

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Penelitian Terdahulu

Penelitian yang dilakukan oleh Muhammad Alief Amanullah, Ontoseno Penangsang dan Ni Ketut Aryani tahun 2012 dengan judul “Studi Penentuan Lokasi Distributed Generation (DG) untuk Mengurangi Rugi-Rugi Daya pada Sistem Jaringan Distribusi Radial menggunakan Metode *K-means Clustering*”[1]. Dalam penelitiannya Muhammad Alief Amanullah Dkk, melakukan studi penelitian pada jaringan radial, dengan menggunakan metode aliran daya Backward forward sweep method dan menggunakan metode k-means dalam penentuan penempatan DGnya. Hasil yang didapatkan diantara lain;

1. Metode penentuan DG menggunakan K-means Clustering memiliki konvergensi yang cepat. Untuk sistem jaringan IEEE 34 bus membutuhkan 5 kali iterasi.
2. Hasil perhitungan aliran daya aktif pada kasus IEEE 34 bus (Kasus B) memiliki perbaikan nilai losses saluran terbaik pada kasus 4B yaitu pada saat pemasangan 3 DG dengan nilai losses menjadi 6,0499 kW atau turun 84,58% dari nilai losses awal.
3. Hasil Validasi untuk nilai tegangan dan losses memiliki nilai error terbesar untuk tegangan yaitu 0,021% pada kasus 7A dan untuk losses yaitu 0,6943% pada kasus 3A
4. Dengan total kapasitas DG yang sama dan pembagian kapasitas yang sama pada tiap DG, jumlah efektif pemasangan DG pada sistem berjumlah 3-4 DG.
5. Penambahan jumlah DG yang semakin banyak kurang efisien sebagai solusi perbaikan nilai rugi daya karena terlihat pada kasus nilai DG yang semakin banyak tidak membuat nilai rugi daya semakin turun, sebaliknya nilai rugi daya justru naik.
6. Metode K-means clustering dapat digunakan sebagai bahan pertimbangan dalam menentukan lokasi pemasangan DG [1].

Penelitian yang dilakukan oleh Muhammad Jesuli tahun 2021 dengan judul “Pengaruh Pembangkit Tersebar Terhadap Tegangan Dan Rugi-Rugi Daya Sistem Distribusi Tenaga Listrik”[2]. Pada penelitian tersebut didapat hasil pengaruh pembangkit tersebar terhadap tagangan dan rugi-rugi daya sistem distribusi tenaga listrik adalah sebagai berikut :

1. Instalasi DG pada sistem distribusi akan memperbaiki profil tegangan sistem, membaiknya profil tegangan ini dikarenakan dengan adanya DG, jatuh tegangan pada saluran-saluran distribusi dapat dikurangi.
2. Pemasangan DG juga akan mereduksi rugi-rugi daya pada saluran distribusi. Lebih lanjut, dengan adanya DG, suplai daya dari substasiun yang biasanya berasal dari sumber energi tak terbarukan, dapat dikurangi karena sebagian beban dicatu oleh DG.
3. Lokasi penempatan DG diujung saluran pada sistem 12 bus lebih baik daripada ditengah saluran dalam memperbaiki profil tegangan serta mengurangi rugi-rugi daya system [2].

Penelitian yang dilakukan Eka Fitrianto tahun 2016 dengan judul “Efek Pengintegrasian Pembangkit Listrik Tersebar pada Jaringan Distribusi Radial terhadap Perosotan Tegangan”[3]. Penelitian ini dilakukan dengan jaringan distribusi terdiri dari 1 bus sumber dan 6 bus beban dengan total panjang saluran mencapai 112 km. Dengan mengintegrasikan 5 unit pembangkit tersebar yang diletakkan pada 4 lokasi bus (titik beban), yaitu: pada bus ke-3 sebanyak 2 unit dan bus 2, 4 dan 5 masing-masing 1 unit. Hasil pada kajian ini dari pengintegrasian 5 unit DG dapat memperkecil nilai maksimum perosotan tegangan jaringan distribusi dari 24.085% menjadi 6,345% [3].

