cepat.

Jenis gangguan pada sistem tenaga listrik diklasifikasikan menjadi dua yaitu gangguan simetri dan gangguan tak simetri. Gangguan tak simetri merupakan gangguan yang sering terjadi dalam sistem tenaga listrik. Gangguan tiga fasa digambarkan dengan persamaan urutan dari sistem komponen simetri. Persamaan urutan dari sistem komponen simetri yaitu persamaan urutan positif, persamaan urutan negatif dan persamaan urutan nol. Operasi sistem tenaga listrik dibawah keadaan keseimbangan *steady-state* sebelum terjadi gangguan, persamaan jaringan positif, negatif dan nol adalah terbuka, sedangkan pada gangguan tak simetri hanya terhubung pada lokasi gangguan.

2.3. Gangguan Simetri

Gangguan simetri pada sistem tenaga didefinisikan sebagai gangguan tegangan lebih (*over voltage*) yang disebabkan oleh kebakaran, aliran listrik yang bergelombang atau karena kerusakan mekanik yang lain. Gangguan simetri meliputi gangguan hubung singkat tiga fasa (*Three Phase Short Circuit*) yang termasuk gangguan keseimbangan tiga fasa. Gangguan hubung singkat tiga fasa pada sistem

tenaga listrik dapat terjadi pada rangkaian seri R-L, pada motor sinkron dan generator sinkron[13].

2.3.1. Gangguan Keseimbangan Tiga fasa

Keadaan gangguan tiga fasa pada fasa a, b dan c , disimbolkan dengan impedansi gangguan yaitu Z_F . Tegangan fasa pada gangguan diberikan oleh :

$$I_1 = \frac{E}{Z_1 + Z_F}$$

$$I_{N-1} = \frac{V_F}{Z_{m-1}} \quad (1)$$

$$I_{n-0} = I_{n-0} = 0 \quad (2)$$

Dari Persamaan (1) dan (2) dapat disimpulkan bahwa persamaan urutan nol dan negatif tidak mempunyai arus atau sama dengan nol. Hanya persamaan urutan positif yang mempunyai harga dalam keadaan gangguan keseimbangan tiga fasa.

2.3.2. Gangguan Tak Simetri

Gangguan tak simetri yaitu gangguan pada sistem tenaga listrik yang disebabkan karena panjang gelombang listrik tidak sama dan sudut fasa dari ketiga fasa tidak sama yaitu 120° . Jenis gangguan tak simetri meliputi gangguan satu jaringan ke tanah (*Single Line-To-Ground Fault*), gangguan jaringan ke jaringan (*Line-To-Line Fault*), gangguan dua jaringan ke tanah (*Double Line-To-Ground*).

2.3.2.1. Gangguan Satu Jaringan ke Tanah

Diasumsikan bahwa fasa a adalah fasa yang terjadi hubung singkat ke tanah. menunjukkan gangguan hubung singkat satu jaringan ke tanah (*Single Line-To-Ground*). Arus pada fasa b dan c tidak mengalami gangguan sehingga dapat ditulis $I_B=0$ dan $I_C=0$.

Secara umum gangguan impedansi disimbolkan dengan Z_F . Dalam keadaan gangguan *Bolted* $Z_F = 0$ dan dalam keadaan gangguan busur api Z_F adalah impedansi busur api. Dalam masalah saluran transmisi insulator seri, Z_F merupakan jumlah gangguan impedansi diantara jaringan dan tanah, impedansi dari busur api dan tower transmisi pada bagian titik netral ke tanah [3]. Persamaan komponen dari arus fasa gangguan diberikan dengan persamaan

$$I_0 = I_1 = I_2 = \frac{V_F}{Z_0 + Z_1 + Z_2 + 3Z_F} \quad (3)$$

$$I_a = I_0 + I_1 + I_2 = 3I_1 = \frac{3V_F}{Z_0 + Z_1 + Z_2 + (3Z_F)} \quad (4)$$

$$I_b = (I_0 + a^2 I_1 + a I_2) = (1 + a^2 + a) I_1 = 0 \quad (5)$$

$$I_c = (I_0 + a I_1 + a^2 I_2) = (1 + a + a^2) I_1 = 0 \quad (6)$$

Dari Persamaan (5) dan (6) dibuktikan bahwa gangguan satu jaringan ke tanah ada hanya pada fasa a , tidak pada fasa b dan c .

Tegangan fasa gangguan pada gangguan satu jaringan ke tanah terdapat di fasa b dan fasa c , sedangkan di fasa a sama dengan nol.

$$V_a = 0 \quad (7)$$

$$V_b = \frac{E_b(1-\alpha)[Z_0 + (1+\alpha)Z_2]}{Z_2 + Z_1 + Z_0} \quad (8)$$

$$V_c = \frac{E_c(1-\alpha)[(1+\alpha)Z_0 + Z_1]}{Z_2 + Z_1 + Z_0} \quad (9)$$

2.3.2.2. Gangguan Jaringan ke Jaringan

Gangguan jaringan ke jaringan (*Line-To-Line*) diberikan dari fasa b ke fasa c . Selanjutnya diperoleh impedansi gangguan sistem yang disimbolkan dengan Z_F . Gangguan arus diberikan oleh persamaan

$$I_1 = -I_2 = \frac{V_F}{(Z_1 + Z_2 + Z_F)} \quad I_0 = 0 \quad (10)$$

Transformasi Persamaan ke daerah phase menggunakan persamaan $(a^2 - a) = -j\sqrt{3}$. Arus gangguan di fasa b adalah

$$I_b = I_0 + a^2 I_1 + a I_2 = (a^2 - a) I_1 = -j\sqrt{3} I_1 \quad (11)$$

$$= \frac{-j\sqrt{3} V_F}{(Z_1 + Z_2 + Z_F)}$$

$$I_a = I_0 + I_1 + I_2 = 0 \quad (12)$$

$$I_c = I_0 + a I_1 + a^2 I_2 = (a - a^2) I_1 = -I_b \quad (13)$$

2.3.2.3. Gangguan Dua Jaringan ke Tanah

Gangguan dua jaringan ke tanah (*Double Line-To-Ground*) dari fasa b ke fasa c dengan impedansi gangguan Z_F ke tanah. Arus gangguan persamaan urutan positif adalah

$$I_1 = \frac{V_F}{Z_1 + [Z_2 // Z_0 + 3Z_F]} \quad (14)$$

$$= \frac{V_F}{Z_1 + \left[\frac{Z_2 + (Z_0 + 3Z_F)}{Z_2 + Z_0 + Z_F} \right]}$$

arus gangguan persamaan negatif dan nol diberikan dengan persamaan

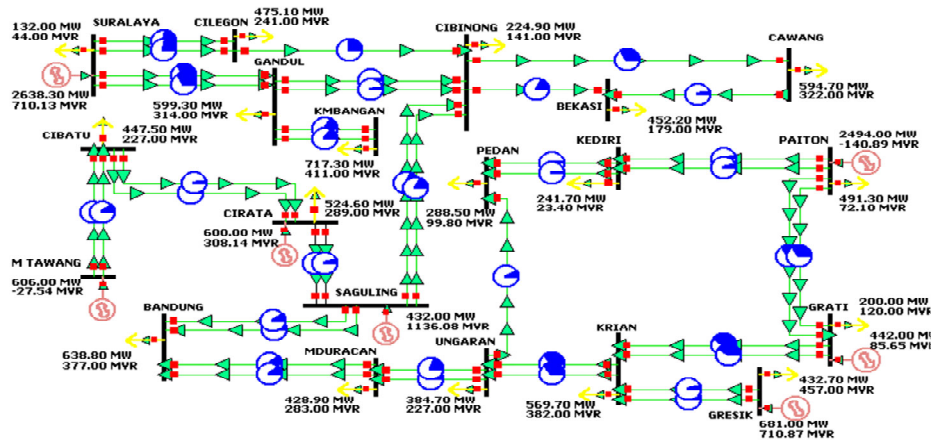
$$I_2 = (-I_1) \left(\frac{Z_0 + 3Z_F}{Z_0 + 3Z_F + Z_2} \right) \quad (15)$$

$$I_0 = (-I_1) \left(\frac{Z_2}{Z_0 + 3Z_F + Z_2} \right) \quad (16)$$

III. HASIL SIMULASI DAN ANALISIS

3.1. Desain Sistem Tenaga Listrik Jawa-Bali 500 kV 20 Bus

Pemodelan sistem untuk mendapatkan simulasi gangguan menggunakan single line diagram pada Power World Simulator, parameter-parameter yang digunakan untuk sistem tenaga listrik Jawa-Bali adalah dalam satuan parameter per-unit. Untuk simulasi gangguan ini digunakan data dari PLN pembangkit Jawa-Bali yaitu sistem tegangan transmisi 500 kV 20 Bus Jawa-Bali dengan panjang saluran 280.000 km. Sistem tenaga listrik Jawa-Bali ini terdiri dari 20 bus yang terhubung secara paralel dan 39 saluran serta 7 pusat pembangkitan. Data interkoneksi Jawa-Bali yang digunakan adalah data pada tahun 2005.



