

## **BAB II**

### **TINJAUAN PUSTAKA**

#### **2.1 Penelitian Terdahulu**

Berikut adalah penelitian terdahulu yang berkaitan dengan penelitian ini diantaranya adalah Krisna Ramadhan, 2021 dalam skripsinya yang berjudul “**Studi Pemasangan *Distributed Generation* (DG) Terhadap Profil Tegangan pada JTM 20 kV PT.PLN (PERSERO) Area Pontianak**”, lulusan dari Universitas Tanjungpura Pontianak yaitu melakukan penelitian yang bertujuan untuk mengetahui pengaruh pemasangan *Distributed Generation* (DG) terhadap profil tegangan yang terjadi pada JTM. Pemasangan DG bertujuan untuk memperbaiki nilai jatuh tegangan yang terjadi pada saluran agar sesuai dengan standar yang telah ditentukan oleh SPLN No. 72 Tahun 1987. Penelitian ini dilakukan menggunakan studi aliran daya dengan metode *Newton-Raphson* untuk mengetahui nilai tegangan bus dan jatuh tegangan terhadap setiap skenario pemasangan DG yang dilakukan. Penelitian ini dilakukan pada Penyulang Raya 10 dan Penyulang Raya 15 dengan 3 skenario pemasangan DG yaitu pemasangan 1 DG, pemasangan 2 DG dan pemasangan 1 DG pada bus baru yang terletak di ujung saluran. Pada Penyulang Raya 10, nilai jatuh tegangan pada bus 93 untuk skenario 1 ialah sebesar 4.048%, nilai jatuh tegangan pada bus 93 untuk skenario 2 ialah sebesar 0.392% dan nilai jatuh tegangan pada bus 93 untuk skenario 3 ialah sebesar 0.065%. Pada Penyulang Raya 15, nilai jatuh tegangan pada bus 77 untuk skenario 1 ialah sebesar 5.298%, nilai jatuh tegangan pada bus 77 untuk skenario 2 ialah sebesar 0.925% dan nilai jatuh tegangan pada bus 77 untuk skenario 3 ialah sebesar 0.177%. Berdasarkan hasil yang didapat dapat disimpulkan bahwa pemasangan DG pada JTM 20 kV dapat memperbaiki besarnya jatuh tegangan yang terjadi pada penyulang sehingga dapat mengakibatkan meningkatnya nilai tegangan terima pada sisi pelanggan [1].

Ana Dwi Ernia, 2017. Dalam skripsi yang berjudul **Analisa Gangguan Hubung Singkat pada Sistem Tenaga Listrik Di Pertamina EP- Central Processing Plant Area Gunduh Menggunakan Software ETAP 12.6**. Penelitian ini membahas tentang gangguan hubung singkat, dimana analisa gangguan hubung singkat dilakukan pada sistem tenaga listrik di Pertamina EP-Central Processing

*Plant Area* Gundih. Gangguan hubung singkat dapat dianalisa dengan menggunakan metode simulasi dan perhitungan manual dengan tujuan untuk mengetahui seberapa besar arus hubung singkat yang terjadi di tiap bus yang berbeda secara bergantian. Hasil kesimpulan dari analisa gangguan hubung singkat adalah arus gangguan hubung singkat sebelum melewati trafo dan sesudah melewati trafo berbeda. Bus yang tersambung tepat setelah trafo dengan bus yang tersambung ke beban memiliki nilai arus hubung singkat yang sama yaitu pada bus 239 dengan MCC 4111A dengan besar arus 40,571 kA gangguan 3 fasa, 42,323 kA gangguan satu fasa ke tanah. Perhitungan arus hubung singkat bisa digunakan untuk menentukan: kapasitas pengaman, jenis relay, dan tempat pemasangan relay yang tepat. [2].

Agusthinus S. Sampeallo, 2019 dalam skripsinya yang berjudul “**Analisis Gangguan Hubung Singkat pada Jaringan Pemakaian Sendiri PLTU BOLOK PT.SMSE (IPP) Unit 3 dan 4 Menggunakan Software Etap 12.6.0**”, lulusan dari Universitas Nusa Cendana melakukan penelitian yang bertujuan untuk mengetahui arus gangguan hubung singkat terbesar dengan bantuan *software* ETAP 12.6.0. Hasil simulasi hubung singkat dengan ETAP 12.6.0 akan dibandingkan dengan perhitungan secara manual berdasarkan nilai impedansi urutan positif, negatif dan nol dari titik lokasi gangguan. Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan, diketahui bahwa jenis gangguan hubung singkat dua fasa ke tanah merupakan jenis gangguan terbesar yaitu sebesar 10.615 kA pada bus generator. Sedangkan untuk jenis gangguan hubung singkat yang terkecil yaitu jenis gangguan satu fasa ke tanah yaitu sebesar 3.967 kA pada bus *OutGoing* II. Dari hasil simulasi yang dilakukan, juga dapat diketahui bahwa perubahan nilai arus gangguan hubung singkat dipengaruhi perubahan jumlah beban yang beroperasi. Semakin banyak beban yang beroperasi nilai impedansi urutan positif dan negatif semakin kecil dan nilai arus hubung singkat akan semakin besar, sedangkan impedansi urutan nol tidak berpengaruh terhadap jumlah beban yang beroperasi, begitupun dengan keadaan sebaliknya [3].

Agus Supardi, 2014 dalam skripsinya yang berjudul “**Analisis Gangguan Hubung Singkat Satu Fasa ke Tanah pada Sistem Distribusi Standar IEEE 13 Bus**”, lulusan dari Universitas Muhammadiyah Surakarta melakukan penelitian

tentang analisis gangguan hubung singkat satu fasa ke tanah pada sistem distribusi standar IEEE 13 bus. Analisis arus hubung singkat satu fasa ke tanah pada sistem distribusi dilakukan dengan bantuan software ETAP *Power Station 7.0*. Penelitian diawali dengan membuat model sistem distribusi standar 13 bus dengan menggunakan ETAP *Power Station 7.0*. Data-data sistem yang diperlukan kemudian dimasukkan ke dalam model yang terdiri dari data impedansi saluran distribusi, data kapasitor, data trafo, data beban dan data DG. Setelah modelnya lengkap kemudian dilakukan simulasi aliran daya untuk mengetahui apakah model yang dibuat sudah sempurna atau belum. Kemudian ditentukan lokasi yang akan terjadi gangguan hubung singkat. Arus hubung singkat pada bus yang terganggu dihitung setelah 30 siklus (kondisi *steady state*). Hasil simulasi menunjukkan bahwa pada saat sistem distribusi belum dipasang DG maka arus gangguan satu fasa ke tanah hanya ditentukan oleh lokasi gangguan saja. Gangguan yang terjadi di dekat *power grid* akan menghasilkan arus hubung singkat yang lebih besar. Pada saat sistem distribusi dipasang DG maka akan terjadi kenaikan arus khususnya bila lokasi gangguannya di dekat DG. Semakin banyak DG yang terpasang pada suatu bus tertentu maka arus gangguannya akan semakin besar [4].

Hasil yang diperoleh dari penelitian-penelitian tersebut menunjukkan hasil yang positif. Perbedaan penelitian yang dilakukan penulis adalah simulasi hubung singkat dengan menggunakan *software* ETAP 12.6.0 serta wilayah penelitian ini menggunakan Penyulang Area Pontianak, untuk metode aliran daya menggunakan metode *Newton-Rapshon*. Selain itu, pada penelitian tugas akhir ini menambahkan DG pada jaringan distribusi yang dimana peletakannya ditentukan menggunakan metode *Voltage Stability Index (VSI)* dan penelitian tugas akhir ini menggunakan 2 skenario, dimana skenario pemasangan DG dilakukan berdasarkan jumlah pemasangan dan lokasinya.

