

2. TEORI DASAR

2.1. Gambaran Singkat Mengenai Sistem Tenaga Listrik

Sistem tenaga listrik adalah beberapa unsur perangkat peralatan yang terdiri dari pembangkitan, penyaluran atau transmisi, distribusi dan pelanggan, yang satu dengan yang lainnya berhubungan dan saling bekerja sama sehingga menghasilkan tenaga listrik. Suatu sistem tenaga listrik harus bisa melayani pelanggan secara baik, dalam arti sistem tenaga listrik tersebut harus aman dan handal. Aman disini mempunyai pengertian bahwa sistem tenaga listrik ini tidak membahayakan manusia dan lingkungannya dan handal mempunyai arti bahwa sistem tenaga listrik ini dapat melayani pelanggan secara memuaskan misalnya dalam segi kontinuitas dan kualitasnya.

Secara blok diagram sistem tenaga listrik dapat digambarkan seperti bagan berikut ini.



Gambar 2.1. Bagan Sistem Tenaga Listrik.

Dari bagan dalam gambar 2.1 diatas dapat dijelaskan bahwa prinsip kerja dalam sistem tenaga listrik dimulai dari bagian pembangkitan kemudian disalurkan melalui sistem jaringan transmisi kepada gardu induk dan dari gardu induk ini disalurkan serta dibagi-bagi kepada pelanggan melalui saluran distribusi. Ada pula pelanggan yang mendapat pelayanan langsung dari saluran transmisi, biasanya pelanggan ini berasal dari sektor industri berskala besar yang membutuhkan tegangan yang besar dan daya yang besar.

2.2. Pembangkit

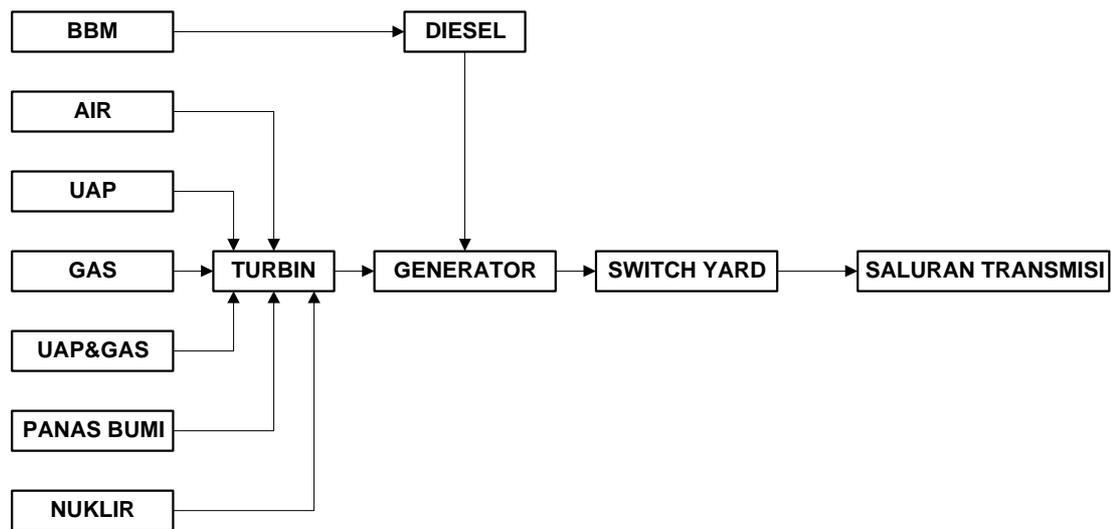
Ditinjau dari segi kamus, yang dimaksud pembangkit adalah sesuatu yang membangkitkan atau alat untuk membangkitkan sesuatu. Dengan demikian dalam suatu sistem tenaga listrik, yang dimaksud pembangkit tenaga listrik ialah suatu alat atau peralatan yang berfungsi untuk membangkitkan tenaga listrik dengan cara mengubah energi potensial menjadi tenaga mekanik selanjutnya menjadi tenaga listrik.