Gambar 1, Single Line Diagram Sistem Tenaga Jawa-Bali 500kV

Gambar 1 menunjukkan pemodelan sistem yang disimulasikan untuk mendeteksi jenis-jenis gangguan dalam bentuk *single line diagram*, Power World Simulator digunakan sebagai *tools* untuk menganalisis gangguan pada sistem tenaga listrik Jawa-Bali 500 kV. Data jaringan tenaga listrik pada sistem interkoneksi Jawa-Bali yang digunakan dapat dilihat pada Tabel 1 yang terdiri dari 20 bus dan 39 saluran serta 7 pusat pembangkit. Pada Tabel 2 menunjukkan data saluran. Base yang digunakan pada simulasi adalah sebagai berikut :

- a. Base tegangan 500 kV
- b. Base daya 50 MVA

Kemudian data bus-bus yang ada diklasifikasikan sebagai berikut

1. Slack bus (*swing*): Bus Suralaya
2. Bus generator : Bus Muaratawar, Bus Cirata, Bus Saguling, Bus Paiton, Bus Grati dan Bus Gresik
- Bus beban : Bus Bekasi, Bus Cilegon, Bus Cawang, Bus Kembangan, Bus Gandul, Bus Bandung, Bus Cibinong, Bus Cibatu, Bus Madurancan, Bus Pedan, Bus Kediri, Bus Krian dan Bus Ungaran

Tabel 1. Data Pembangkit dan Pembebanan Sistem Interkoneksi 500kV Jawa-Bali

No. Bus	Bus	Jenis	Pembangkit		Pembebanan	
			P (MW)	Q (Mvar)	P (MW)	Q (Mvar)
1	Suralaya	Slack	-	-	132	44
2	Cirata	Generator	600	-	524.6	289
3	Cibatu	Beban	0	0	447.5	227
4	Muara Tawar	Generator	606	-	0	0
5	Cibinong	Beban	0	0	224.9	141
6	Bekasi	Beban	0	0	452.2	179
7	Cawang	Beban	0	0	594.7	322
8	Gandul	Beban	0	0	599.3	314
9	Kembangan	Beban	0	0	717.3	411
10	Cilegon	Beban	0	0	475.1	241
11	Saguling	Generator	432	-	0	0
12	Bandung	Beban	0	0	638.8	377
13	Mandi Racan	Beban	0	0	428.9	283
14	Ungaran	Beban	0	0	384.7	227
15	Pedan	Beban	0	0	288.5	99.8
16	Krian	Beban	0	0	569.7	382
17	Gresik	Generator	681	-	432.7	457
18	Grati	Generator	442	-	200	120
19	Kediri	Beban	0	0	241.7	23.4
20	Paiton	Generator	2494	-	491.3	72.1

Tabel 2. Data Saluran Transmisi 500 kV Jawa-Bali

No Bus ke Bus	Jml. Circuit	Panjang(km)	R (pu)	X (pu)	B(pu)	Jenis Conductor	S Max (MVA)	
1	1-8	2	111	0.00065046	0.0062493	1.139	Dove	2178
2	1-10	2	12.48	6.26496E-05	7.0087E-04	0.1263	Ganet	2398
3	2-3	2	44.56	0.00026112	0.00250873	0.4733	Dove	2178
4	2-11	2	25.1	0.000147088	0.00141313	0.2537	Dove	2178
5	3-4	2	55	0.00033223	0.0030668	0.4855	Dove	2178
6	5-6	1	37.92	2.222E-04	0.00213489	0.0956	Dove	2178
7	5-7	1	57	0.00033402	0.0032091	0.13735	Dove	2178
8	5-8	2	21.3	0.000124818	0.00119919	0.2147	Dove	2178
9	5-10	1	116	0.00067976	0.0065308	0.32962	Ganet	2398
10	5-11	2	80.3	0.000470558	0.00452089	0.8179	Ganet	2398
11	6-7	1	18	0.00010548	0.0010134	0.04233	Dove	2178
12	8-9	2	31.9	0.000160138	0.00179150	0.3051	Ganet	2398
13	11-12	2	37.43	0.000187899	0.00210207	0.3797	Ganet	2398
14	12-13	2	130	0.0007618	0.007319	0.30006	Dove	2178
15	13-14	2	228	0.001340065	0.01287468	0.06489	Ganet	2398
16	14-15	1	75	0.0004395	0.004182	0.1890	Dove	2178
17	14-16	2	251	0.00147086	0.0141313	2.5311	Dove	2178
18	15-19	2	202.783	0.001015325	0.0119325	0.51175	Ganet	2398
19	16-17	2	22.2	0.000130092	0.00123787	0.2409	Ganet	2398
20	16-18	2	74	0.00037148	0.00415584	0.8038	Ganet	2398
21	18-20	2	74	0.00037148	0.00415584	0.8992	Ganet	2398
22	19-20	2	212.217	0.001065325	0.01138829	0.5395	Ganet	2398

3.3. Sistem Stabil

Gangguan terjadi bisa dari luar seperti gangguan sambaran petir atau terputusnya kawat jaringan dan gangguan dari dalam atau system yang bermasalah[14]. Kestabilan sistem tenaga ditunjukkan dengan kemampuan dari sistem untuk beroperasi dari keadaan subtransien menuju keadaan transien kemudian menuju keadaan *steady-state* tanpa mengalami rugi-rugi jaringan atau mendekati nol (≈ 0). Kestabilan sistem tenaga terbagi menjadi tiga tipe yaitu kestabilan *steady-state*, *transient*, dan *dinamik*.

Dalam penerapan pada sistem, tegangan transmisi berkurang ketika mengalami beban puncak dan mengalami tegangan lebih saat beban turun. Ketika tegangan pada posisi EHV (Extra High Voltage) yaitu antara 600-1500

volt, tegangan transmisi dipertahankan ± 5% dari tegangan rata-rata dan disesuaikan ± 10% dari tegangan regulator. Pada sistem tenaga listrik Jawa-Bali 500 kV, total daya yang dihasilkan dari 7 pusat pembangkitan yaitu 7893,3MW, 2782.2 Mvar dengan total daya yang digunakan pada beban sebesar 7843,9MW, 4209,3Mvar. Rugi-rugi daya yang terjadi dalam sistem sebesar 49.4MW, -1426,8Mvar. Tabel 3, menunjukkan suplay daya dari bus ke bus.