## **2.2 Sistem Distribusi Tenaga Listrik**

Tenaga listrik merupakan bentuk energi sekunder yang dibangkitkan, ditransmisikan dan didistribusikan kepada pelanggan/konsumen dan dimanfaatkan untuk segala macam keperluan. Sistem tenaga listrik merupakan rangkaian instalasi tenaga listrik yang terdiri dari sistem pembangkitan, sistem transmisi dan sistem

distribusi yang saling terintegrasi dan berfungsi untuk memenuhi kebutuhan energi listrik bagi semua orang.

Sistem distribusi merupakan penyaluran energi listrik dari Gardu Induk (GI) ke konsumen. Terdapat 2 (dua) sistem distribusi yaitu distribusi primer dan distribusi sekunder. Distribusi primer, penyalurannya dimulai dari GI (sisi sekunder trafo daya) ke gardu distribusi (sisi primer trafo distribusi) atau dari gardu induk langsung ke konsumen tegangan menengah 20 kV. dimana tegangan tinggi terlebih dahulu diturunkan menjadi tegangan menengah sebesar 20 kV melalui transformator *step down*. Distribusi sekunder, penyalurannya dimulai dari gardu distribusi (sisi sekunder trafo distribusi) ke konsumen tegangan rendah. Energi tenaga listrik disalurkan melalui penyulang-penyulang yang terdapat pada gardu distribusi. Fungsi gardu distribusi untuk menurunkan tegangan distribusi primer menjadi tegangan rendah atau tegangan distribusi sekunder sebesar 220/380 V. Konsumen tenaga listrik disambung dari Jaringan Tegangan Rendah (JTR) melalui Saluran Rumah (SR). Dari SR, energi listrik masuk ke Alat Pembatas dan Pengukur (APP) terlebih dahulu sebelum memasuki instalasi rumah milik konsumen. APP berfungsi membatasi daya dan mengukur pemakaian energi listrik oleh konsumen [7].

### **2.3 Distributed Generation (DG)**

Pesatnya perkembangan teknologi, pada saat ini dikembangkan pembangkit-pembangkit baru yang dihubungkan dengan jaringan distribusi atau disebut dengan DG. DG merupakan sebuah pembangkit tenaga listrik yang berkapasitas kecil dengan tujuan menghasilkan energi listrik dari beberapa sumber energi yang berkapasitas kecil dan dihubungkan langsung pada jaringan distribusi atau pada sisi pelanggan dimana teknologi pembangkitan energi listrik dan terhubungnya. DG dengan beban secara signifikan berbeda dengan teknologi yang dimiliki dari pembangkit tenaga listrik terpusat. Ada begitu banyak teknologi dari DG yang mana sumber energi listrik pada DG ialah dengan memanfaatkan energi baru terbarukan (*renewable*) dan juga energi konvensional. Adapun klasifikasi jenis DG berdasarkan ukuran pembangkitan dapat dibedakan menjadi 4 yaitu [8]:

**Tabel 2.1** Klasifikasi DG Berdasarkan Kapasitas Pembangkit

<b>Jenis DG</b>	<b>Kapasitas Pembangkit</b>
<i>Micro</i>	1 Watt - 5 kW
<i>Small</i>	5 kW – 5 MW
<i>Medium</i>	5 MW – 50 MW
<i>Large</i>	50 MW – 300 MW

(Sumber: Thomas Ackerman, Goran Anderson, Lennart Soder,2001)

Klasifikasi jenis DG berdasarkan teknologi pembangkit adalah sebagai berikut:

**Tabel 2.2** Klasifikasi Jenis DG Berdasarkan Teknologi Pembangkit

<b>Teknologi DG</b>	<b>Kapasitas per Modul</b>
<b><i>Fossil Fuel</i></b>	
<i>Combined cycle gas T.</i>	35–400 MW
<i>Internal combustion engines</i>	5 kW–10 MW
<i>Combustion turbine</i>	1–250 MW
<i>Micro-Turbines</i>	35 kW–1 MW
<b><i>Renewable Resource</i></b>	
<i>Small hydro</i>	1–100 MW
<i>Micro hydro</i>	25 kW–1 MW
<i>Wind turbine</i>	200 Watt–3 MW
<i>Photovoltaic arrays</i>	20 Watt–100 kW
<i>Solar thermal, central receiver</i>	1–10 MW
<i>Solar thermal, Lutz system</i>	0–80 MW
<i>Biomass, e.g. based on gastification</i>	100 kW–20 MW
<i>Fuel cells, phosacid</i>	200 kW–2 MW
<i>Fuel cells, molten carbonate</i>	250 kW–2 MW
<i>Fuel cells, proton exchange</i>	1 kW–250 kW
<i>Fuel cells, solid oxide</i>	250 kW–2 MW
<i>Geothermal</i>	5–100 MW
<i>Ocean energy</i>	100 kW–1 MW
<i>Stirling engine</i>	2–10 kW
<i>Battery storage</i>	500 kW–5 MW

(Sumber: Thomas Ackerman, Goran Anderrson, Lennart Soder,2001)

## 2.4 Pemasangan (Interkoneksi) DG pada Jaringan Distribusi

Terhubungnya DG pada jaringan distribusi membawa pengaruh terhadap sistem pengoperasian jaringan distribusi. Beberapa pengaruh akibat terhubungnya DG pada jaringan distribusi adalah [9]:

### 1. Permasalahan Tegangan

Jika kapasitas pembangkitan DG sesuai dengan kebutuhan pada suatu jaringan distribusi maka dapat meningkatkan profil tegangan sehingga pelanggan dapat menerima energi listrik dengan baik. Sebaliknya jika kapasitas pembangkitan DG terlalu besar dan jaringan distribusi dalam keadaan buruk, tegangan yang dihasilkan bisa sangat besar dan dapat merusak peralatan-peralatan listrik.

### 2. Proteksi

Terhubungnya DG pada jaringan distribusi dapat menyebabkan arah arus gangguan berubah. Sehingga dibutuhkan penyesuaian terhadap sistem proteksi yang telah terpasang pada jaringan distribusi. Apabila sistem proteksi sudah disesuaikan dengan arah arus, penanganan gangguan lebih efektif sehingga dapat meningkatkan keandalan sistem distribusi.

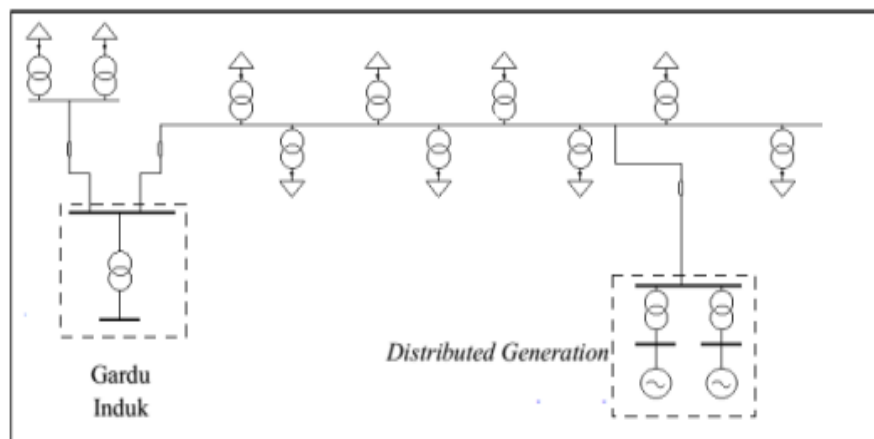
### 3. Kualitas Daya

Jika kapasitas pembangkitan DG sesuai dengan kebutuhan pada suatu jaringan distribusi maka dapat meningkatkan kualitas daya, akan tetapi jika kapasitas pembangkitan DG terlalu besar dan melebihi total beban maka dapat meningkatkan rugi-rugi.

### 4. Kestabilan

Bertambahnya kapasitas DG yang terhubung pada jaringan distribusi membawa efek yang sangat penting pada kestabilan sistem tenaga listrik. Dimana interkoneksi DG dapat meningkatkan persentase kestabilan pada jaringan distribusi.

Berikut adalah contoh interkoneksi DG pada jaringan distribusi tenaga listrik yang diperlihatkan seperti pada gambar 2.1.