Dalam mendefinisikan pengertian pembangkit tenaga listrik, akan muncul berbagai definisi dan pengertian, tergantung dari sudut disiplin ilmu apa kita melihat, mengasumsikan dan memahaminya. Apabila ditinjau dari sudut ilmu kelistrikan dapat kiranya mendefinisikan pengertian pembangkit tenaga listrik sebagai berikut :

1. Suatu bagian awal dari sistem tenaga listrik yang membangkitkan tenaga listrik yang terdiri dari instalasi listrik, mekanik, bangunan-bangunan, fasilitas pelengkap, bangunan serta komponen bantu lainnya.
2. Salah satu bagian dari sistem tenaga listrik untuk membangkitkan energi listrik dengan cara mengubah potensi energi mekanik dari air, minyak, uap, panas bumi, nuklir, matahari, angin, kombinasi gas dan uap menjadi energi listrik. Mengingat tingkat kebutuhan energi listrik terus mengalami kenaikan setiap tahunnya, sehingga penyediaan energi listrik harus pula ditingkatkan agar terjadi keseimbangan antara kebutuhan dan penyediaan energi listrik. Tingkat kebutuhan ini menjadi salah satu pertimbangan utama dalam pembangunan pembangkit tenaga listrik yang baru maupun peningkatan kapasitas daya pada pembangkit tenaga listrik yang sudah ada.

2.2.1. Prinsip Kerja Dari Sistem Pembangkit

Seperti telah diterangkan sebelumnya bahwa prinsip dasar pembangkitan tenaga listrik terdapat pada perubahan energi mekanik ke dalam energi listrik. Gambar berikut ini memperlihatkan bagan sistem pembangkitan, yang terdiri dari berbagai jenis pembangkitan.



Gambar 2.2. Prinsip Kerja Sistem Pembangkit Tenaga Listrik.

Sumber : Arman Jaya. April 2005.

<http://newserver.eepis-its.edu/~arman/Kumpulan%20Materi-kul/DIS_1.DOC>

Masing-masing jenis pembangkit tenaga listrik mempunyai prinsip kerja yang berbeda-beda, sesuai dengan penggerak mulanya (prime mover). Satu hal yang sama dari beberapa jenis pembangkit tenaga listrik tersebut yaitu semuanya sama-sama berfungsi merubah energi mekanik menjadi energi listrik, dengan cara mengubah potensi energi mekanik dari air, uap, gas, panas bumi, nuklir, kombinasi gas dan uap, menggerakkan atau memutar turbin yang porosnya dikopel dengan generator selanjutnya dengan sistem pengaturannya generator tersebut akan menghasilkan daya listrik.

Khusus untuk pembangkit listrik tenaga diesel (PLTD), prinsip kerjanya berbeda dengan pembangkit listrik lainnya. Sebenarnya energi penggerak PLTD ini adalah bahan bakar minyak karena bahan bakar merupakan bagian yang tak terpisahkan dari mesin diesel tersebut, maka disebut juga pembangkit tenaga diesel. Diesel ini merupakan satu unit lengkap yang langsung menggerakkan generator dan menghasilkan energi listrik.

2.2.2. Jenis Pembangkit Tenaga Listrik

Secara umum pembangkit tenaga listrik dikelompokkan menjadi dua bagian besar yaitu pembangkit listrik thermis dan pembangkit listrik non thermis. Pembangkit listrik thermis mengubah energi panas menjadi energi listrik, panas disini bisa dihasilkan oleh panas bumi, minyak, uap dan yang lainnya. Hal ini dikatakan bahwa pembangkit thermis yang dihasilkan dari panas bumi mempunyai penggerak mula panas bumi biasanya disebut pembangkit panas bumi. Sedangkan pembangkit non thermis penggerak mulanya bukan dari panas, seperti pada pembangkit thermis penggerak mula inilah yang menentukan nama/jenis pembangkit tenaga listrik tersebut misalnya apabila penggerak mulanya berupa air maka air inilah yang menentukan jenis pembangkit tenaga non thermis tersebut biasanya disederhanakan sebutannya menjadi pembangkit tenaga air (PLTA), dan lain sebagainya.