Tabel 3. Suplay Daya dari Bus Ke Bus

Dari	Nama Bus	Ke	Nama Bus	Circuit	MW	Mvar	MVA	Limit MVA
1	Suralaya	8	Gandul	1	704.3	151.7		2178
1	Suralaya	8	Gandul	2	704.3	151.7		2178
1	Suralaya	10	Cilegon	1	548.8	181.4		2398
1	Suralaya	10	Cilegon	2	548.8	181.4		2398
2	Cirata	3	Cibatu	1	79.0	-81.6		2178
2	Cirata	3	Cibatu	2	79.0	-81.6		2178
2	Cirata	11	Saguling	1	116.6	-25.0		2178
2	Cirata	11	Saguling	2	116.6	-25.0		2178
3	Cibatu	4	M Tawang	1	303.4	-13.8		2178
3	Cibatu	4	M Tawang	2	303.4	-13.8		2178
5	Cibinong	6	Bekasi	1	356.9	185.5		2178
5	Cibinong	7	Cawang	1	692.4	319.3		2178
5	Cibinong	8	Gandul	1	42.2	-116.1		2178
5	Cibinong	8	Gandul	2	42.2	-116.1		2178
5	Cibinong	10	Cilegon	1	622.2	142.2		2398
5	Cibinong	11	Saguling	1	286.0	272.4		2398
5	Cibinong	11	Saguling	2	286.0	272.4		2398
6	Bekasi	7	Cawang	1	-95.7	5.0		2178
8	Gandul	9	Kembangan	1	358.9	189.1		2398
8	Gandul	9	Kembangan	2	358.9	189.1		2398
11	Saguling	12	Bandung	1	46.6	295.9		2398
11	Saguling	12	Bandung	2	46.6	295.9		2398
12	Bandung	13	Maduracan	1	273.7	-164.9		2178
12	Bandung	13	Maduracan	2	273.7	-164.9		2178
13	Maduracan	14	Ungaran	1	488.5	2.1		2398
13	Maduracan	14	Ungaran	2	488.5	2.1		2398
14	Ungaran	15	Pedan	1	200.3	-31.0		2178
14	Ungaran	16	Krian	1	790.3	-59.2		2178
14	Ungaran	16	Krian	2	790.3	-59.2		2178
15	Pedan	19	Kediri	1	44.2	7.8		2398
15	Pedan	19	Kediri	2	44.2	7.8		2398
16	Krian	17	Gresik	1	124.2	126.9		2398
16	Krian	17	Gresik	2	124.2	126.9		2398
16	Krian	18	Grati	1	954.5	-61.1		2398
16	Krian	18	Grati	2	954.5	-61.1		2398
18	Grati	20	Paiton	1	836.0	-104.6		2398
18	Grati	20	Paiton	2	836.0	-104.6		2398
19	Kediri	20	Paiton	1	165.4	-1.9		2398
19	Kediri	20	Paiton	2	165.4	-1.9		2398

3.4. Sistem Keadaan Terganggu

Sistem tenaga listrik dikatakan baik atau stabil apabila mempunyai kondisi yang seimbang atau simetri.. Keadaan Sistem tenaga listrik yang seimbang atau simetri yaitu keadaan sistem tenaga listrik yang mempunyai panjang gelombang sama dan sudut phasor sama besar yaitu 120°. Ketidaksimetrian sistem tenaga listrik terjadi karena gangguan simetri atau gangguan ketidaksimetrian[15]. Gangguan keseimbangan tiga fasa pada sistem tenaga listrik termasuk dalam gangguan simetri sedangkan untuk gangguan tidak simetri yang sering terjadi dalam sistem tenaga listrik yaitu gangguan satu jaringan ke tanah, gangguan jaringan ke jaringan atau antar jaringan dan gangguan dua jaringan ke tanah. Gangguan pada sistem transmisi menyebabkan rugi-rugi daya pada saluran. Rugi

daya pada tiap-tiap saluran transmisi mencapai 1 – 37% yaitu antara 0.017 – 19,52 MW. Tabel .4 menunjukkan harga rugi-rugi daya pada saluran transmisi

Tabel 4. Harga Rugi-Rugi Daya pada Saluran Transmisi Jawa-Bali 500kV 20 Bus

Dari	Nama Bus	Ke	Nama Bus	Circuit	MW Loss	Mvar Loss	Max %
1	Suralaya	8	Gandul	1	7.95	21.65	35.5
1	Suralaya	8	Gandul	2	7.95	21.65	35.5
1	Suralaya	10	Cilegon	1	0.46	-1.13	25.2
1	Suralaya	10	Cilegon	2	0.46	-1.13	25.2
2	Cirata	3	Cibatu	1	0.06	-23.02	5.3
2	Cirata	3	Cibatu	2	0.06	-23.02	5.3
2	Cirata	11	Saguling	1	0.04	-12.30	5.4
2	Cirata	11	Saguling	2	0.04	-12.03	5.4
4	Muaratawang	3	Cibatu	1	0.59	-18.55	14.0
4	Muaratawang	3	Cibatu	2	0.59	-18.55	14.0
5	Cibinong	6	Bekasi	1	2.17	16.48	30.9
5	Cibinong	7	Cawang	1	1.82	11.40	23.1
8	Gandul	5	Cibinong	1	0.06	-9.30	7.2
8	Gandul	5	Cibinong	2	0.06	-9.30	7.2
10	Cilegon	5	Cibinong	1	6.41	46.06	28.4
11	Saguling	5	Cibinong	1	2.04	-19.73	19.4
11	Saguling	5	Cibinong	2	2.04	-19.73	19.4
6	Bekasi	7	Cawang	1	0.07	-1.16	8.3
8	Gandul	9	Kembangan	1	0.63	14.69	17.6
8	Gandul	9	Kembangan	2	0.63	14.69	17.6
11	Saguling	12	Bandung	1	0.43	-10.52	18.8
11	Saguling	12	Bandung	2	0.43	-10.52	18.8
13	Maduracan	12	Bandung	1	2.02	5.52	16.2
13	Maduracan	12	Bandung	2	2.02	5.52	16.2
14	Ungaran	13	Maduracan	1	0.67	61.43	19.7
14	Ungaran	13	Maduracan	2	0.67	61.43	19.7
14	Ungaran	15	Pedan	1	0.52	-3.06	10.4
16	Krian	14	Ungaran	1	19.52	72.25	36.8
16	Krian	14	Ungaran	2	19.52	72.25	36.8
19	Kediri	15	Pedan	1	0.03	-21.33	1.7
19	Kediri	15	Pedan	2	0.03	-21.33	1.7
17	Gresik	16	Krian	1	0.37	-8.48	15.7
17	Gresik	16	Krian	2	0.37	-8.48	15.7
18	Grati	16	Krian	1	6.37	35.50	39.7
18	Grati	16	Krian	2	6.37	35.50	39.7
20	Paiton	18	Grati	1	5.31	14.46	35.3
20	Paiton	18	Grati	2	5.31	14.46	35.3
20	Paiton	19	Kediri	1	0.61	40.44	6.9
20	paiton	19	Kediri	2	0.61	40.44	6.9

Analisis gangguan pada Power World simulator digunakan untuk menghitung arus fasa gangguan pada tiap-tiap fasa dalam satuan per unit dan tegangan fasa gangguan untuk tiap-tiap fasa dalam satuan per unit pada keadaan subtransient.

3.4.1. Gangguan Keseimbangan Tiga Fasa di Bus

Tegangan fasa gangguan pada gangguan keseimbangan tiga fasa mempunyai harga sama dengan nol, karena pada analisis gangguan menggunakan Power World Simulator fasa gangguan tidak melalui impedansi gangguan (Z_F) atau Z_F = 0. Sehingga tegangan fasa gangguan menjadi,

$$V_a = I_a Z_F$$

$$= I_a \cdot 0$$

$$= 0$$

dengan Z_F = 0

Arus fasa gangguan pada gangguan keseimbangan tiga fasa terjadi pada fasa yang terganggu yaitu fasa a dan pada fasa b dan fasa c tidak mempunyai arus gangguan

1. Gangguan di Bus

Tabel 5 menunjukkan harga arus fasa gangguan di bus yang terganggu pada gangguan keseimbangan tiga fasa.