**Gambar 2.1.** Interkoneksi DG pada Jaringan Distribusi Tenaga Listrik  
(Sumber: B. Huang, 2006)

Adapun pemasangan DG secara garis besar atas tiga komponen, yaitu [10]:

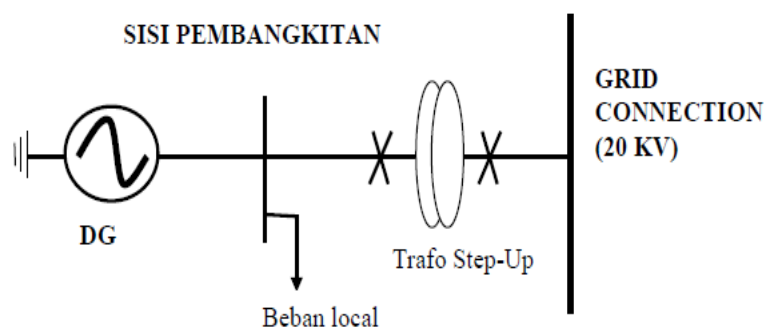
#### 2.4.1 Sumber Energi Utama (*Prime Energy Source*)

Hal ini menunjuk pada teknologi DG sebagai sumber energi seperti energi surya, angin, mikrohidro, pasang surut dan biomassa. Setiap teknologi DG memiliki karakter yang berbeda-beda dalam menghasilkan energi, misalnya tipikal energi yang dihasilkan oleh PV dan *fuel cell* berupa *direct current* atau *wind turbin* yang tipikal energinya berupa energi mekanis (dihasilkan dari putaran pada turbin).

Adapun interkoneksi DG harus memenuhi syarat sinkronisasi pada jaringan tegangan menengah (JTM) sebagai berikut:

1. Tegangan yang dihasilkan oleh DG harus sama dengan tegangan distribusi yaitu sebesar 20 kV.
2. Frekuensi sistem juga harus sama yaitu sebesar 50 Hz.
3. Urutan fasa tegangan dan fasa antar sistem harus sama dengan fasa saluran sistem.

Berikut merupakan interkoneksi DG pada jaringan distribusi 20 kV yang ditunjukkan oleh gambar di bawah ini:



**Gambar 2.2.** Interkoneksi DG

(Sumber: D. Siregar, 2011)

#### 2.4.2 Power Converter

*Power converter* dalam interkoneksi, berfungsi untuk mengubah energi dari sumber energi utama (*prime energy resources*) menjadi energi dengan level frekuensi tertentu (50Hz - 60Hz). Secara garis besar, ada 3 kategori *power converter* yang digunakan dalam interkoneksi, yaitu:

1. Generator sinkron
2. Generator induksi
3. *Static power converter*

Generator sinkron dan generator induksi mengkonversi putaran energi mekanis ke dalam tenaga listrik dan sering disebut dengan *routing power converter*. *Static power converter* (biasa dikenal dengan inverter) tersusun atas *solid-device* seperti transistor. Pada inverter, transistor mengkonversi energi dari sumber menjadi energi dengan frekuensi 50-60Hz dengan *switching (switch on-off)*. Teknologi DG yang dijual di pasaran, kebanyakan telah diintegrasikan dengan *power converter* masing-masing. Misalnya *fuel cell* yang telah diintegrasikan dengan inverter. *Power converter* memiliki efek yang besar terhadap DG pada sistem distribusi. Oleh sebab itu dibutuhkan peralatan interkoneksi untuk menjamin keamanan dan kestabilan operasi. Generator sinkron, generator induksi dan inverter memberikan respon yang sangat berbeda terhadap variasi kondisi dari sistem tenaga.

#### 2.4.3 Sistem Interface dan Peralatan Proteksi

Peralatan ini ditempatkan sebagai penghubung antara terminal output dari *power converter* dan jaringan primer. Komponen interkoneksi ini biasanya terdiri atas *step-up transformer*, *metering* kadang ditambahkan *controller* dan *relay*



proteksi. Dalam komponen ini terkadang terdapat *communication link* untuk mengontrol kondisi pada sistem.

## 2.5 Studi Aliran Daya

Studi aliran daya adalah suatu solusi pada jaringan sistem tenaga pada keadaan mantap (*steady state*) yang tunduk kepada batasan ketidaksamaan tertentu dalam operasi sistem. Batasan-batasan itu dapat berupa bentuk Tegangan ( $V$ ), daya reaktif ( $Q$ ) yang dibangkitkan oleh generator, *setting tap* transformator pada saat melayani beban, dan sebagainya. Solusi aliran daya memberikan hasil berupa: tegangan bus dan sudut fasanya serta juga injeksi daya pada semua bus demikian juga aliran daya melalui saluran interkoneksi (cabang) antar bus. Dalam analisis aliran daya, terdapat beberapa metode klasik yang sering digunakan, antara lain sebagai berikut [11]:

1. Metode *Gaus-Seidel*
2. Metode *Newton-Rapshon*
3. Metode *Fast-Decouple*

Dalam penyelesaian sebuah aliran daya, sistem dioperasikan dalam keadaan seimbang. Setiap bus pada suatu sistem tenaga listrik terdapat daya aktif ( $P$ ), daya reaktif ( $Q$ ), besar tegangan ( $|V|$ ), dan sudut fasa tegangan ( $\delta$ ). Jadi setiap bus terdapat empat besaran yaitu  $P$ ,  $Q$ ,  $|V|$ , dan  $\delta$ . Di dalam studi aliran daya, dua dari keempat besaran itu diketahui dan dua yang lainnya perlu dicari. Berdasarkan hal tersebut diatas, bus-bus dibedakan menjadi tiga jenis yaitu bus beban, bus generator, dan bus berayun/bus referensi (*slack bus*).

### 1. Bus beban (Bus P-Q)

Bus beban adalah bus yang tidak memiliki unsur pembangkitan tenaga listrik/generator dan yang terhubung secara langsung ke beban. Bus beban sering disebut dengan bus P-Q, karena pada bus beban yang dapat diatur adalah kapasitas daya yang terpasang. Pada bus ini, selisih daya yang dibangkitkan oleh generator dengan daya yang diserap oleh beban diketahui nilainya. Besar nilai  $P$  pada bus ini merupakan daya aktif terpasang yang diukur dalam satuan Watt ( $W$ ), sedangkan besar nilai  $Q$  merupakan daya reaktif terpasang yang diukur dalam Volt Ampere Reaktif ( $VAR$ ). Pada bus ini, nilai  $P$  dan  $Q$  diketahui besarnya, sementara  $|V|$  dan  $\delta$  harus dicari (dihitung) berapa nilainya.

## 2. Bus generator (Bus P-|V|)

Bus generator atau biasa disebut bus voltage controlled merupakan bus yang terhubung dengan generator yang dapat dikontrol daya aktif (P) dan tegangan ( $|V|$ ) yang biasanya dijaga konstan. Pengaturan daya aktif pada bus ini diatur dengan mengontrol penggerak mula (*prime mover*), sedangkan pengaturan tegangan pada bus ini diatur dengan mengontrol arus eksitasi pada generator. Oleh karena daya aktif (P) dan tegangan ( $|V|$ ) dapat dikontrol maka bus ini sering disebut sebagai bus P- $|V|$ . Pada bus ini, nilai P dan  $|V|$  diketahui besarnya, sementara Q dan  $\delta$  harus dicari (dihitung) berapa nilainya.

## 3. Bus referensi (*Slack bus*)

Bus referensi (*slack bus*) adalah sebuah bus generator yang dianggap sebagai bus utama karena merupakan bus yang memiliki kapasitas daya yang paling besar. Oleh karena daya yang dapat disalurkan oleh bus ini besar, maka pada bus ini hanya nilai tegangan  $|V|$  dan sudut fasa  $\delta$  yang bisa diatur, sedangkan besar daya aktif P dan daya reaktif Q akan dicari dalam perhitungan.