Penelitian yang dilakukan Saddam Rijal Kasmi tahun 2015 dengan judul “Simulasi Pemanfaatan *Distributed Generation* (DG) pada Jaringan Distribusi 20 kV dengan Etap 7.0.0 di P.T PLN (persero) Ranting Kutacane”[4]. Pada penelitian ini Saddam R.K. menyelidiki penyebab terjadinya jatuh tegangan pada saluran jaringan distribusi 20 kV serta memperbaiki jatuh tegangan dengan menginjeksikan pembangkit tersebar. Hasil dari penelitiannya adalah penyebab terjadinya jatuh tegangan pada jaringan distribusi 20 kV adalah panjangnya saluran serta impedansi

saluran, perbaikan tegangan pada jaringan distribusi 20 kV setelah simulasi dengan DG di feeder kota sebesar 19,646 kV yang sebelum penginjeksian DG tegangannya sebesar 19,586 kV dengan demikian perbaikannya sebesar 0,65% [4].

Dari penelitian yang telah dilakukan maka penelitian yang akan dilakukan memiliki perbedaan pada sistem yang digunakan, serta perhitungan yang akan dilakukan yaitu menghitung besarnya tegangan serta rugi-rugi daya pada sistem radial 101 bus.

2.2 Sistem Distribusi Tenaga Listrik

Sistem distribusi tenaga listrik merupakan subsistem tenaga listrik yang berfungsi untuk menyalurkan atau mendistribusikan energi listrik dari sumber energi listrik besar (*Bulk Power Source*) sampai ke konsumen. Jadi sistem distribusi ini merupakan subsistem yang berhubungan langsung dengan pelanggan karena catu daya pada pusat-pusat beban secara langsung dilayani oleh sistem distribusi ini. Tenaga listrik yang dihasilkan oleh pembangkit tenaga listrik besar dengan tegangan dari 11 kV sampai 24 kV dinaikan tegangannya oleh gardu induk dengan transformator penaik tegangan menjadi 70 kV, 154 kV, 220 kV atau 500kV kemudian disalurkan melalui saluran transmisi. Sistem distribusi tenaga listrik dapat dibagi menjadi 2 berdasarkan besarnya tegangan yang didistribusikan, yaitu sistem distribusi primer dan sistem distribusi sekunder [5].

2.2.1. Sistem Distribusi Primer

Sistem distribusi primer adalah jaringan tegangan menengah yang berfungsi untuk menghubungkan gardu induk sebagai suplai tenaga listrik dengan gardu distribusi. Sistem tegangan menengah yang digunakan di distribusi adalah sebesar 20 kV. Pada sistem distribusi primer saluran yang digunakan untuk menyalurkan energi listrik ke konsumen disebut sebagai penyulang. Umumnya setiap penyulang diberi nama sesuai dengan daerah beban yang dilayani oleh penyulang tersebut. Tujuannya adalah untuk memudahkan dalam mengingat dan menandai jalur-jalur beban yang dilayani oleh penyulang tersebut. Berdasarkan konfigurasi jaringan, maka sistem distribusi primer dapat dikelompokkan menjadi 3 (tiga) macam, yaitu sistem distribusi radial, loop, dan spindel.

2.2.2. Sistem Distribusi Radial

Sistem distribusi tipe radial merupakan sebuah sistem yang hanya terhubung ke satu sumber dan antara titik sumber dan titik bebannya hanya terdapat satu saluran (line), tidak ada alternatif saluran lainnya. Sistem radial pada jaringan distribusi merupakan sistem terbuka, yaitu tenaga listrik yang disalurkan secara terpisah satu sama lainnya. Sistem ini merupakan sistem yang paling sederhana diantara sistem yang lain dan paling murah, sebab sesuai konstruksinya sistem ini menghemat sedikit sekali penggunaan material listrik, apalagi jika jarak penyaluran antara gardu induk ke konsumen tidak terlalu jauh [5]. Dinamakan radial karena saluran ini ditarik secara radial dari suatu titik yang merupakan sumber dari jaringan itu dan dicabang-cabang ke titik-titik beban yang dilayani. Namun jaringan yang hanya mempunyai satu pasokan tenaga listrik, jika terjadi gangguan akan terjadi “block-out” atau padam pada bagian yang tidak dapat dipasok.