Tabel 5. Arus Fasa Gangguan di Bus pada Gangguan Keseimbangan Tiga Fasa

No.	Bus Terganggu	Arus Gangguan	Kontribusi Pada Arus Fasa Gangguan			
			Generator Saluran	Rangkaian	Bus ke Bus	Arus (per unit)
1.	Suralaya	71.0	Generator		GRND-1	27.8
			Saluran	2	1-8	14.9
			Saluran	2	1-10	8.1
2.	Cirata	79.2	Generator		GRND-2	8.0
			Saluran	2	2-3	3.2
			Saluran	2	2-11	32.5
3.	Cibatu	74.7	Saluran	2	3-2	34.3
			Saluran	2	3-4	3.2
4.	MuaraTawar	69.4	Generator		GRND-4	6.5
			Saluran	2	4-3	31.7
			Saluran	1	5-6	0
5.	Cibinong	77.3	Saluran	1	5-7	0
			Saluran	2	5-8	8.9
			Saluran	1	5-10	9.7
6.	Bekasi	69.1	Saluran	2	5-11	23.8
			Saluran	1	6-5	27.8
			Saluran	1	6-7	41.3
7.	Cawang	70.0	Saluran	1	7-5	48.7
			Saluran	1	7-6	21.4
8.	Gandul	75.9	Saluran	2	8-1	10.9
			Saluran	2	8-5	27.4
			Saluran	2	8-9	0
9.	Kembangan	65.0	Saluran	2	9-8	32.5
			Saluran	2	10-1	26.4
10.	Cilegon	70.7	Saluran	1	10-5	18.4
			Generator		GRND-11	15.1
			Saluran	2	11-2	7.1
11.	Saguling	81.2	Saluran	2	11-5	13.2
			Saluran	2	11-12	14.9
			Saluran	2	12-11	23.1
12.	Bandung	80.0	Saluran	2	12-13	15.2
			Saluran	2	13-12	22.2
13.	Maduracan	74.7	Saluran	2	13-14	16.2
			Saluran	2	14-13	17.8
			Saluran	1	14-15	4.5
14.	Ungaran	64.9	Saluran	2	14-16	15.0
			Saluran	1	15-14	48.2
			Saluran	2	15-19	3.4
15.	Pedan	54.7	Saluran	2	16-14	13.3
			Saluran	2	16-17	5.9
			Saluran	2	16-18	14.1
16.	Krian	57.2	Generator		GRND-17	11.9
			Saluran	2	17-16	22.3
17.	Gresik	56.3	Generator		GRND-18	5.6
			Saluran	2	18-16	16.9
			Saluran	2	18-20	12.2
18.	Grati	54.0	Saluran	2	19-15	18.2
			Saluran	2	19-20	4.5
			Generator		GRND-20	24.9
19.	Kediri	45.3	Saluran	2	20-18	17.4
			Saluran	2	20-19	2.1

2. Gangguan di Saluran Transmisi

Tabel 6 menunjukkan arus fasa gangguan di saluran transmisi terganggu pada gangguan keseimbangan tiga fasa.

Tabel 6. Arus Fasa Gangguan di Transmisi pada Gangguan Keseimbangan Tiga Fasa

No.	Jaringan terganggu	Arus gangguan (per unit)	Arus Bus ke bus phasa terganggu (per unit)	
			Bus ke bus	Arus phasa terganggu (per unit)
1.	1 – 10	71.1	1 – Fault	62.7
			Fault – 10	8.5
2.	1 – 8	71.0	1 – Fault	56.5
			Fault – 8	15.0
3.	10 – 5	70.7	10 – Fault	52.6
			Fault – 5	18.4
4.	8 – 5	75.9	8 – Fault	48.4
			Fault – 5	27.6
5.	8 – 9	75.9	8 – Fault	75.8
			Fault – 9	0.05
6.	5 – 7	77.3	5 – Fault	77.2
			Fault – 7	0.07
7.	5 – 6	77.3	5 – Fault	77.2
			Fault – 6	0.07
8.	6 – 7	69.1	6 – Fault	27.8
			Fault – 7	41.3
9.	5 – 11	81.1	5 – Fault	13.2
			Fault – 11	68.2
10.	2 – 11	79.2	2 – Fault	46.5
			Fault – 11	32.6
11.	3 – 2	74.7	3 – Fault	40.3
			Fault – 2	34.4
12.	3 – 4	69.4	3 – Fault	31.7
			Fault – 4	37.6
13.	11 – 12	81.1	11 – Fault	66.2
			Fault – 12	15.0
14.	12 – 13	74.7	12 – Fault	22.1
			Fault – 13	53.1
15.	14 – 13	64.9	14 – Fault	49.0
			Fault – 13	17.8
16.	14 – 15	64.9	14 – Fault	60.7
			Fault – 15	4.5
17.	16 – 14	57.2	16 – Fault	46.4
			Fault – 14	13.2
18.	17 – 16	56.2	17 – Fault	33.8
			Fault – 16	22.4
19.	18 – 16	54.0	18 – Fault	39.9
			Fault – 16	17.0
20.	19 – 15	45.3	19 – Fault	27.1
			Fault – 15	18.2
21.	20 – 18	50.7	20 – Fault	36.0
			Fault – 18	17.4
22.	20 – 19	50.7	20 – Fault	49.1
			Fault – 19	2.1

3.4.2. Gangguan Satu Jaringan ke Tanah Di Bus

Gangguan satu jaringan ke tanah terjadi pada phasa *a* sehingga tegangan phasa terganggu pada phasa *a* besarnya sama dengan nol, karena pada analisis gangguan menggunakan Power World Simulator phasa gangguan tidak melalui impedansi gangguan (Z_F) atau $Z_F = 0$.

Arus phasa gangguan yang terjadi pada gangguan satu jaringan ke tanah terjadi pada phasa *a*.

1. Gangguan pada Bus

Tabel 7 menunjukkan harga tegangan phasa gangguan pada bus yang terganggu pada gangguan satu jaringan ke tanah

Tabel 7. Tegangan Phasa Gangguan di Bus Pada Gangguan Satu Jaringan Ke Tanah

No.	Bus Terganggu	Tegangan Phasa Gangguan		
		Per unit / degree		
		Phasa A	Phasa B	Phasa C
1.	Suralaya	0	1.45 < -123.5	0.96 < 147.3
2.	Cirata	0	1.48 < -124.5	0.49 < 147.1
3.	Cibatu	0	1.46 < -125.2	0.96 < 146.0
4.	MuaraTawar	0	1.43 < -125.2	0.97 < 144.7
5.	Cibinong	0	1.48 < -125.9	0.94 < 147.7
6.	Bekasi	0	1.42 < -127.5	0.93 < 143.6
7.	Cawang	0	1.44 < -128.3	0.96 < 144.8
8.	Gandul	0	1.48 < -126.2	0.95 < 147.5
9.	Kembangan	0	1.43 < -131.2	1.02 < 144.3
10.	Cilegon	0	1.46 < -124.0	0.96 < 147.2
11.	Saguling	0	1.50 < -124.6	0.94 < 148.0
12.	Bandung	0	1.49 < -125.3	0.95 < 148.2
13.	Maduracan	0	1.47 < -125.3	0.97 < 148.7
14.	Ungaran	0	1.43 < -120.9	0.95 < 150.0
15.	Pedan	0	1.40 < -123.5	1.00 < 148.2
16.	Krian	0	1.37 < -111.9	0.90 < 151.6
17.	Gresik	0	1.37 < -112.1	0.91 < 151.5
18.	Grati	0	1.35 < -109.4	0.91 < 152.5
19.	Kediri	0	1.38 < -124.7	1.04 < 146.8
20.	Paiton	0	1.35 < -108.2	0.92 < 154.4