## 2.6 Aliran Daya Menggunakan Metode *Newton-Raphson*

Studi aliran daya atau *loadflow* adalah bagian penting dalam analisa sistem tenaga. Pada umumnya perhitungan aliran daya berguna untuk perencanaan, penjadwalan ekonomis, dan kontrol pada sistem ekisting untuk pengembangan dimasa yang datang. Permasalahan aliran daya terdiri dari nilai tegangan dan sudut fasa tegangan pada tiap-tiap bus dan daya aktif dan reaktif yang mengalir pada tiap saluran. Pada solusi permasalahan aliran daya, sistem diasumsikan dalam operasi seimbang dan digunakan model per fasa. Tiap bus dalam sistem tenaga listrik melibatkan empat besaran yaitu : daya aktif (P), daya reaktif (Q), tegangan (V) dan sudut fasa tegangan ( $\delta$ ). Bus-bus sistem umumnya diklasifikasikan dalam tiga tipe yaitu [15]:

1. *Slack bus* : dikenal sebagai *swing bus* diambil sebagai referensi dimana tegangan  $|V|$  dan sudut fasa tegangan  $\delta$  diketahui. Bus ini menghasilkan perbedaan antara beban terjadwal dengan daya yang dibangkitkan karena disebabkan oleh rugi-rugi pada saluran.

2. Bus beban (*load bus*) : pada bus ini daya aktif P dan daya reaktif Q diketahui. Tegangan dan sudut fasa tegangan belum diketahui. Bus ini umumnya disebut bus P-Q.
3. *Regulated bus* : bus ini merupakan bus pembangkit yang dikenal dengan bus kontrol tegangan. Pada bus ini daya aktif dan tegangan diketahui. Bus ini umumnya disebut bus P-V.

Menurut tipikal bus pada sistem tenaga, saluran transmisi direpresentasikan oleh model saluran  $\pi$  dimana impedansi saluran telah dikonversikan pada admitansi per unit berdasarkan MVA dasar.

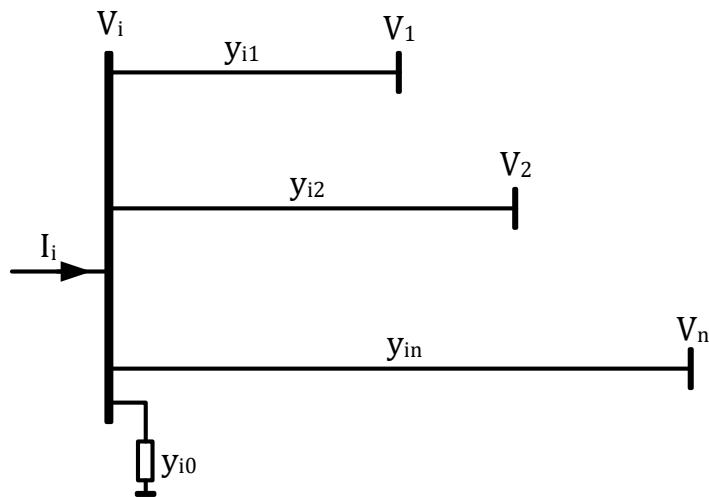
Menggunakan hukum *Kirchoff* untuk arus (*Kirchoff Current Law*) pada bus diperoleh:

$$I_i = y_{i0}V_i + y_{i1}(V_i - V_1) + y_{i2}(V_i - V_2) + \dots + y_{in}(V_i - V_n) \dots\dots\dots(2.1)$$

$$I_i = (y_{i0} + y_{i1} + y_{i2} + \dots + y_{in})V_i - y_{i1}V_1 - y_{i2}V_2 - \dots - y_{in}V_n \dots\dots\dots(2.2)$$

atau

$$I_i = V_i \sum_{j=0}^n y_{ij} - \sum_{j=1}^n y_{ij} V_j \quad j \neq i \quad \dots\dots\dots(2.3)$$



**Gambar 2.3.** Tipikal Bus pada Sistem Tenaga

(Sumber: Bonar Sirait, 2017)

Daya aktif dan reaktif pada bus i adalah :

$$P_i + jQ_i = V_i I_i^* \dots\dots\dots(2.4)$$

atau

$$I_i = \frac{P_i - jQ_i}{V_i^*} \dots\dots\dots(2.5)$$

Substitusi  $I_i$  kedalam persamaan berikut:

$$\frac{P_i - jQ_i}{V_i^*} = V_i \sum_{j=0}^n y_{ij} - \sum_{j=1}^n y_{ij} V_j \quad j \neq i \dots\dots\dots(2.6)$$

Dari hubungan di atas, rumus matematika permasalahan aliran daya menghasilkan persamaan aljabar non-linier yang harus dipecahkan dengan dengan teknik iterasi. Untuk sistem tenaga yang kompleks aliran daya dengan metode *Newton-Raphson* lebih efisien dan praktis. Jumlah iterasi yang diperlukan untuk mendapatkan solusi tidak tergantung pada ukuran sistem, tetapi evaluasi yang lebih fungsional diperlukan pada setiap iterasi. Karena dalam masalah aliran daya nyata dan besar tegangan ditentukan untuk bus yang dikontrol tegangan, persamaan aliran daya dirumuskan dalam bentuk kutub. Untuk tipikal bus pada sistem tenaga yang ditunjukkan di atas, arus masuk ke bus  $i$  merupakan persamaan (2.1). Persamaan dapat ditulis kembali dalam bentuk matrik bus admitansi sebagai berikut:

$$I_i = \sum_{j=1}^n Y_{ij} V_j \dots\dots\dots(2.7)$$

Karena,

$$Y_{ij} = G_{ij} + j B_{ij} = |Y_{ij}| \angle \theta_{ij}$$

$$V_j = |V_j| \angle \delta_j$$

Dimana:

$$|Y_{ij}| = \sqrt{G^2 + B^2}$$

$$\theta_{ij} = \tan^{-1} G/B$$

Pada persamaan diatas,  $j$  termasuk bus  $i$ . Dalam bentuk polar diperoleh persamaan berikut:

$$I_i = \sum_{j=1}^n |Y_{ij}| |V_j| \angle \theta_{ij} + \delta_j \dots\dots\dots(2.8)$$

Daya kompleks pada bus  $i$  adalah:

$$P_i - jQ_i = V_i^* I_i \dots\dots\dots(2.9)$$

Substitusi persamaan (2.7) untuk  $I_i$  ke dalam persamaan (2.9)

$$P_i - jQ_i = |V_s| \angle -\delta_i \sum_{j=1}^n |Y_{ij}| |V_j| \angle \theta_{ij} + \delta_j \dots\dots\dots(2.10)$$

Memisahkan bagian real dan imajiner

$$P_i = \sum_{j=1}^n |V_i| |V_j| |Y_{ij}| \cos(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \dots\dots\dots(2.11)$$

$$Q_i = -\sum_{j=1}^n |V_i| |V_j| |Y_{ij}| \sin(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \dots\dots\dots(2.12)$$

Persamaan (2.11) dan (2.12) merupakan satu persamaan aljabar nonlinier dalam hal variabel independen, besar tegangan (p.u), dan sudut fasa (radian). Dengan bantuan Deret Taylor, mengabaikan semua suku orde yang lebih tinggi menghasilkan himpunan persamaan linier. Sehingga dapat diuraikan sebagai berikut :

Sehingga persamaannya menjadi berikut:

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \dots \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_1 & \vdots & J_2 \\ \dots & \vdots & \dots \\ J_3 & \vdots & J_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \dots \\ \Delta |V| \end{bmatrix} \dots\dots\dots(2.13)$$

Dimana elemen  $J_1$  adalah:

$$\frac{\partial P_i}{\partial \delta_i} = \sum_{j \neq i}^N |V_i| |V_j| |Y_{ij}| \sin(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \dots\dots\dots(2.14)$$

$$\frac{\partial P_i}{\partial \delta_j} = -|V_i| |V_j| |Y_{ij}| \sin(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad j \neq i \dots\dots\dots(2.15)$$