2.2.3. Sistem Distribusi Ring/Loop

Sistem distribusi ring/loop pada jaringan distribusi merupakan suatu sistem penyaluran melalui dua atau lebih saluran penyulang atau penyulang yang saling berhubungan membentuk rangkaian berbentuk cincin (*Ring*). Sistem ini secara ekonomis menguntungkan, kerana gangguan pada jaringan terbatas hanya pada saluran yang terganggu saja. Sedangkan pada saluran yang lain masih dapat menyalurkan tenaga listrik dari sumber lain dalam rangkaian yang tidak terganggu. Sehingga kontinuitas pelayanan sumber tenaga listrik dapat terjamin dengan baik. Yang perlu diperhatikan pada sistem ini apabila beban yang dilayani bertambah, maka kapasitas pelayanan untuk sistem rangkaian tertutup ini kondisinya akan lebih jelek. Tetapi jika digunakan titik sumber (Pembangkit Tenaga Listrik) lebih dari satu di dalam sistem jaringan ini maka sistem ini akan banyak dipakai, dan akan menghasilkan kualitas tegangan lebih baik, serta regulasi tegangannya cenderung kecil. Sistem ini cocok untuk digunakan pada daerah beban yang padat dan memerlukan keandalan tinggi.

2.2.4. Sistem Distribusi Spindel

Konfigurasi spindel umumnya dipakai pada saluran kabel bawah tanah. Pada konfigurasi ini dikenal 2 jenis penyulang yaitu penyulang cadangan (*standby atau express feeder*) dan penyulang operasi (*working feeder*). Penyulang cadangan tidak dibebani dan berfungsi sebagai back-up supply jika terjadi gangguan pada penyulang operasi. Untuk konfigurasi 2 penyulang, maka faktor pembebanan hanya 50%. Berdasarkan konsepnya, jumlah penyulang pada 1 spindel adalah 6 penyulang operasi dan 1 penyulang cadangan sehingga faktor pembebanan konfigurasi spindel penuh adalah 85 %. Ujung-ujung penyulang berakhir pada gardu yang disebut Gardu Hubung dengan kondisi penyulang operasi “NO” (*Normally Open*), kecuali penyulang cadangan dengan kondisi “NC” (*Normally Close*). Dalam keadaan normal memang express feeder ini sengaja dioperasikan tanpa beban.