Tabel 8. Arus Phasa Gangguan di Bus pada Gangguan Satu Jaringan Ke Tanah

No.	Bus Terganggu	Arus Gangguan (per unit)	Kontribusi Pada Arus Gangguan					
			Generator Saluran	Rangkaian	Bus ke Bus	Arus (per unit)		
						Phasa A	Phasa B	Phasa C
1.	Suralaya	55.2	Generator		GRND-1	32.4	30.3	20.5
			Saluran	2	1-8	11.7	8.1	5.3
			Saluran	2	1-10	6.5	6.3	4.3
			Generator		GRND-2	8.2	6.5	5.9
			Saluran	2	2-3	3.5	2.6	1.1
			Saluran	2	2-11	24.8	2.3	0.3
			Saluran	2	3-2	25.6	2.6	1.2
			Saluran	2	3-4	4.4	4.5	1.0
4.	MuaraTawar	53.1	Generator		GRND-4	8.9	9.1	2.0
			Saluran	2	4-3	22.9	4.5	1.0
			Saluran	1	5-6	2.5	4.2	3.2
			Saluran	1	5-7	4.7	8.0	6.0
			Saluran	2	5-8	6.1	1.1	1.6
			Saluran	1	5-10	9.6	7.2	4.8
			Saluran	2	5-11	21.4	3.0	3.9
			Saluran	1	6-5	31.1	10.9	6.0
			Saluran	1	6-7	23.5	7.7	9.3
			Saluran	1	7-5	31.6	8.0	12.9
			Saluran	1	7-6	23.1	3.3	7.8
			Saluran	2	8-1	10.6	8.0	5.5
			Saluran	2	8-5	21.7	1.2	1.5
			Saluran	2	8-9	2.5	4.3	3.3
			Saluran	2	9-8	23.4	4.2	3.4
			Saluran	2	10-1	21.7	6.3	4.4
			Saluran	1	10-5	14.1	7.3	4.8
10.	Cilegon	54.4	Generator		GRND-11	16.2	10.3	11.9
			Saluran	2	11-2	6.6	2.3	0.2
			Saluran	2	11-5	8.4	3.4	3.5
			Saluran	2	11-12	9.0	2.3	2.9
			Saluran	2	12-11	21.9	2.2	3.0
			Saluran	2	12-13	10.2	2.8	3.5
			Saluran	2	13-12	18.0	3.3	3.5
			Saluran	2	13-14	12.3	5.5	4.5
			Saluran	2	14-13	14.0	6.3	4.2
			Saluran	1	14-15	3.3	1.9	1.6
			Saluran	2	14-16	12.5	9.0	6.5
			Saluran	1	15-14	34.5	1.9	1.6
			Saluran	2	15-19	2.4	0.6	0.4
			Saluran	2	16-14	12.3	9.5	6.2
			Saluran	2	16-17	5.9	1.6	1.5
			Saluran	2	16-18	13.2	10.8	7.9
			Generator		GRND-17	14.6	9.5	7.8
			Saluran	2	17-16	17.4	1.6	1.4
			Generator		GRND-18	8.1	6.5	1.3
			Saluran	2	18-16	15.9	11.0	7.8
			Saluran	2	18-20	10.6	8.7	8.3
			Saluran	2	19-15	12.5	0.6	0.5
			Saluran	2	19-20	3.1	1.7	1.5
			Generator		GRND-20	25.6	26.2	22.8
			Saluran	2	20-18	16.8	8.8	8.2
			Saluran	2	20-19	2.1	1.8	1.4

Tabel 8 menunjukkan harga arus fasa gangguan di bus yang terganggu pada gangguan satu jaringan ke tanah.

2. Gangguan pada Saluran Transmisi

Tabel 9 menunjukkan harga tegangan fasa gangguan di transmisi pada gangguan satu jaringan ke tanah.

Tabel 9, Harga Arus Gangguan di Transmisi pada Gangguan Satu Jaringan ke Tanah

No.	Jaringan Terganggu	Teganga Fasa Gangguan Per unit / degree		
		Phasa A	Phasa B	Phasa C
1.	1 – 8	0	1.45 < -123.5	0.95 < 147.3
2.	1 – 10	0	1.45 < -123.5	0.95 < 147.3
3.	2 – 3	0	1.46 < -125.1	0.95 < 146.0
4.	2 – 11	0	1.48 < -124.5	0.93 < 147.1
5.	3 – 4	0	1.43 < -125.3	0.97 < 144.7
6.	5 – 6	0	1.48 < -125.9	0.94 < 147.7
7.	5 – 7	0	1.48 < -125.9	0.94 < 147.7
8.	5 – 8	0	1.47 < -126.1	0.94 < 147.5
9.	5 – 10	0	1.45 < -124.0	0.96 < 147.2
10.	5 – 11	0	1.49 < -124.6	0.93 < 148.0
11.	6 – 7	0	1.41 < -127.5	0.93 < 143.5
12.	8 – 9	0	1.47 < -126.1	0.94 < 147.5
13.	11 – 12	0	1.49 < -124.6	0.93 < 148.0
14.	12 – 13	0	1.46 < -125.3	0.97 < 148.6
15.	13 – 14	0	1.42 < -120.9	0.95 < 150.0
16.	14 – 15	0	1.42 < -120.9	0.95 < 150.0
17.	14 – 16	0	1.37 < -111.9	0.90 < 151.6
18.	15 – 19	0	1.38 < -124.7	1.04 < 146.8
19.	16 – 17	0	1.37 < -112.1	0.91 < 151.5
20.	16 – 18	0	1.35 < -109.4	0.90 < 152.5
21.	18 – 20	0	1.34 < -108.2	0.92 < 154.4
22.	19 – 20	0	1.34 < -108.2	0.92 < 154.4

3.4.3. Gangguan Jaringan ke Jaringan Di Bus

Gangguan jaringan ke jaringan terjadi dari fasa *b* ke fasa *c*, pada fasa *a* tidak terjadi gangguan. Sehingga arus ganggua pada fasa *a* sama dengan nol.

Tegangan fasa gangguan pada gangguan jaringan ke jaringan terjadi pada semua fasa, yaitu dengan besar

harga tegangan fasa terganggu pada fasa *b* sama dengan fasa *c* atau $V_b = V_c$.

1. Gangguan pada Bus

Tabel 10 menunjukkan harga tegangan fasa gangguan di bus gangguan pada gangguan jaringan ke jaringan

Tabel 10. Harga Tegangan Fasa gangguan di Bus pada Gangguan Jaringan Ke Jaringan

No.	Bus Terganggu	Tegangan Fasa Gangguan Per unit / degree		
		Phasa A	Phasa B	Phasa C
1.	Suralaya	1.00 < 0.00	0.50 < 180	0.50 < 180
2.	Cirata	1.00 < -1.76	0.50 < 178.2	0.50 < 178.2
3.	Cibatu	0.99 < -1.64	0.49 < 178.3	0.49 < 178.3
4.	MuaraTawar	1.00 < -1.11	0.50 < 178.8	0.50 < 178.8
5.	Cibinong	0.98 < -2.52	0.49 < 177.4	0.49 < 177.4
6.	Bekasi	0.97 < -3.84	0.48 < 176.1	0.48 < 176.1
7.	Cawang	0.97 < -3.78	0.48 < 176.2	0.48 < 176.2
8.	Gandul	0.98 < -2.48	0.49 < 177.5	0.49 < 177.5
9.	Kembangan	0.96 < -4.02	0.48 < 175.9	0.48 < 175.9
10.	Cilegon	0.99 < -0.21	0.49 < 179.7	0.49 < 179.7
11.	Saguling	1.00 < -1.85	0.50 < 178.1	0.50 < 178.1
12.	Bandung	0.99 < -1.89	0.49 < 178.1	0.49 < 178.1
13.	Maduracan	0.98 < -0.65	0.49 < 179.3	0.49 < 179.3
14.	Ungaran	0.98 < 3.08	0.49 < -176.9	0.49 < -176.9
15.	Pedan	0.98 < 2.57	0.49 < -177.4	0.49 < -177.4
16.	Krian	0.99 < 9.55	0.49 < -170.4	0.49 < -170.4
17.	Gresik	1.00 < 9.63	0.50 < -170.3	0.50 < -170.3
18.	Grati	1.00 < 11.8	0.50 < -168.1	0.50 < -168.1
19.	Kediri	0.98 < 2.87	0.49 < -177.1	0.49 < -177.1
20.	Paiton	1.00 < 13.8	0.50 < -166.1	0.50 < -166.1

Tabel 12 menunjukkan harga arus fasa gangguan di bus yang terganggu pada gangguan jaringan ke jaringan.