Dimana elemen  $J_2$  adalah:

$$\frac{\partial P_i}{\partial |V_i|} = 2|V_i| |Y_{ii}| \cos \theta_{ii} + \sum_{j \neq i}^N |V_j| |Y_{ij}| \sin(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \dots\dots\dots(2.16)$$

$$\frac{\partial P_i}{\partial |V_j|} = |V_i| |Y_{ij}| \cos(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad j \neq i \dots\dots\dots(2.17)$$

Dimana elemen  $J_3$  adalah:

$$\frac{\partial Q_i}{\partial \delta_i} = \sum_{j \neq i}^N |V_i| |V_j| |Y_{ij}| \cos(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \dots\dots\dots(2.18)$$

$$\frac{\partial Q_i}{\partial \delta_j} = -|V_i| |V_j| |Y_{ij}| \cos(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad j \neq i \dots\dots\dots(2.19)$$

Dimana elemen  $J_4$  adalah:

$$\frac{\partial Q_i}{\partial |V_i|} = -2|V_i| |Y_{ii}| \sin \theta_{ii} - \sum_{j \neq i}^N |V_j| |Y_{ij}| \sin (\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \dots\dots\dots(2.20)$$

$$\frac{\partial Q_i}{\partial |V_j|} = -|V_i| |Y_{ij}| \sin (\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad j \neq i \dots\dots\dots(2.21)$$

Nilai  $\Delta P_i^{(k)}$  dan  $\Delta Q_i^{(k)}$  adalah perbedaan nilai terjadwal dan perhitungan yang dikenal sebagai daya residu, yang dinyatakan oleh :

$$\Delta P_i^{(k)} = P_i^{sch} - P_i^{(k)} \dots\dots\dots(2.22)$$

$$\Delta Q_i^{(k)} = Q_i^{sch} - Q_i^{(k)} \dots\dots\dots(2.23)$$

Dalam persamaan (2.13), bus 1 diasumsikan sebagai bus slack. Matriks jacobian memberikan hubungan linier antara perubahan kecil pada sudut tegangan  $\Delta \delta_i^{(k)}$  dan besaran tegangan  $\Delta |V_i^{(k)}|$  dengan perubahan kecil daya aktif dan reaktif pada  $\Delta P_i^{(k)}$  dan  $\Delta Q_i^{(k)}$ . Elemen dari matriks Jacobian merupakan turunan parsial dari (2.11) dan (2.12), dievaluasi pada  $\Delta \delta_i^{(k)}$  dan  $\Delta |V_i^{(k)}|$ . Persamaan (2.13) dapat ditulis secara singkat sebagai berikut:

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_1 & J_2 \\ J_3 & J_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta |V| \end{bmatrix} \dots\dots\dots(2.24)$$

Perkiraan terbaru untuk tegangan bus adalah :

$$|V_i^{(k+1)}| = |V_i^{(k)}| + \Delta |V_i^{(k)}| \dots\dots\dots(2.25)$$

$$\delta_i^{(k+1)} = \delta_i^{(k)} + \Delta \delta_i^{(k)} \dots\dots\dots(2.26)$$

Jatuh Tegangan di setiap bus dalam system dari bus  $i$  adalah:

$$\Delta V_i = (V_i - V_{i+1}) \dots\dots\dots(2.27)$$

Dan Jatuh Tegangan dalam persen pada bus  $i$  adalah:

$$\Delta V_i = \frac{\Delta V_i}{V} 100 \% \dots\dots\dots(2.28)$$

Adapun prosedur solusi aliran daya dengan metode *Newton-Rapshon* adalah sebagai berikut:

1. Untuk bus-bus beban (bus P-Q) dimana  $P_i^{sch}$  dan  $Q_i^{sch}$  telah diketahui. Tegangan dan sudut fasa disetting sama dengan nilai slack bus yaitu  $|V_i^{(0)}| = 1,0 \text{ p.u}$  dan  $\delta_i^{(0)} = 0,0$ . Untuk bus-bus kontrol tegangan (bus P-V) dimana  $|V_i|$

dan  $P_i^{sch}$  telah diketahui, sudut fasanya disetting sama dengan nilai slack bus yaitu  $\delta_i^{(0)} = 0,0$ .

2. Untuk bus-bus beban  $P_i^{sch}$  dan  $Q_i^{sch}$  dihitung, serta  $\Delta P_i^{(k)}$  dan  $\Delta Q_i^{(k)}$  dihitung.
3. Untuk bus-bus kontrol tegangan  $P_i^{(k)}$  dan  $\Delta P_i^{(k)}$  dihitung.
4. Elemen-elemen matrik Jacobian ( $J_1, J_2, J_3, dan J_4$ ) dihitung.
5. Tegangan dan sudut fasa bus terbaru dihitung.
6. Proses perhitungan dilanjutkan sampai nilai residu  $\Delta P_i^{(k)}$  dan  $\Delta Q_i^{(k)}$  kurang dari toleransi yang telah ditentukan. Misalnya:

$$|\Delta P_i^{(k)}| \leq \varepsilon$$

$$|\Delta Q_i^{(k)}| \leq \varepsilon$$

Dimana :

$P_i^{sch}$  : Daya aktif terjadwal (MW)

$Q_i^{sch}$  : Daya reaktif terjadwal (MW)

$V_i$  : Tegangan bus ke-i (p.u)

$\delta_i$  : Sudut fasa tegangan bus ke-i (rad)

$\Delta P_i^{(k)}$  : Daya aktif residu pada iterasi ke-k (MW)

$\Delta Q_i^{(k)}$  : Daya reaktif residu pada iterasi ke-k (MW)

7. Setelah konvergen kemudian hitung Jatuh Tegangan dan persen jatuh tegangan pada setiap bus.

## 2.7 Pengertian Gangguan dan Klasifikasinya

Gangguan adalah suatu ketidaknormalan (*interferes*) dalam sistem tenaga listrik yang mengakibatkan mengalirnya arus yang tidak seimbang dalam sistem tiga fasa. Gangguan dapat juga didefinisikan sebagai semua kecacatan yang mengganggu aliran normal arus ke beban. Tujuan dilakukan analisa gangguan adalah [12]:

1. Penyelidikan terhadap unjuk kerja rele proteksi
2. Untuk mengetahui kapasitas rating maksimum dari pemutus tenaga

3. Untuk mengetahui distribusi arus gangguan dan tingkat tegangan sistem pada saat terjadinya gangguan.

Gangguan dapat diklasifikasikan menjadi beberapa kelompok, yaitu:

a. Berdasarkan kesimetrisannya:

1. Gangguan asimetris, merupakan gangguan yang mengakibatkan tegangan dan arus yang mengalir pada setiap fasanya menjadi tidak seimbang, gangguan ini terdiri dari:

- Gangguan Hubung Singkat Satu Fasa ke Tanah
- Gangguan Hubung Singkat Dua Fasa
- Gangguan Hubung Singkat Dua Fasa ke Tanah

2. Gangguan simetris, merupakan gangguan yang terjadi pada semua fasanya sehingga arus maupun tegangan setiap fasanya tetap seimbang setelah gangguan terjadi. Gangguan ini terdiri dari:

- Gangguan Hubung Singkat Tiga Fasa
- Gangguan Hubung Singkat Tiga Fasa ke Tanah

Semua gangguan hubung singkat di atas, arus gangguannya dihitung dengan menggunakan rumus dasar yaitu:

$$I = \frac{V}{Z} \dots\dots\dots(2.29)$$

Keterangan:

- I : Arus (A)
- V : Tegangan Sumber (V)
- Z : Impedansi jaringan (Ohm)

Yang membedakan antara gangguan hubung singkat tiga fasa, dua fasa dan satu fasa ke tanah adalah impedansi yang terbentuk sesuai dengan macam gangguan itu sendiri, dan tegangan yang memasok arus ke titik gangguan impedansi yang terbentuk dapat di tunjukkan seperti berikut ini:

Z untuk gangguan tiga fasa,  $Z = Z_1$   
 Z untuk gangguan dua fasa,  $Z = Z_1 + Z_2$   
 Z untuk gangguan satu fasa,  $Z = Z_1 + Z_2 + Z_0 \dots\dots\dots(2.30)$

Keterangan:

- $Z_1$  : impedansi urutan positif ( $\Omega$ )
- $Z_2$  : impedansi urutan negatif ( $\Omega$ )



$Z_0$  : impedansi urutan nol ( $\Omega$ )

b. Berdasarkan lama terjadi gangguannya:

1. Gangguan Transient (temporer), merupakan gangguan yang hilang dengan sendirinya apabila pemutus tenaga terbuka dari saluran transmisi untuk waktu yang singkat dan setelah itu dihubungkan kembali.
2. Gangguan Permanen, merupakan gangguan yang tidak hilang atau tetap ada apabila pemutus tenaga terbuka pada saluran transmisi untuk waktu yang singkat dan setelah itu dihubungkan kembali.