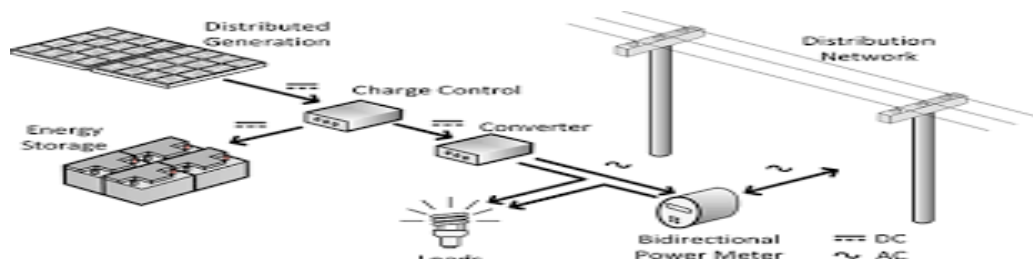
2.2.5. Sistem Distribusi Sekunder

Sistem distribusi sekunder atau sering disebut jaringan distribusi tegangan rendah, merupakan jaringan yang berfungsi sebagai penyalur tenaga listrik dari gardu-gardu pembagi atau gardu distribusi ke pusat-pusat beban (konsumen tenaga listrik). Besarnya standar tegangan untuk jaringan distribusi sekunder ini adalah 127/220 V untuk sistem lama, dan 220/380 V untuk sistem baru, serta 440/550 V untuk keperluan industri. Besarnya tegangan maksimum yang diizinkan adalah +5% dan -10% dari tegangan nominalnya. Penetapan ini sebanding dengan besarnya nilai tegangan jatuh (*drop voltage*) yang telah ditetapkan, bahwa rugi-rugi daya pada suatu jaringan adalah 15 %. Dengan adanya pembatasan tersebut stabilitas penyaluran daya ke pusat-pusat beban tidak terganggu [5].

2.3. Distributed Generation (DG)

Pesatnya perkembangan teknologi, pada saat ini dikembangkan pembangkit-pembangkit baru yang dihubungkan dengan jaringan distribusi atau disebut dengan *Distributed Generation (DG)*. DG adalah sebuah pembangkit tenaga listrik yang berkapasitas kecil dengan tujuan menyediakan sebuah sumber daya aktif yang terhubung langsung dengan 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 [6].



Gambar 2.1 Konfigurasi real-time Sistem Distribusi Tenaga Listrik Dengan Distributed Generation.

Ada begitu banyak teknologi dari DG yang mana sumber energi listrik pada DG ialah dengan memanfaatkan energi baru terbarukan (*renewable*). Adapun pembagian jenis DG berdasarkan ukuran pembangkitan dapat dibedakan menjadi 4 yaitu :

- 1) Micro yaitu DG dengan ukuran 1 Watt hingga 5 KW.
- 2) Small yaitu DG dengan ukuran 5 KW hingga 5 MW.
- 3) Medium yaitu DG dengan ukuran 5 MW hingga 50 MW.
- 4) Large yaitu DG dengan ukuran 50 MW hingga 300 MW.

2.3.1. Keuntungan *Distributed Generation* (DG)

Dengan diinterkoneksi DG pada sistem jaringan distribusi tenaga listrik yang telah ada, dimana untuk melayani kebutuhan energi listrik, ada beberapa keuntungan pada jaringan distribusi itu sendiri, diantaranya [7]:

1. Meningkatkan ketersediaan dan kehandalan dari energi listrik.
2. Dapat mengurangi beban puncak.
3. Dapat menghemat energi, karena sumber energi utama DG memanfaatkan energi yang terbarukan.
4. Dapat menjadi alternatif untuk kompensasi daya reaktif, karena jika diinterkoneksi pada jaringan yang telah ada dapat mengurangi rugi-rugi daya.
5. Dalam proses pembangkitan energi listrik, DG bersifat ramah lingkungan, karena emisi CO₂ yang dihasilkan rendah.

2.3.2. Pengaruh Interkoneksi *Distributed Generation* (DG)

Terhubungnya DG pada jaringan distribusi membawa pengaruh terhadap sistem pengoperasian jaringan distribusi. Beberapa pengaruh akibat terhubungnya DG pada jaringan distribusi adalah [8]:

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. Jika sistem proteksi sudah di sesuaikan dengan arah arus, penanganan gangguan lebih efektif sehingga dapat meningkatkan keandalan sistem distribusi.