Tabel 12, Harga Arus Fasa Gangguan di Bus pada Gangguan Jaringan Ke Jaringan

No.	Bus Terganggu	Kontribusi Pada Arus Gangguan					
		Generator Saluran	Rangkaian	Bus ke Bus	Arus (per unit)		
					Phasa A	Phasa B	Phasa C
1.	Suralaya	Generator		GRND-1	27.3	28.5	26.9
		Saluran	2	1-8	7.2	10.9	15.5
		Saluran	2	1-10	5.8	5.9	8.9
2.	Cirata	Generator		GRND-2	6.7	8.5	6.9
		Saluran	2	2-3	1.1	3.3	2.3
		Saluran	2	2-11	1.2	27.7	28.6
3.	Cibatu	Saluran	2	3-2	1.1	29.1	30.2
		Saluran	2	3-4	3.0	3.7	2.6
		Generator		GRND-4	6.1	7.4	5.2
4.	MuaraTawar	Saluran	2	4-3	3.0	26.3	28.6
		Saluran	1	5-6	4.1	2.0	2.0
		Saluran	1	5-7	7.7	3.8	3.8
5.	Cibinong	Saluran	2	5-8	1.2	8.3	7.1
		Saluran	1	5-10	6.4	9.3	8.6
		Saluran	2	5-11	3.9	22.4	22.4
6.	Bekasi	Saluran	1	6-5	4.1	24.7	23.6
		Saluran	1	6-7	0.9	36.1	35.5
		Saluran	1	7-5	7.7	43.3	41.3
7.	Cawang	Saluran	1	7-6	0.9	18.2	18.8
		Saluran	2	8-1	7.2	10.7	9.5
		Saluran	2	8-5	1.2	23.2	24.3
8.	Gandul	Saluran	2	8-9	4.1	2.	2.0
		Saluran	2	9-8	4.1	28.8	27.6
		Saluran	2	10-15	5.8	23.8	22.1
9.	Kembangan	Saluran	1	10-5	6.4	14.2	18.0
		Generator		GRND-11	12.1	14.8	14.0
		Saluran	2	11-2	1.2	6.5	5.7
11.	Saguling	Saluran	2	11-5	3.9	12.3	10.9
		Saluran	2	11-12	2.9	14.1	11.7
		Saluran	2	12-11	2.9	20.8	22.7
12.	Bandung	Saluran	2	12-13	3.2	14.5	11.8
		Saluran	2	13-12	3.2	17.6	20.8
		Saluran	2	13-14	4.9	15.3	13.1
13.	Maduracan	Saluran	2	14-13	4.9	13.2	17.6
		Saluran	1	14-15	2.0	3.6	4.4
		Saluran	2	14-16	7.9	15.3	11.6
14.	Ungaran	Saluran	1	15-14	2.0	42.6	40.8
		Saluran	2	15-19	0.4	3.0	2.8
		Saluran	2	16-14	7.9	7.6	15.4
16.	Krian	Saluran	2	16-17	1.8	5.3	5.0
		Saluran	2	16-18	9.5	14.3	11.8
		Generator		GRND-17	9.8	12.0	10.7
17.	Gresik	Saluran	2	17-16	1.8	19.3	19.3
		Generator		GRND-18	4.5	6.2	4.3
		Saluran	2	18-16	9.5	10.0	19.4
18.	Grati	Saluran	2	18-20	8.4	12.4	10.2
		Saluran	2	19-15	0.4	15.6	15.9
		Saluran	2	19-20	1.6	4.5	3.2
19.	Kediri	Generator		GRND-20	24.9	25.7	24.1
		Saluran	2	20-18	8.4	10.8	19.2
		Saluran	2	20-19	1.6	1.0	2.6
20.	Paiton	Saluran	2	20-18	8.4	10.8	19.2
		Saluran	2	20-19	1.6	1.0	2.6

2. Gangguan di Saluran Transmisi

Tabel 13 menunjukkan harga arus fasa gangguan di transmisi pada gangguan jaringan ke jaringan

No.	Jaringan terganggu	Bus ke bus	Arus (per unit)		
			Phasa A	Phasa B	Phasa C
2.	1 - 8	Fault - 10	5.7	6.3	9.2
		1 - Fault	7.2	50.5	47.5
		Fault - 8	7.3	11.2	15.4
3.	10 - 5	10 - Fault	6.3	46.9	44.4
		Fault - 5	6.4	14.3	18.0
		8 - Fault	1.2	42.5	41.3
4.	8 - 5	Fault - 5	1.2	23.3	24.4
		8 - Fault	4.1	65.9	65.4
		Fault - 9	4.1	2.0	2.1
5.	5 - 7	5 - Fault	7.7	67.6	66.3
		Fault - 7	7.7	3.8	3.8
		5 - Fault	4.1	67.1	66.7
6.	5 - 6	Fault - 6	4.1	2.0	2.0
		6 - Fault	0.9	23.7	24.4
		Fault - 7	0.9	36.1	35.5
7.	6 - 7	5 - Fault	4.2	12.5	10.7
		Fault - 11	3.9	58.8	59.3
		2 - Fault	1.1	40.7	39.8
8.	2 - 11	Fault - 11	1.1	27.8	28.6
		3 - Fault	1.1	35.5	34.4
		Fault - 2	0.9	29.2	30.2
9.	3 - 4	3 - Fault	3.0	26.5	28.5
		Fault - 4	3.0	33.6	31.5
		11 - Fault	2.9	56.3	58.4
10.	11 - 12	Fault - 12	3.1	14.3	11.7
		12 - Fault	3.1	17.6	20.7
		Fault - 13	3.2	47.4	44.5
11.	12 - 13	14 - Fault	4.9	43.8	41.7
		Fault - 13	4.9	13.2	17.7
		14 - Fault	2.0	53.4	51.8
12.	14 - 15	Fault - 15	2.0	3.6	4.4
		16 - Fault	7.9	42.9	37.7
		Fault - 14	7.9	7.8	15.3
13.	16 - 14	17 - Fault	1.7	29.3	29.3
		Fault - 16	1.8	19.4	19.3
		18 - Fault	9.5	37.87	31.8
14.	18 - 16	Fault - 16	9.5	10.1	19.4
		19 - Fault	0.4	23.6	23.3
		Fault - 15	0.5	15.6	15.8
15.	19 - 15	20 - Fault	8.4	34.2	28.4
		Fault - 18	8.3	19.9	19.2
		20 - Fault	1.6	43.2	41.9
16.	20 - 18	Fault - 19	1.6	1.0	2.6

Tabel 14 menunjukkan harga tegangan fasa gangguan di transmisi pada gangguan jaringan ke jaringan.

Tabel 14, Harga Tegangan Fasa Gangguan di Transmisi pada Gangguan Jaringan ke Jaringan

No.	Jaringan Terganggu	Teganga Fasa Gangguan		
		Per unit / degree		
		Phasa A	Phasa B	Phasa C
1.	1 - 8	0.99 < 0.00	0.49 < 180	0.49 < 180
2.	1 - 10	0.99 < 0.00	0.49 < 180	0.49 < 180
3.	2 - 3	0.99 < -1.64	0.49 < 178.3	0.49 < 178.3
4.	2 - 11	1.00 < -1.76	0.50 < 178.2	0.50 < 178.2
5.	3 - 4	1.00 < -1.11	0.50 < 178.8	0.50 < 178.8
6.	5 - 6	0.98 < -2.52	0.49 < 177.4	0.49 < 177.4
7.	5 - 7	0.98 < -2.52	0.49 < 177.4	0.49 < 177.4
8.	5 - 8	0.98 < -2.48	0.49 < 177.5	0.49 < 177.5
9.	5 - 10	0.99 < -0.22	0.49 < 179.7	0.49 < 179.7
10.	5 - 11	0.99 < -1.85	0.49 < 178.1	0.49 < 178.1
11.	6 - 7	0.97 < -3.84	0.48 < 176.1	0.48 < 176.1
12.	8 - 9	0.98 < -2.48	0.49 < 177.5	0.49 < 177.5
13.	11 - 12	0.99 < -1.85	0.49 < 178.1	0.49 < 178.1
14.	12 - 13	0.98 < -0.65	0.49 < 179.3	0.49 < 179.3
15.	13 - 14	0.98 < 3.07	0.49 < -176.9	0.49 < -176.9
16.	14 - 15	0.98 < -0.07	0.49 < -176.9	0.49 < -176.9
17.	14 - 16	0.99 < 9.55	0.49 < -170.4	0.49 < -170.4
18.	15 - 19	0.98 < 2.86	0.49 < -177.1	0.49 < -177.1
19.	16 - 17	0.99 < -0.63	0.49 < -170.3	0.49 < -170.3
20.	16 - 18	1.00 < 11.8	0.50 < -168.1	0.50 < -168.1
21.	18 - 20	1.00 < 13.8	0.50 < -166.1	0.50 < -166.1
22.	19 - 20	1.00 < 13.8	0.49 < -166.1	0.49 < -166.1

3.4.4. Gangguan Dua Jaringan ke Tanah Di Bus

Gangguan dua jaringan ke tanah terjadi pada fasa b ke fasa c dilanjutkan ke tanah.