Dari dua bagian besar ini dapat dikelompokkan menjadi beberapa jenis yaitu :

a. Pembangkit listrik thermis

Pembangkit listrik thermis terdiri dari :

- 1). Pembangkit Listrik Tenaga Panas Bumi (PLTP).
- 2). Pembangkit Listrik Tenaga Diesel (PLTD).
- 3). Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU).
- 4). Pembangkit Listrik Tenaga Gas (PLTG).
- 5). Pembangkit Listrik Tenaga Gas dan Uap (PLTGU).
- 6). Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir (PLTN).

b. Pembangkit listrik non thermis

Pembangkit listrik thermis terdiri dari :

- 1). Pembangkit Listrik Tenaga Air (PLTA).
- 2). Pembangkit Listrik Tenaga Mikro-Hidro (PLTM).

Selain beberapa jenis yang disebutkan di atas, masih terdapat jenis pembangkit tenaga listrik yang lain, misalnya pembangkit listrik yang digerakkan oleh tenaga surya, energi gelombang laut dan energi angin, saat ini masih dikembangkan secara terbatas di Indonesia. Sedangkan dari delapan jenis yang disebutkan di atas, tujuh jenis telah terpasang di Indonesia. Satu jenis pembangkit

tenaga listrik, yaitu PLTN, sampai saat ini masih dalam tahap perencanaan pembangunan.

2.3. Saluran Transmisi

Karena tegangan generator pada umumnya rendah, antara 6 kV sampai 24 kV, maka tegangan ini biasanya dinaikkan dengan transformator daya ke tingkat tegangan yang lebih tinggi antara 30 kV sampai 500 kV. Tingkat tegangan yang lebih tinggi ini, selain untuk memperbesar daya hantar dari saluran yang berbanding lurus dengan kuadrat tegangan, juga untuk memperkecil rugi-rugi daya dan jatuh tegangan pada saluran. Dengan mempertinggi tegangan, maka tingkat isolasi juga harus lebih tinggi, dengan demikian biaya peralatan dari saluran transmisi juga tinggi.

Penurunan tegangan dari tingkat tegangan transmisi pertama-tama dilakukan pada Gardu Induk (GI), dimana tegangan diturunkan ke tegangan yang lebih rendah, misalnya: dari 500 kV ke 150 kV atau dari 150 kV ke 70 kV. Kemudian penurunan kedua dilakukan pada gardu induk distribusi dari 150 kV ke 20 kV atau dari 70 kV ke 20 kV.

Meskipun tidak jelas menyebutkan keperluannya sebagai tegangan transmisi, di Indonesia, pemerintah telah menyeragamkan deretan tegangan tinggi sebagai berikut:¹

- Tegangan nominal (kV) : (30) – 66 – 150 – 220 – 380 – 500.
- Tegangan tertinggi untuk perlengkapan (kV) : (36) – 72,5 – 170 – 245 – 420 – 525.

Tegangan nominal 30 kV hanya diperkenankan untuk daerah asuhan dimana tegangan distribusi 20 kV tidak dipergunakan. Penentuan deretan tegangan diatas disesuaikan dengan rekomendasi International Electrotechnical Commission (IEC).

Berdasarkan tempat salurannya, saluran transmisi dapat dikelompokkan menjadi dua bagian, yaitu: saluran udara (*overhead lines*) dan saluran kabel bawah tanah (*underground cable*).

¹ Arismunandar, A., & Kuwahara, S. *Buku Pegangan Teknik Tenaga Listrik, Jilid II: Saluran transmisi*. Jakarta: PT. Pradnya Paramita, 1979, p. 2.