Selain klasifikasi gangguan yang telah disebutkan di atas, terbukanya pemutus tenaga tidak selalu disebabkan terjadinya gangguan pada sistem itu sendiri tetapi dapat juga disebabkan adanya kerusakan pada rele, kabel kontrol atau adanya pengaruh dari luar seperti induksi atau interferensi. Gangguan seperti ini disebut juga gangguan non-sistem.

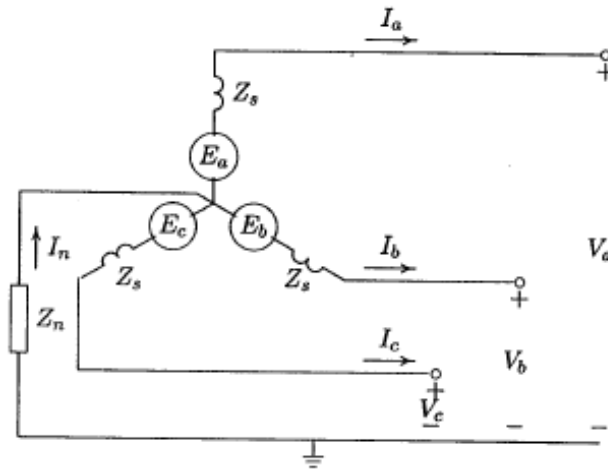
## **2.8 Studi Hubung Singkat**

Studi hubung singkat dilakukan untuk menentukan besarnya arus yang mengalir melalui sistem tenaga listrik pada berbagai jarak setelah gangguan berubah menurut waktu sampai mencapai kondisi tetap. Selama kondisi gangguan, sistem proteksi diperlukan untuk mendeteksi, menghilangkan dan mengisolasi gangguan tersebut. Hal ini dapat dilakukan pada bermacam-macam gangguan (tiga fasa simetris, fasa ke fasa, dua fasa ke tanah, satu fasa ke tanah, dan tiga fasa ke tanah). Arus hubung singkat yang begitu besar sangat membahayakan peralatan, sehingga untuk mengamankan peralatan dari kerusakan akibat hubung singkat maka hubungan kelistrikan pada bagian yang terganggu perlu diputuskan dengan peralatan pemutus tenaga atau *Circuit Breaker* (CB). Selain itu, perhitungan arus hubung singkat juga sangat penting dalam menentukan kapasitas atau kemampuan dari CB serta untuk koordinasi pemasangan rele proteksi [13].

### **2.8.1 Gangguan Hubung Singkat Tiga Fasa**

Gangguan hubung singkat tiga fasa termasuk dalam klasifikasi gangguan simetris, dimana arus maupun tegangan setiap fasanya tetap seimbang setelah gangguan terjadi. Sehingga pada sistem ini dapat dianalisa hanya dengan menggunakan urutan positif saja. Gangguan ini jarang terjadi, tetapi merupakan tipe gangguan yang paling parah karena pada setiap saluran arus gangguan sama

besarnya. Gambar 2.4, menunjukkan generator sinkron tiga fasa dengan netral diketanahkan melalui impedansi  $Z_n$  Generator menyuplai beban tiga fasa seimbang.



**Gambar 2.4.** Gangguan Hubung Singkat Tiga Fasa

Sumber: Saadat (1999:418)

Mesin sinkron membangkitkan tegangan internal tiga fasa dan direpresentasikan sebagai kelompok fasor urutan positif berikut [14]:

$$E_{abc} = \begin{bmatrix} 1 \\ a^2 \\ a \end{bmatrix} E_a \dots \dots \dots (2.31)$$

$$a = 1 \angle 120^\circ = e^{j120^\circ}$$

$$a^2 = 1 \angle 240^\circ = e^{j240^\circ} \dots \dots \dots (2.32)$$

Mesin menyuplai beban seimbang tiga fasa. Penerapan hukum *Kirchhoff* untuk tegangan pada setiap fasa menghasilkan:

$$V_a = E_a - Z_s I_a - Z_n I_n$$

$$V_b = E_b - Z_s I_b - Z_n I_n \dots \dots \dots (2.33)$$

$$V_c = E_c - Z_s I_c - Z_n I_n$$

Substitusi untuk  $I_n = I_a + I_b + I_c$ , dan penulisan persamaan (2.33) dalam bentuk matriks adalah:

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E_a \\ E_b \\ E_c \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} Z_s + Z_n & Z_n & Z_n \\ Z_n & Z_s + Z_n & Z_n \\ Z_n & Z_n & Z_s + Z_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} \dots \dots \dots (2.34)$$

atau dalam bentuk sederhana menghasilkan:

$$V_{abc} = E_{abc} - Z_{abc} I_{abc} \dots \dots \dots (2.35)$$

dimana  $V_{abc}$  adalah fasa vektor tegangan terminal dan  $I_{abc}$  adalah fasa vektor arus, kemudian diubah dalam bentuk komponen simetris yang menghasilkan:

$$AV_{a012} = E_{a012} - Z_{abc}AI_{abc} \dots\dots\dots(2.36)$$

mengalikan persamaan (2.36) dengan  $A^{-1}$ , menghasilkan:

$$\begin{aligned} V_{a012} &= E_{a012} - A^{-1}Z_{abc}AI_{a012} \\ &= E_{a012} - Z_{012}AI_{a012} \dots\dots\dots(2.37) \end{aligned}$$

Sehingga menghasilkan:

$$\begin{bmatrix} V_{a0} \\ V_{a1} \\ V_{a2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ E_a \\ 0 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} Z^0 & 0 & 0 \\ 0 & Z^1 & Z_n \\ 0 & 0 & Z^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{a0} \\ I_{a1} \\ I_{a2} \end{bmatrix} \dots\dots\dots(2.38)$$

dari komponen matrik di atas menghasilkan:

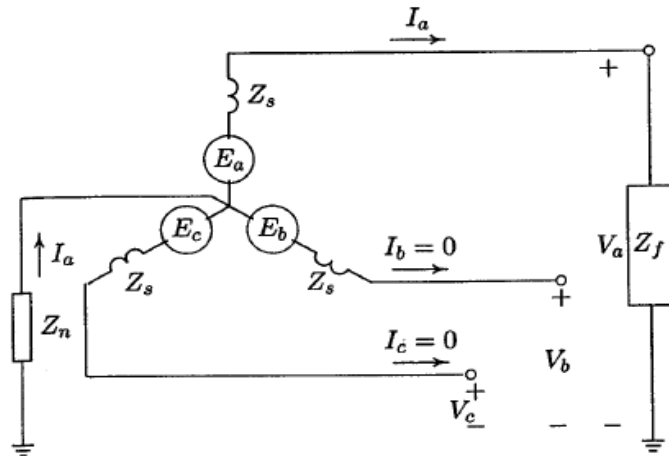
$$\begin{aligned} V_{a0} &= 0 - Z_0I_{a0} \\ V_{a1} &= E_a - Z_1I_{a1} \dots\dots\dots(2.39) \\ V_{a2} &= 0 - Z_2I_{a2} \end{aligned}$$