Tegangan fasa gangguan pada gangguan dua jaringan ke tanah terjadi pada semua fasa a, fasa b dan fasa c mempunyai harga nol karena pada analisis gangguan menggunakan Power World Simulator gangguan antar fasa b ke diteruskan ke tanah tidak melalui impedansi gangguan (Z_f) atau $Z_f = 0$

1. Gangguan pada Bus

Tabel 15 menunjukkan harga tegangan fasa terganggu di bus yang terganggu

Table 15, Harga Tegangan Fasa Gangguan di Bus pada Gangguan Dua Jaringan Ke Tanah

No.	Bus Terganggu	Teganga Fasa Gangguan		
		Per unit / degree		
		Phasa A	Phasa B	Phasa C
1.	Suralaya	1.29 < 8.44	0	0
2.	Cirata	1.31 < 7.32	0	0
3.	Cibatu	1.30 < 6.86	0	0
4.	MuaraTawar	1.28 < 6.78	0	0
5.	Cibinong	1.30 < 6.34	0	0
6.	Bekasi	1.26 < 4.57	0	0
7.	Cawang	1.27 < 4.26	0	0
8.	Gandul	1.30 < 6.20	0	0
9.	Kembangan	1.28 < 2.61	0	0
10.	Cilegon	1.29 < 8.10	0	0
11.	Saguling	1.31 < 7.35	0	0

12.	Bandung	1.31 < 6.93	0	0
13.	Maduracan	1.30 < 7.42	0	0
14.	Ungaran	1.27 < 11.2	0	0
15.	Pedan	1.27 < 9.36	0	0
16.	Krian	1.24 < 18.5	0	0
17.	Gresik	1.24 < 18.4	0	0
18.	Grati	1.22 < 20.7	0	0
19.	Kediri	1.27 < 8.57	0	0
20.	Paiton	1.23 < 22.1	0	0

Tabel 16 menunjukkan harga arus fase gangguan di bus yang terganggu pada gangguan dua jaringan ke tanah.

Tabel 16, Harga Arus Fase Gangguan di Bus pada Gangguan Dua Jaringan Ke Tanah

No.	Bus Terganggu	Arus Gangguan (per unit)	Kontribusi Pada Arus Gangguan					
			Generator Saluran	Rangkaian	Bus ke Bus	Arus (per unit)		
						Phasa A	Phasa B	Phasa C
1.	Suralaya	40.8	Generator		GRND-1	25.4	25.7	32.4
			Saluran	2	1-8	6.8	8.5	17.6
			Saluran	2	1-10	5.3	4.1	9.9
2.	Cirata	46.3	Generator		GRND-2	5.9	8.0	8.1
			Saluran	2	2-3	1.9	2.0	4.1
			Saluran	2	2-11	1.5	22.4	35.1
3.	Cibatu	42.8	Saluran	2	3-2	2.0	24.4	36.5
			Saluran	2	3-4	3.1	2.8	4.3
4.	MuaraTawar	39.5	Generator		GRND-4	6.2	5.7	8.8
			Saluran	2	4-3	3.1	22.3	33.7
			Saluran	1	5-6	3.6	1.8	1.8
			Saluran	1	5-7	6.8	3.4	3.4
5.	Cibinong	43.3	Saluran	2	5-8	1.3	6.3	9.3
			Saluran	1	5-10	6.1	8.0	10.7
			Saluran	2	5-11	3.0	19.2	27.5
6.	Bekasi	39.5	Saluran	1	6-5	5.6	20.0	34.8
			Saluran	1	6-7	6.3	32.7	39.4
7.	Cawang	37.8	Saluran	1	7-5	10.1	39.0	47.2
			Saluran	1	7-6	5.2	13.6	17.1
			Saluran	2	8-1	6.8	9.3	11.8
8.	Gandul	42.0	Saluran	2	8-5	1.4	19.1	29.8
			Saluran	2	8-9	3.6	1.8	1.8
9.	Kembangan	30.9	Saluran	2	9-8	3.6	25.0	33.2
10.	Cilegon	40.1	Saluran	2	10-1	5.3	20.2	27.9
			Saluran	1	10-5	6.2	11.3	20.9
			Generator		GRND-11	10.2	15.4	15.6
11.	Saguling	47.0	Saluran	2	11-2	1.5	4.9	8.1
			Saluran	2	11-5	3.0	8.8	14.0
			Saluran	2	11-12	1.9	11.0	14.8
12.	Bandung	44.8	Saluran	2	12-11	2.1	17.3	28.3
			Saluran	2	12-13	3.0	11.9	14.9
13.	Maduracan	39.8	Saluran	2	13-12	3.4	14.9	24.7
			Saluran	2	13-14	5.1	12.8	16.5
			Saluran	2	14-13	5.6	11.9	19.7
14.	Ungaran	36.7	Saluran	1	14-15	1.4	2.5	5.3
			Saluran	2	14-16	8.0	12.7	15.2
15.	Pedan	28.55	Saluran	1	15-14	1.5	37.0	49.3
			Saluran	2	15-19	0.5	2.5	3.5
16.	Krian	38.2	Saluran	2	16-14	8.2	7.9	16.1
			Saluran	2	16-17	1.1	5.0	6.5
			Saluran	2	16-18	9.7	11.9	14.9
17.	Gresik	37.3	Generator		GRND-17	7.4	12.2	13.7
			Saluran	2	17-16	1.1	15.8	24.0
			Generator		GRND-18	4.0	5.6	7.7
18.	Grati	37.0	Saluran	2	18-16	9.7	10.5	20.5
			Saluran	2	18-20	8.6	11.1	11.9
			Saluran	2	19-15	0.6	13.9	18.5
19.	Kediri	22.6	Saluran	2	19-20	1.6	3.9	4.1
			Generator		GRND-20	24.6	23.9	26.1
20.	Paiton	33.7	Saluran	2	20-18	8.6	11.7	20.8
			Saluran	2	20-19	1.7	1.3	2.6

2. Gangguan pada Saluran Transmisi

Tabel 17 menunjukkan harga arus gangguan di transmisi pada gangguan dua jaringan ke tanah

Tabel 17, Harga Arus Gangguan di Transmisi pada Gangguan Dua Jaringan ke Tanah

No.	Jaringan terganggu	Arus gangguan (per unit)	Bus ke bus	Arus (per unit)		
				Phasa A	Phasa B	Phasa C
1.	1 – 10	40.8	1 – Fault	5.2	45.9	67.1
			Fault – 10	5.3	4.4	10.3
2.	1 – 8	40.8	1 – Fault	6.8	41.8	60.3
			Fault – 8	6.9	8.6	17.4
3.	10 – 5	40.1	10 – Fault	6.1	38.9	56.0
			Fault – 5	6.1	11.3	20.9
4.	8 – 5	42.0	8 – Fault	1.3	33.6	52.2
			Fault – 5	1.3	19.2	30.0
5.	8 – 9	42.0	8 – Fault	3.6	53.5	81.9
			Fault – 9	3.6	1.8	1.8
6.	5 – 7	43.2	5 – Fault	6.8	55.2	83.5
			Fault – 7	6.8	3.4	3.4
7.	5 – 6	43.2	5 – Fault	3.5	54.2	83.8
			Fault – 6	3.6	1.8	1.8
8.	6 – 7	39.4	6 – Fault	6.3	18.0	35.2
			Fault – 7	6.3	32.7	39.4
9.	5 – 11	47.0	5 – Fault	3.2	9.0	13.9
			Fault – 11	2.9	47.7	74.7
10.	2 – 11	46.2	2 – Fault	1.4	32.2	51.2
			Fault – 11	1.4	22.5	35.2
11.	3 – 2	42.7	3 – Fault	2.0	28.3	44.0
			Fault – 2	1.8	24.4	36.5
12.	3 – 4	39.4	3 – Fault	3.0	22.4	33.7
			Fault – 4	3.1	27.8	40.4
13.	11 – 12	47.0	11 – Fault	1.9	44.9	73.8
			Fault – 12	2.0	11.2	14.8
14.	12 – 13	39.7	12 – Fault	3.4	15.0	24.6
			Fault – 13	3.4	38.4	55.7
15.	14 – 13	36.7	14 – Fault	5.6	35.7	52.2
			Fault – 13	5.6	11.9	19.7
16.	14 – 15	36.7	14 – Fault	1.4	44.6	64.3
			Fault – 15	1.4	2.5	5.3
17.	16 – 14	38.2	16 – Fault	8.1	35.2	50.1
			Fault – 14	8.1	7.8	16.0
18.	17 – 16	37.3	17 – Fault	1.0	25.2	37.1
			Fault – 16	1.1	15.9	24.1
19.	18 – 16	37.0	18 – Fault	9.7	31.2	42.6
			Fault – 16	9.7	10.5	20.5
20.	19 – 15	22.6	19 – Fault	0.6	20.8	27.6
			Fault – 15	0.6	14.0	18.5
21.	20 – 18	33.7	20 – Fault	8.6	28.8	37.1
			Fault – 18	8.6	11.7	20.7
22.	20 – 19	33.7	20 – Fault	1.6	36.9	52.8
			Fault – 19	1.6	1.2	2.6