2.4. Saluran Udara (*Overhead Lines*)

Saluran ini menyalurkan tenaga listrik melalui kawat-kawat yang digantung pada menara atau tiang transmisi dengan perantara isolator-isolator. Keuntungan dari saluran udara ini adalah lebih mudah diperbaiki jika terjadi gangguan (contohnya: gangguan hubung singkat), dan lebih murah. Kerugiannya adalah saluran ini mudah terpengaruh oleh cuaca buruk, taufan, hujan angin, bahaya petir, dan sebagainya; selain itu saluran ini juga tidak estetik karena mengganggu pemandangan. Beberapa bagian utama dari saluran ini berupa:²

- a. Menara transmisi atau tiang transmisi beserta pondasinya,
- b. Isolator-isolator,
- c. Kawat penghantar (*conductor*), dan
- d. Kawat tanah.

2.4.1. Menara Transmisi atau Tiang Transmisi

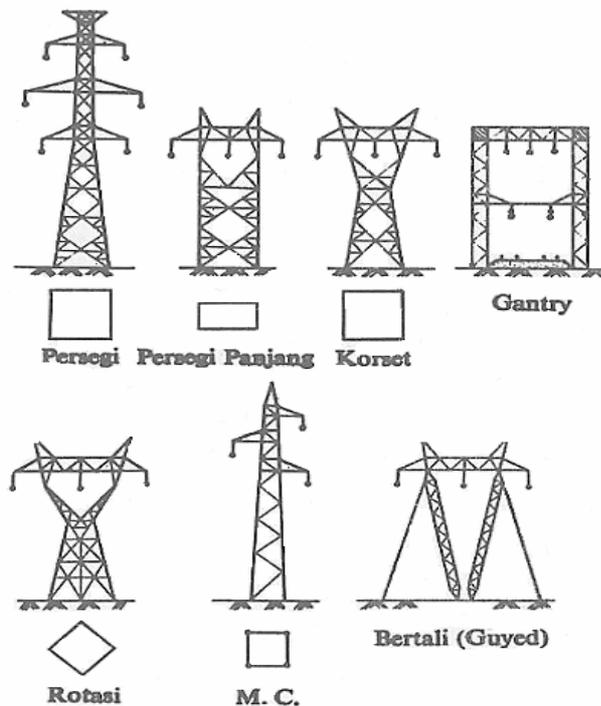
Menara atau tiang transmisi adalah suatu bangunan penopang saluran transmisi, yang bisa berupa menara baja, tiang baja, dan tiang beton bertulang dan tiang kayu. Tiang-tiang baja, beton atau kayu biasanya digunakan pada saluran-saluran transmisi dengan tegangan dibawah 70 kV, sedang untuk saluran transmisi (tegangan diatas 70 kV) digunakan menara baja.

Menara baja untuk saluran transmisi menurut bentuk dan konstruksinya dibagi menjadi tujuh, yaitu: menara persegi, menara persegi panjang, menara jenis korset, menara gantry, menara rotasi, menara M.C dan menara bertali (*guyed*).

Menara persegi paling banyak disukai karena bentuk dan kekuatannya sama dan jenis ini banyak dipakai untuk saluran transmisi ganda. Menara persegi panjang bagian atas dan bawahnya sama, serta banyak dipakai untuk saluran tunggal dan saluran banyak (*multi circuit*). Menara jenis korset sempit di bagian tengahnya, dan biasanya dipakai untuk saluran tegangan tinggi rangkaian tunggal (*single circuit*), serta untuk gawang (*span*) yang lebar. Menara gantry digunakan bila saluran menyeberangi jalan kereta api, jalan raya, dan kanal-kanal air. Menara M.C terbuat dari pipa-pipa baja yang diisi beton. Menara bertali mempunyai

² Hutaaruk, T.S. *Transmisi Daya Listrik*. Jakarta: PT. Gelora Aksara Pratama, 1996, p. 3.

konstruksi berengsel yang menunjang beban mekanisnya dengan kawat-kawat penahan (*stay wires*).



Gambar 2.3. Jenis-Jenis Menara Baja

Sumber: Arismunandar, A., & Kuwahara, S. *Buku Pegangan Teknik Tenaga Listrik, Jilid II: Saluran transmisi*. Jakarta: PT. Pradnya Paramita, 1979, p. 34. Gambar 25.