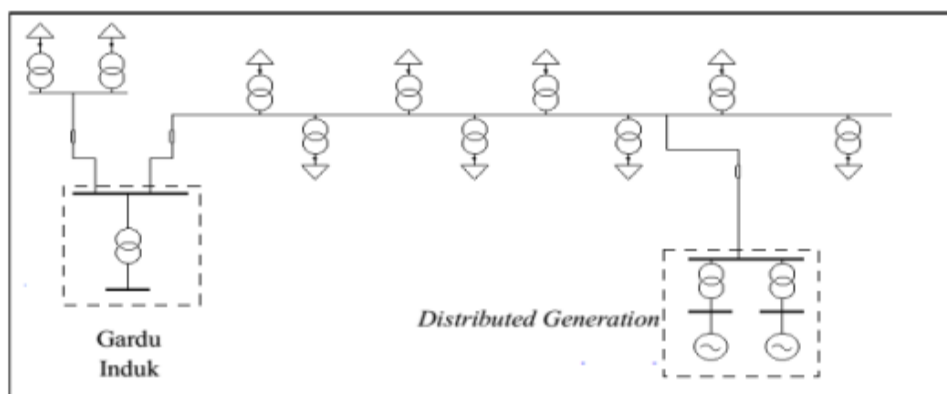
3. Kualitas Daya

Jika kapasitas pembangkitan DG sesuai dengan kebutuhan pada suatu jaringan distribusi maka dapat meningkatkan kualitas daya, akan tetap 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 2.2



Gambar 2.2 Interkoneksi DG Pada Jaringan Distribusi Tenaga Listrik

2.4. Jatuh Tegangan (*Drop Voltage*)

Jatuh tegangan adalah selisih antara tegangan pada ujung kirim (*sending end*) dan tegangan pada ujung penerima (*receiving end*) tenaga listrik. Jatuh tegangan pada saluran tenaga listrik secara umum berbanding lurus dengan panjang saluran dan beban serta berbanding terbalik dengan luas penampang penghantar. Besarnya jatuh tegangan dinyatakan baik dalam persen atau dalam besaran volt. Besarnya batas atas dan bawah ditentukan oleh kebijaksanaan perusahaan kelistrikan. PT. PLN (Persero) mengatur tegangan standar dalam SPLN No. 72 Tahun 1987 pasal 4 ayat 19 : tentang pengaturan tegangan dan turun tegangan atau bisa dilihat dari Tabel 1. berikut :

Tabel 2.1 Pengaturan Tegangan dan Turun Tegangan

No.	Lokasi Kejadian	Standar Turun Tegangan
1	SUTM	5% dari tegangan kerja bagi sistem radial
2	SKTM	2% dari tegangan kerja bagi sistem Spindel
3	Trafo Distribusi	3% dari tegangan kerja
4	Saluran Udara Tegangan Rendah (SUTR)	4% dari tegangan kerja
5	Sambungan Rumah (SR)	1% dari tegangan nominal

Akibat terjadinya rugi tegangan pada saluran maka tegangan khususnya ditempat yang paling jauh dengan sumber tenaga akan lebih kecil dari tegangan nominal. Adanya tegangan pada sebuah penghantar menyebabkan arus mengalir

melalui penghantar tersebut. Bila situasi ini terjadi pada saluran distribusi yang panjang, hal ini dapat menyebabkan penurunan tegangan, Penurunan tegangan ini akibat usaha yang harus dikeluarkan untuk mengatasi perlawanan terhadap aliran arus dan harus disalurkan dari tegangan sumber agar mendapatkan tegangan yang sebenarnya pada beban [10]. Jatuh tegangan pada suatu saluran dapat dinyatakan dengan persamaan berikut:

$$\Delta V = V_s - V_r$$

Dari persamaan diatas, maka dapat di ketahui nilai jatuh tegangan relatif atau biasa dikenal dengan Voltage Regulation (VR) dengan persamaan:

$$VR = (V_s - V_r)/V_s \times 100\%$$

Dengan :

V_r = Tegangan pada sisi penerima

V_s = Tegangan pada sisi kirim

ΔV = Jatuh Tegangan

VR = Voltage Regulation

2.5. Sistem Per-Unit

Dalam banyak masalah kelistrikan perlu dinyatakan skala atau satuan. Umumnyahal ini dilakukan dalam analisis sistem tenaga dan metode standar yang dipakai adalah sistem per-unit (p.u). Selain mempermudah proses perhitungan, sistem ini juga memiliki beberapa keuntungan sebagai berikut :