dimana pada gangguan hubung singkat tiga fasa ini nilai  $V_{a0} = V_{a1} = V_{a2}$ , sehingga untuk persamaan gangguan hubung singkat tiga fasa adalah:

$$I_a = \frac{E_a}{Z_n} \dots\dots\dots(2.40)$$

**2.8.2 Gangguan Hubung Singkat Satu Fasa ke Tanah**

Gangguan yang sering terjadi pada sistem tenaga listrik merupakan gangguan asimetris sehingga memerlukan metode komponen simetris, untuk menganalisa tegangan dan arus pada saat terjadinya gangguan. Gangguan yang terjadi dapat dianalisa dengan menghubungkan-singkat semua sumber tegangan yang ada pada sistem dan mengganti titik (*node*) gangguan dengan sebuah sumber tegangan yang besarnya sama dengan tegangan sesaat sebelum terjadinya gangguan di titik gangguan tersebut. Dengan menggunakan metode ini sistem tiga fasa tidak seimbang dapat direpresentasikan dengan menggunakan teori komponen simetris yaitu berdasarkan komponen urutan positif, komponen urutan negatif dan komponen urutan nol [12]. Gangguan hubung singkat satu fasa ke tanah yang terjadi pada fasa-a ke tanah dapat ditunjukkan pada gambar di bawah ini:



**Gambar 2.5.** Gangguan Hubung Singkat Satu Fasa ke Tanah

Sumber: Saadat (1999:421)

Gambar 2.5 mengilustrasikan generator tiga fasa dengan netral diketanahkan melalui impedansi  $Z_n$ . Gangguan fasa ke netral terjadi pada fasa-a melalui impedansi  $Z_f$ , dengan menganggap mula – mula generator tanpa beban, syarat batas gangguan titik adalah [14]:

$$V_a = Z_f I_a \dots\dots\dots(2.41)$$

$$I_b = I_c = 0 \dots\dots\dots(2.42)$$

Substitusi untuk  $I_b = I_c = 0$  ke komponen simetris sebagai berikut:

$$\begin{bmatrix} I_{a0} \\ I_{a1} \\ I_{a2} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \dots\dots\dots(2.43)$$

Dari persamaan matrik di atas menghasilkan:

$$I_{a0} = I_{a1} = I_{a2} = \frac{1}{3} I_a \dots\dots\dots(2.44)$$

Tegangan fasa-a dalam bentuk komponen simetris adalah:

$$V_a = V_{a1} + V_{a2} + V_{a0} \dots\dots\dots(2.45)$$

Substitusikan  $V_{a1}, V_{a2}, V_{a0}$  ke persamaan (2.39) dan nilai  $I_{a0} = I_{a1} = I_{a2}$ , menghasilkan:

$$V_a = E_a - (Z_1 + Z_2 + Z_0) I_{a0} \dots\dots\dots(2.46)$$

Dimana  $Z_0 = Z_s + 3Z_n$ , Substitusikan  $V_a$  ke persamaan (41) dan nilai  $I_a = 3I_{a0}$ , didapatlah:

$$3Z_f I_{a0} = E_a - (Z_1 + Z_2 + Z_0) I_{a0} \dots\dots\dots(2.47)$$

atau

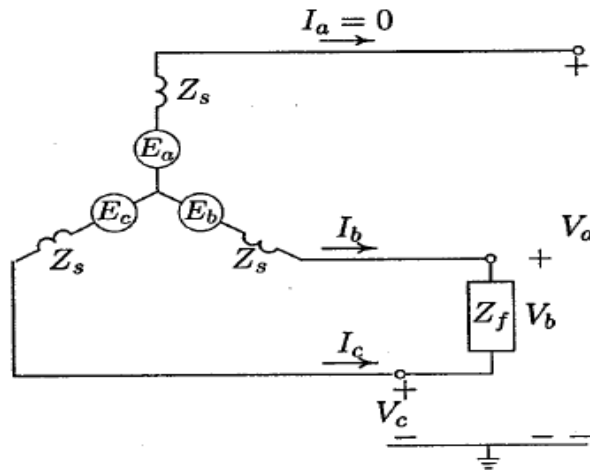
$$I_{a0} = \frac{E_a}{Z_1+Z_2+Z_0+3Z_f} \dots\dots\dots(2.48)$$

Jadi, arus gangguan satu fasa ke tanah adalah:

$$I_a = 3I_{a0} = \frac{3E_a}{Z_1+Z_2+Z_0+3Z_f} \dots\dots\dots(2.49)$$

**2.8.3 Gangguan Hubung Singkat Dua Fasa**

Hubung singkat dua fasa atau yang biasa disebut hubung singkat fasa ke fasa adalah kondisi dimana antara fasa ke fasa saling terhubung singkat. Pada gangguan hubung singkat fasa ke fasa, arus saluran tidak mengandung komponen urutan nol dikarenakan tidak ada gangguan yang terhubung ke tanah. Gambar 2.6. memperlihatkan generator tiga fasa dengan gangguan melalui sebuah impedansi  $Z_f$  diantara fasa-b dan fasa-c.



**Gambar 2.6.** Gangguan Hubung Singkat Dua Fasa

Sumber: Saadat (1999:423)

Dengan mula-mula menganggap generator tanpa beban, kondisi batas pada titik gangguan adalah [14]:

$$V_b - V_c = Z_f I_b \dots\dots\dots(2.50)$$

$$I_b + I_c = 0 \dots\dots\dots(2.51)$$

$$I_a = 0 \dots\dots\dots(2.52)$$

Substitusikan  $I_a = 0$  dan  $I_b = -I_c$  ke dalam arus komponen simetris, sehingga menghasilkan:

$$\begin{bmatrix} I_{a0} \\ I_{a1} \\ I_{a2} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ I_b \\ -I_b \end{bmatrix} \dots\dots\dots(2.53)$$

Dari persamaan matrik di atas dapat ditentukan bahwa:

$$I_a = 0 \dots\dots\dots(2.54)$$

$$I_{a1} = \frac{1}{3}(a - a^2)I_b \dots\dots\dots(2.55)$$

$$I_{a2} = \frac{1}{3}(a^2 - a)I_b \dots\dots\dots(2.56)$$

Jadi, dari persamaan (2.55) dan (2.56) dapat diketahui bahwa:

$$I_{a1} = -I_{a2} \dots\dots\dots(2.57)$$

Substitusikan  $V_{a1}$  dan  $V_{a2}$  ke persamaan (2.39) dan nilai  $I_{a1} = -I_{a2}$ , didapatkan bahwa:

$$(a^2 - a)[E_a - (Z_1 + Z_2)I_{a1}] = Z_f I_b \dots\dots\dots(2.58)$$

Substitusi nilai  $I_b$  dari persamaan (2.56) menghasilkan:

$$E_a - (Z_1 + Z_2)I_{a1} = Z_f \frac{3I_{a1}}{(a-a^2)(a^2-a)} \dots\dots\dots(2.59)$$

Arus pada setiap fasa adalah:

$$\begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ I_{a1} \\ -I_{a1} \end{bmatrix} \dots\dots\dots(2.60)$$

Jadi, untuk persamaan gangguan hubung singkat dua fasa pada fasa-b dan fasa-c adalah:

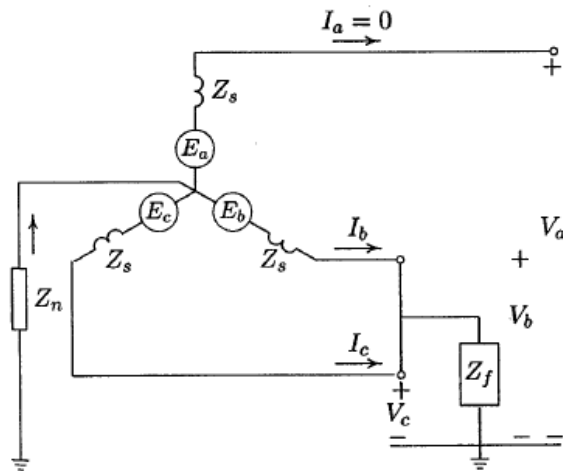
$$I_b = -I_c = (a^2 - a)I_{a1} \dots\dots\dots(2.61)$$

atau

$$I_b = -j\sqrt{3} I_{a1} \dots\dots\dots(2.62)$$

**2.8.4 Gangguan Hubung Singkat Dua Fasa ke Tanah**

Gangguan dua fasa ke tanah terjadi ketika dua buah fasa dari sistem tenaga listrik terhubung singkat ke tanah. Gambar 5 generator tiga fasa dengan gangguan melalui sebuah impedansi  $Z_f$  ke tanah diantara fasa-b dan fasa-c.