Menurut karakteristiknya menara transmisi dibagi menjadi 3, yaitu: menara baja kaku (*rigid*), lentur (*flexible*), dan setengah-lentur (*semi-flexible*). Menara kaku direncanakan untuk menahan beban yang diperkirakan oleh menara itu sendiri, sedang menara lentur dan setengah-lentur direncanakan tanpa atau sedikit sekali beban pada arah kawat.

Menara transmisi baja dibagi menurut tujuannya sebagai:

- Menara penegang (*tension tower*)

Menara ini berfungsi untuk menahan gaya berat dan menahan gaya tarik dari kawat-kawat penyaluran. Menara ini biasanya digunakan untuk

memperkuat tegangan kawat dan berada pada posisi lurus penyaluran (ditengah atau diantara beberapa menara).

b. Menara penyangga (*suspension tower*)

Menara ini berfungsi untuk mendukung atau menyangga kawat-kawat penyaluran beserta peralatannya, sehingga menara penyangga ini harus kuat menahan berat dari peralatan listrik yang ada pada menara tersebut.

c. Menara sudut (*angle tower*)

Menara ini berfungsi menerima gaya tarik akibat dari perubahan arah penyaluran. Jadi menara ini terletak pada belokan route map saluran transmisi. Menara sudut ini dibagi menjadi 2, yaitu:

- Menara sudut kecil, digunakan jika sudut mendatar kurang dari 20° .
- Menara sudut besar, digunakan jika sudut mendatar kurang dari 30° .

d. Menara ujung atau akhir (*dead end tower*)

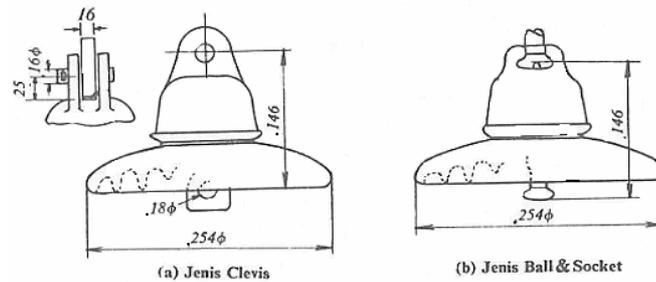
Menara ini berfungsi sebagai penegang dan terletak pada posisi paling akhir dari jaringan transmisi di dekat switch yard gardu induk. Menara ujung ini hanya menahan gaya tarik kawat-kawat transmisi dari satu arah saja.

2.4.2. Isolator-Isolator

Menurut penggunaan dan konstruksinya, isolator untuk saluran transmisi dibagi menjadi 4, yaitu:

a. Isolator gantung (*suspension*)

Umumnya gandengan isolator gantung dipakai pada saluran transmisi tegangan tinggi. Ada dua jenis isolator gantung, yaitu: clevis type dan ball-and-socket type. Kedua jenis isolator gantung ini terbuat dari porselin dengan tutup dari besi tempaan (*malleable iron*) di satu pihak dan pasak baja di lain pihak, yang keduanya diikatkan pada porselinnya dengan semen. Ukuran yang dikenal adalah dengan piringan bergaris tengah 250 mm, 180 mm, 280 mm, dan 320 mm. Isolator gantung ini digandeng-gandengkan menurut kebutuhan isolasi karena tegangannya.

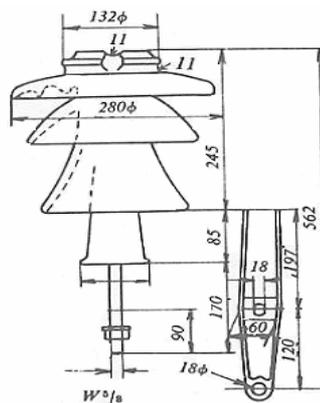


Gambar 2.4. Isolator Gantung (*Suspension*).