1. Analisis jaringan akan lebih sederhana bila semua impedansi dari rangkaian pengganti yang diberikan dapat secara langsung dijumlahkan tanpa mempersoalkan sistem tegangannya.
2. Dapat memudahkan proses-proses pembagian dan perkalian akar 3 atau ($\sqrt{3}$) yang diperlukan saat sistem 3 ϕ seimbang dinyatakan oleh sistem per-fasa. Dengan demikian Faktor $\sqrt{3}$ dan 3 yang menyatakan besaran untuk \square dan Y. Dalam system 3 ϕ seimbang, secara langsung sudah dicakup oleh besaran dasar.
3. Umumnya impedansi peralatan listrik diberikan dalam % atau p.u oleh pabrik berdasarkan kapasitas identifikasi
4. Karakteristiknya (kinerja) yang berbeda dari banyak peralatan listrik dapat diestimasi dengan suatu perbandingan dan konstanta yang dinyatakan dalam p.u.

5. Konstanta mesin-mesin dapat secara mudah diperoleh sejak parameter-parameter peralatan perlengkapan yang sama masih dalam batas-batas ambang yang relatif dan tentunya dapat dibandingkan jika dinyatakan dalam per-unit berdasarkan kapasitas nominalnya.
6. Pemakaian sistem per-unit banyak mempermudah proses perhitungan dalam analisis sistem tenaga.

Nilai-nilai yang dinyatakan dalam satuan ini memiliki nilai yang sebenarnya dibagi nilai dasar (*base value*). Secara umum persamaan sistem per-unit sebagai berikut:

$$\text{Per unit} = \frac{\text{nilai yang sebenarnya (dalam satuan tertentu)}}{\text{nilai dasar atau nilai acuan (dalam satuan yang sama)}}$$

Sebagai contoh, arus :

$$I_{base} = \frac{MVA_{base}}{\sqrt{3}kV_{base}} \times 1.000 \text{ Amp}$$

$$I_{p.u} = \frac{I_{actual}}{I_{base}} \text{ p.u}$$

Impedansi :

$$Z_{base} = \frac{kV_{base}^2}{MVA_{base}} \text{ Ohm}$$

$$Z_{p.u} = \frac{Z_{actual}}{Z_{base}} \text{ p.u}$$

Dimana :

MVA_{base} : Daya (MVA)

I_{base} : Arus dasar (Ampere)

$I_{p.u}$: Arus (p.u)

I_{actual} : Arus sebenarnya (Ampere)

Z_{base} : Impedansi dasar (Ohm)

$Z_{p.u}$: Impedansi (p.u)

Z_{base} : Impedansi sebenarnya (Ohm) 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 [11].

Sejak tahun 1960 sudah banyak algoritma aliran daya yang berbasis komputasi digital. Seperti metode fast decoupled, newton raphson dan gauss seidel. Tetapi metode – metode tersebut kurang handal dan efektif untuk perhitungan pada sistem distribusi radial. Aliran daya pada sistem distribusi lebih kompleks, adanya perbedaan karakteristik dari jaringan distribusi. Seperti struktur radial, nilai node yang besar dan nilai rasio R/X yang tinggi. Pada study ini digunakan metode backward forward sweep. metode forward/backward sweep komputasinya efektif disetiap iterasi, serta solusi dan perhitungan numeriknya tepat [3]. Sistem yang digunakan adalah sistem tes IEEE 33 bus radial.

Dalam penyelesaian (perhitungan) sebuah aliran daya, sistem dioperasikan dalam kondisi/keadaan tunak dan keadaan seimbang. Setiap bus pada suatu sistem tenaga listrik terdapat daya aktif P , daya reaktif Q , besar tegangan $|V|$, dan sudut fasa tegangan δ . Jadi ada setiap bus terdapat empat besaran yaitu P , Q , $|V|$, dan δ . 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 δ harus dicari (dihitung) berapa nilainya.