Tabel 18 menunjukkan harga tegangan fase gangguan di transmisi pada gangguan dua jaringan ke tanah.

Tabel 18, Harga Tegangan Fase Gangguan di Transmisi pada Gangguan Dua Jaringan ke Tanah

No.	Jaringan Terganggu	Teganga Fase Gangguan Per unit / derajat		
		Phasa A	Phasa B	Phasa C
1.	1 – 8	1.29 < 8.43	0	0
2.	1 – 10	1.29 < 8.43	0	0
3.	2 – 3	1.30 < 6.86	0	0
4.	2 – 11	1.31 < 7.32	0	0
5.	3 – 4	1.28 < 6.78	0	0
6.	5 – 6	1.30 < 6.33	0	0
7.	5 – 7	1.30 < 6.33	0	0
8.	5 – 8	1.30 < 6.20	0	0
9.	5 – 10	1.29 < 8.10	0	0
10.	5 – 11	1.31 < 7.35	0	0
11.	6 – 7	1.26 < 4.56	0	0
12.	8 – 9	1.30 < 6.19	0	0
13.	11 – 12	1.31 < 7.35	0	0
14.	12 – 13	1.30 < 7.41	0	0
15.	13 – 14	1.27 < 11.2	0	0
16.	14 – 15	1.27 < 11.2	0	0
17.	14 – 16	1.24 < 18.5	0	0
18.	15 – 19	1.27 < 8.57	0	0
19.	16 – 17	1.24 < 18.4	0	0
20.	16 – 18	1.22 < 20.7	0	0
21.	18 – 20	1.23 < 22.1	0	0
22.	19 – 20	1.23 < 22.1	0	0

IV. KESIMPULAN

Dari hasil simulasi dengan software power word dan ETAP Power Station 4.0 dapat disimpulkan sebagai berikut:

Inti dari penggunaan Power World Simulator dalam klasifikasi jenis-jenis gangguan pada sistem tenaga listrik Jawa-Bali 500 kV 20 bus yaitu simulasi gangguan dalam bentuk single line diagram dengan menggunakan salah satu program yang ada dalam Power World Simulator yaitu Fault Analysis. Dengan memberikan data tiap elemen-elemen sistem tenaga listrik pada simulasi dan memberikan kemungkinan pengubahan data pada sistem yang sudah ada, program simulasi gangguan hubung singkat ini dapat digunakan sebagai alat analisis pada sistem tenaga listrik. Power World Simulator Fault Analysis mampu menganalisis gangguan pada sistem dan memberikan solusi perhitungan arus dan tegangan fasa gangguan pada sistem tenaga listrik. Diagnosa gangguan hubung singkat pada sistem tenaga listrik Jawa-Bali 500 kV 20 Bus menggunakan Power World Simulator dapat menganalisis arus dan tegangan gangguan, serta arus dan tegangan fasa terganggu pada tiap-tiap elemen pada sistem dan saluran transmisi secara terperinci. Validasi ETAP Power Station 4.0 untuk melihat karakteristik kestabilan transient dari generator pembangkitan pada sistem tenaga listrik sebelum dan sesudah terjadi gangguan.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] M. Ali, D. Ajiatmo, and M. R. Djalal, "Aplikasi Modified-Imperialist-Competitive-Algorithm (MICA) Untuk Merekonfigurasi Jaringan Radial Tenaga Listrik Pada Penyulang Mojoagung," *JEEE-U (Journal Electr. Electron. Eng.*, vol. 1, no. 2, pp. 49–53, 2017.
- [2] A. Cahyono, H. K. Hidayat, S. Arfaah, and M. Ali, "Rekonfigurasi Jaringan Distribusi Radial Untuk Mengurangi Rugi Daya Pada Penyulang Jatirejo Rayon Mojoagung Menggunakan Metode Binary Particle Swarm Optimization (BPSO)," in *SAINTEK II-2017, UB, Malang*, 2017, pp. 103–106.
- [3] H. Saadat, "Power System Analysis," *Climate Change 2013 - The Physical Science Basis*. pp. 1–720, 1999.
- [4] J. D. Glover, M. S. Sarma, and T. Overbye, *Power System Analysis and Design*, vol. 5, no. 7. 2008.
- [5] P. S. Kundur, "Power system stability," in *Power System Stability and Control, Third Edition*, 2017, pp. 8-1-8–11.
- [6] "Wind and solar power systems: design, analysis, and operation," *Choice Rev. Online*, vol. 43, no. 6, pp. 43-3410-43–3410, 2013.
- [7] S. Gudzius, L. A. Markevicius, and A. Morkvenas, "Characteristics of fault detection system for smart grid distribution network," *Elektron. ir Elektrotechnika*, no. 6, pp. 123–126, 2011.
- [8] Y. Gong and A. Guzman, "Integrated fault location system for power distribution feeders," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 49, no. 3, pp. 1071–1078, 2013.
- [9] Adib Gustian Nigara & Yohanes Primadiyono, "Analisis Aliran Daya Sistem Tenaga Listrik pada Bagian Texturizing di PT Asia Pasific Fibers Tbk Kendal menggunakan Software ETAP Power Station 4 . 0," *Tek. Elektro*, vol. 7, no. 1, pp. 2–5, 2015.
- [10] H. Kaur, Y. S. Brar, and J. S. Randhawa, "Optimal power flow using power world simulator," in *EPEC 2010 - IEEE Electrical Power and Energy Conference: "Sustainable Energy for an Intelligent Grid,"* 2010.
- [11] K. Sedghisigarchi, "Power flow control of inverter based distributed generators in LV microgrids," in *IEEE Power and Energy Society General Meeting*, 2011.
- [12] E. Aprilia, K. Meng, Z. Y. Dong, Y. Jia, and Z. Xu, "Hierarchical power flow algorithm for standalone hybrid AC/Multi-DC microgrids," in *IEEE Power and Energy Society General Meeting*, 2018, vol. 2018–Janua, pp. 1–5.
- [13] P. Doloksaribu, "Analisa Keandalan Sistem Distribusi Tenaga Listrik," *Dielektrika*, vol. 1, no. 1, pp. 20–25, 2010.
- [14] D. Ajiatmo and M. Ali, "Analisa Sistem Instalasi Penangkap Petir Pada Bangunan Bertingkat.," *Intake J. Penelit. Ilmu Tek. Dan Terap.*, vol. 3, no. 1, pp. 48–60, 2012.
- [15] H. Nurohmah, A. Raikhani, and M. Ali, "Rekonfigurasi Jaringan Distribusi Radial Menggunakan Modified Firefly Algorithms (MFA) Pada Penyulang Tanjung Rayon Jombang," *JEEE-U (Journal Electr. Electron. Eng.*, vol. 1, no. 2, p. 13, 2017.