**Gambar 2.7.** Gangguan Hubung Singkat Dua Fasa ke Tanah

Sumber: Saadat (1999:425)

Dengan mengansumsikan generator dalam keadaan tidak berbeban maka [14]:

$$V_b = V_c = Z_f(I_b + I_c) \dots \dots \dots (2.63)$$

$$I_a = I_{a0} + I_{a1} + I_{a2} = 0 \dots \dots \dots (2.64)$$

$$V_b = V_{a0} + a^2V_{a1} + aV_{a2} \dots \dots \dots (2.65)$$

$$V_c = V_{a0} + aV_{a1} + a^2V_{a2} \dots \dots \dots (2.66)$$

Dari  $V_b = V_c$ , diketahuilah bahwa:

$$V_{a1} = V_{a2} \dots \dots \dots (2.67)$$

Substitusi arus komponen simetris ke dalam persamaan (2.63), menghasilkan:

$$\begin{aligned} V_b &= Z_f(I_{a0} + a^2I_{a1} + aI_{a2} + I_{a0} + aI_{a1} + a^2I_{a2}) \\ &= Z_f(2I_{a0} - I_{a1} - I_{a2}) \\ &= 3Z_fI_{a0} \dots \dots \dots (2.68) \end{aligned}$$

Substitusi  $V_b$  dari persamaan (2.68) ke persamaan (2.65) yang menghasilkan:

$$\begin{aligned} 3Z_fI_{a0} &= V_{a0} + (a^2 + a)V_{a1} \\ &= V_{a0} - V_{a1} \dots \dots \dots (2.69) \end{aligned}$$

Dari persamaan di atas maka didapatkan persamaan arus gangguan fasa-a urutan nol dan fasa-a urutan negatif pada komponen simetris sebagai berikut:

$$I_{a0} = -\frac{E_a - Z_1I_{a1}}{Z_0 + 3Z_f} \dots \dots \dots (2.70)$$

dan

$$I_{a2} = -\frac{E_a - Z_1I_{a1}}{Z_2} \dots \dots \dots (2.71)$$

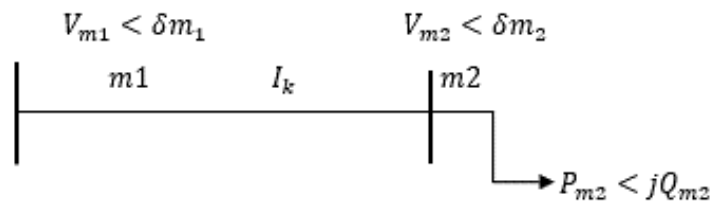
Substitusikan  $I_{a0}$  dan  $I_{a2}$  ke persamaan (2.64) yang akan menghasilkan persamaan gangguan hubung singkat dua fasa ke tanah sebagai berikut:

$$I_{a1} = \frac{E_a}{Z_1 + \frac{Z_2(Z_0 + 3Z_f)}{Z_2 + Z_0 + 3Z_f}} \dots\dots\dots(2.72)$$

**2.9 Perumusan Voltage Stability Index (VSI)**

Salah satu cara menentukan tingkat kestabilan tegangan sistem adalah dengan menggunakan metode *Voltage Stability Index* (VSI). Metode ini memberikan indeks kepada tiap-tiap bus pada sistem. Indeks yang diberikan, semakin mendekati 0 nilai indeks tersebut menandakan tingkat kestabilan sistem tersebut semakin rendah, sehingga dari hasil metode ini penentuan lokasi DG akan didasarkan pada bus yang memiliki indeks terendah.

Untuk menghitung nilai VSI maka diperlukan data hasil dari analisa aliran daya menggunakan metode *Newton-Raphson*. Untuk menghitung nilai kestabilan dari sebuah bus menggunakan VSI akan dijelaskan menggunakan rangkaian ekuivalen antara dua buah bus seperti pada gambar 2.8 berikut [17]:



**Gambar 2.8.** Rangkaian sederhana 2 bus

(Sumber: Arizal, 2017)

Ketidakstabilan tegangan dapat terjadi dalam berbagai kondisi. Untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada Gambar 2.8 yang merupakan ilustrasi sederhana dari jaringan distribusi radial.

Dari rangkaian ekuivalen diatas maka didapatkan persamaan sebagai berikut [10]:

$$I_k = \frac{V_1 - V_2}{R_k + jX_k} \dots\dots\dots(2.73)$$

$$P_{m2} - jQ_{m2} = V_{m2} I_k \dots\dots\dots(2.74)$$

Dimana:

$I_k$  : Arus pada saluran

$M_1$  : Ujung sisi pengirim



- $M_2$  : Ujung sisi penerima  
 $V_{m1}$  : Tegangan pada titik m1  
 $V_{m2}$  : Tegangan pada titik m2  
 $P_{m2}$  : Total daya aktif beban pada titik m2  
 $Q_{m2}$  : Total daya reaktif beban pada titik m2

Dari persamaan yang ada maka didapatkan nilai VSI dapat dicari melalui persamaan berikut:

$$VSI_2 = |V_{m1}|^4 - 4(P_{m2}X_k - Q_{m2}R_k)^2 - 4(P_{m2}R_k + Q_{m2}X_k)|V_{m1}|^2 \dots\dots(2.75)$$

Dimana  $VSI_2$  adalah *voltage stability index* pada bus 2 untuk nilai dari VSI itu sendiri harus lebih besar sama dengan 0. Untuk operasi matematika dapat digantikan dengan nilai i yang diartikan bus.  $VSI(i) \geq 0$  dengan  $i = 2,3,4,5,\dots$ , dst (sebanyak jumlah bus yang ada pada sistem distribusi).

### 2.10 Penentuan Kapasitas DG [17]

- DG digunakan sebagai sumber daya eksternal yang membantu menyalurkan daya aktif dan reaktif kedalam sistem
- Ukuran DG maksimum adalah 40% dari total jumlah beban yang ada di dalam sistem
- Penempatan DG pada bus yang memiliki nilai VSI yang paling rendah.

### 2.11 Software ETAP 12.6.0

ETAP (*Electric Transient Analysis Program*) merupakan suatu perangkat lunak yang mendukung sistem tenaga listrik. Perangkat ini mampu bekerja dalam keadaan *offline* untuk simulasi tenaga listrik, *online* untuk pengelolaan data *real-time* atau digunakan untuk mengendalikan sistem secara *real-time*. Fitur yang terdapat di dalamnya pun bermacam-macam antara lain digunakan untuk menganalisa pembangkitan tenaga listrik, sistem transmisi maupun sistem distribusi tenaga listrik. ETAP awalnya dibuat dan dikembangkan untuk meningkatkan kualitas keamanan fasilitas nuklir di Amerika Serikat yang selanjutnya dikembangkan menjadi sistem monitor manajemen energi secara *real-time*, simulasi, kontrol, dan optimasi.

ETAP dapat digunakan dalam bentuk diagram satu garis (*single line diagram*) dan jalur sistem pentanahan untuk berbagai bentuk analisis antara lain sebagai berikut:

1. Analisa Aliran Daya (*Load Flow Analysis*)
2. Analisa Hubung Singkat (*Short Circuit Analysis*)
3. Motor *Starting*
4. *Arc Flash Analysis*
5. *Harmonics Power System*
6. Analisa Kestabilan Transien (*Transient Stability Analysis*)
7. *Protective Device Coordination*