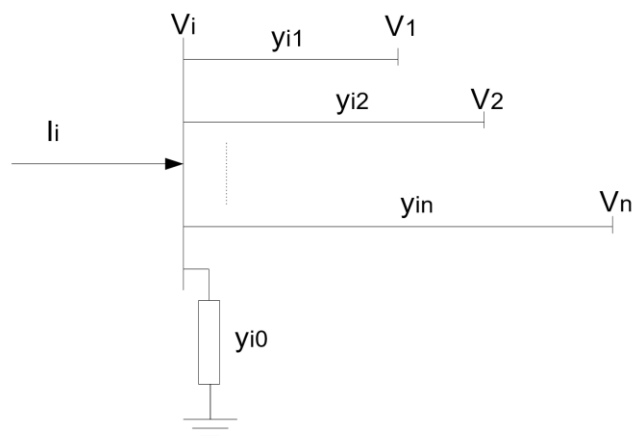
2. Bus generator (Bus P-|V|)

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 δ 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 δ yang bisa diatur, sedangkan besar daya aktif P dan daya reaktif Q akan dicari dalam perhitungan.

Dengan mempertimbangkan jenis bus dari jaringan sistem tenaga seperti pada Gambar 1, saluran transmisi dapat digambarkan dengan model π ekuivalen dengan impedansi telah diubah menjadi admitansi per unit pada base MVA [11].



Gambar 2.3 Model bus sistem tenaga listrik

Arus pada bus i merupakan perkalian antara admitansi Y dengan tegangan V , dan dalam bentuk persamaan dapat dituliskan:

$$I_i = V_i \sum_{j=0} y_{ij} - \sum_{j=0} y_{ij} V_j \neq I$$

Atau ditulis dengan :

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

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

Daya aktif pada bus-I adalah :

$$P_i + jQi = V_i I_i^*$$

Atau

$$I_i = \frac{P_i - jQi}{V_i^*}$$

Substitusikan persamaan diatas:

$$\frac{P_i - jQi}{V_i^*} = V_i \sum_{j=0}^n y_{ij} - \sum_{j=1}^n y_{ij} V_j \quad j \neq i$$

Berdasarkan hubungan yang diberikan dalam persamaan diatas, perhitungan masalah aliran daya dalam sistem tenaga harus diselesaikan dengan teknik iterasi.

2.6. Solusi Aliran Daya dengan Metoda Backward forward sweep method

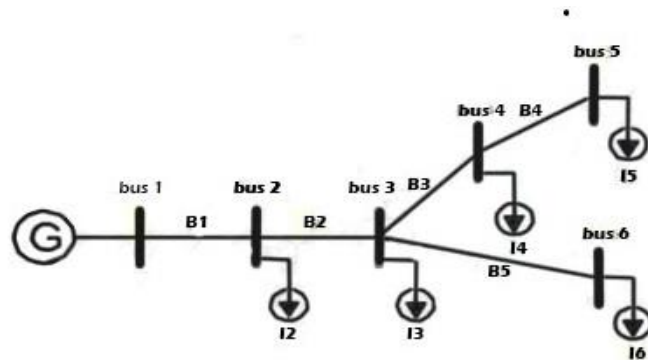
Dari sekian banyak metode, backward and forward sweep adalah metode yang efisien [4]. Pada backward sweep, dimulai dari titik ujung terjauh dari jaringan, arus beban pada titik beban. Oleh karena itu, arus yang mengalir pada saluran dihitung menurut asumsi atau hasil kalkulasi dari tegangan pada iterasi sebelumnya. Setelah menghitung arus yang mengalir pada saluran, pada forward sweep, dimulai dari titik sumber, tegangan dari masing-masing titik bus diperbarui. Setelah forward sweep, kompensasi arus injeksi dihitung. Lalu kriteria konvergensi diuji. Ada berbagai macam kriteria konvergensi yang disesuaikan dengan titik tegangan, beban atau arus saluran, dan masukan daya ke jaringan. Berdasarkan penjelasan di atas, dikembangkan metode aliran daya distribusi untuk jaringan dengan jumlah sumber yang banyak.

2.6.1. Backward Sweep

Langkah pertama yang dilakukan adalah *backward sweep*, yaitu menghitung besar arus yang mengalir pada saluran di awali pembentukan matrik BIBC (Bus Injection to Branch Current). Besar arus saluran dapat dinyatakan dalam persamaan :

$$I_k = \left(\frac{p_k + jQ_k}{V_k} \right)$$

Dimana I_k, P_k, jQ_k, V_k adalah nilai arus, daya aktif, daya reaktif dan tegangan pada bus k .



Gambar 2. 4 Contoh *single line diagram*

2.6.2. Forward Sweep

Langkah kedua adalah *forward sweep* untuk menghitung nilai drop tegangan pada setiap bus yang di awali dengan pembentukan matrik BCBV (*Branch Current to Branch Voltage*). Hubungan antara percabangan arus dan tegangan bus dapat ditentukan berdasarkan hukum Khirchoff untuk tegangan. Sebagai contoh, untuk hubungan antara percabangan arus dan tegangan bus pada Gambar 1 dapat dibentuk persamaan:

$$V_2 = V_1 - B_1 \cdot Z_{12}$$

$$V_3 = V_2 - B_2 \cdot Z_{23}$$

$$V_4 = V_3 - B_3 \cdot Z_{34}$$

$$V_5 = V_4 - B_4 \cdot Z_{45}$$

$$V_6 = V_3 - B_5 \cdot Z_{26}$$

Dengan mensubstitusikan persamaan diatas, dapat diperoleh persamaan di bawah ini :

$$V_2 = V_1 - B_1 \cdot Z_{12}$$

$$V_3 = V_1 - B_1 \cdot Z_{12} - B_2 \cdot Z_{23}$$

$$V_4 = V_1 - B_1 \cdot Z_{12} - B_2 \cdot Z_{23} - B_3 \cdot Z_{34}$$

$$V_5 = V_1 - B_1 \cdot Z_{12} - B_2 \cdot Z_{23} - B_3 \cdot Z_{34} - B_4 \cdot Z_{45}$$

$$V_6 = V_1 - B_1 \cdot Z_{12} - B_2 \cdot Z_{23} - B_5 \cdot Z_{26}$$

Maka drop tegangan dapat dihitung menjadi sebagai berikut :

$$V_1 - V_2 = B_1 \cdot Z_{12}$$

$$V_1 - V_3 = B_1 \cdot Z_{12} - B_2 \cdot Z_{23}$$

$$V_1 - V_4 = B_1 \cdot Z_{12} - B_2 \cdot Z_{23} - B_3 \cdot Z_{34}$$

$$V_1 - V_5 = B_1 \cdot Z_{12} - B_2 \cdot Z_{23} - B_3 \cdot Z_{34} - B_4 \cdot Z_{45}$$

$$V_1 - V_6 = B_1 \cdot Z_{12} - B_2 \cdot Z_{23} - B_3 \cdot Z_{34} - B_4 \cdot Z_{45} - B_5 \cdot Z_{26}$$

Persamaan di atas dapat dibentuk dan diselesaikan menggunakan suatu bentuk matrik dengan komponen matrik BCBV (Branch Current to Branch Voltage).

$$\begin{bmatrix} V_1 & V_2 \\ V_1 & V_3 \\ V_1 & V_4 \\ V_1 & V_5 \\ V_1 & V_6 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Z_{12} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ Z_{12} & Z_{23} & 0 & 0 & 0 \\ Z_{12} & Z_{23} & Z_{34} & 0 & 0 \\ Z_{12} & Z_{23} & Z_{34} & Z_{45} & 0 \\ Z_{12} & Z_{23} & 0 & 0 & Z_{36} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} B_1 \\ B_1 \\ B_1 \\ B_1 \\ B_1 \end{bmatrix}$$

Sehingga, untuk mendapatkan nilai ΔV didapatkan persamaan akhir sebagai berikut :

$$[\Delta V] = [BCBV][BIBC][I]$$

$$[\Delta V] = [DLF][I]$$