Sumber: Arismunandar, A., & Kuwahara, S. *Buku Pegangan Teknik Tenaga Listrik, Jilid II: Saluran transmisi*. Jakarta: PT. Pradnya Paramita, 1979, p. 23. Gambar 12.

b. Isolator jenis pasak (*pin-type*)

Jenis isolator ini digunakan pada saluran transmisi yang relatif rendah (kurang dari 22-33 kV) dan terbuat dari porselin, yang bagian bawahnya diberi tutup besi cor yang disemenkan pada porselin serta pasak baja yang disekrupkan di isolator ini. Karena isolator jenis pasak ini tidak dalam gandengan serta kekuatan mekanisnya yang rendah, maka jenis ini tidak dibuat dalam ukuran yang besar.

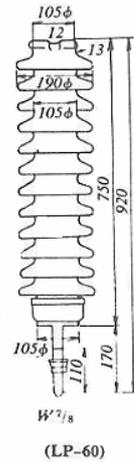


Gambar 2.5. Isolator Jenis Pasak (*Pin-type*).

Sumber: Arismunandar, A., & Kuwahara, S. *Buku Pegangan Teknik Tenaga Listrik, Jilid II: Saluran transmisi*. Jakarta: PT. Pradnya Paramita, 1979, p. 23. Gambar 13.

c. Isolator jenis pos-saluran (*line post*)

Isolator jenis ini sama dengan isolator jenis pasak, hanya saja isolator ini ukurannya lebih panjang dan lebih kecil (tidak terlalu lebar) dari iasolator jenis pasak.

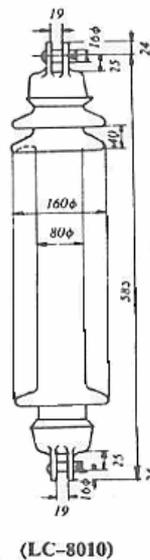


Gambar 2.6. Isolator Pos Saluran (*line post*).

Sumber: Arismunandar, A., & Kuwahara, S. *Buku Pegangan Teknik Tenaga Listrik, Jilid II: Saluran transmisi*. Jakarta: PT. Pradnya Paramita, 1979, p. 23. Gambar 15.

d. Isolator jenis batang panjang (*long-rod*)

Isolator ini mempunyai sedikit bagian logam sehingga tidak mudah rusak. Oleh karena rusuknya yang sederhana maka isolator ini mudah tercuci oleh hujan, sehingga cocok untuk digunakan pada tempat-tempat yang banyak dikotori garam dan debu.



Gambar 2.7. Isolator Batang Panjang (*Long Rod*).

Sumber: Arismunandar, A., & Kuwahara, S. *Buku Pegangan Teknik Tenaga Listrik, Jilid II: Saluran transmisi*. Jakarta: PT. Pradnya Paramita, 1979, p. 23. Gambar 14.

2.4.3. Kawat Penghantar (*Conductor*)

Jenis-jenis kawat penghantar yang biasa digunakan pada saluran transmisi adalah tembaga dengan konduktivitas 100% (CU 100%), tembaga dengan konduktivitas 97,5% (CU 97,5%) atau aluminium dengan konduktivitas 61% (AL 61%). Keuntungan dari kawat penghantar tembaga ini adalah konduktivitas dan kuat tariknya lebih tinggi dari kawat aluminium. Sedangkan kelemahannya adalah, untuk besar tahanan yang sama, kawat tembaga lebih berat dan lebih mahal dari kawat aluminium. Oleh karena itu kawat aluminium lebih banyak digunakan.

Kawat penghantar aluminium terdiri dari berbagai jenis dengan lambang sebagai berikut:³

- AAC (*All-Aluminium Conductor*), yaitu kawat penghantar yang seluruhnya terbuat dari aluminium.

³ Hutaaruk, T.S. *Transmisi Daya Listrik*. Jakarta: PT. Gelora Aksara Pratama, 1996, p. 4.

- AAAC (*All-Alluminium-Alloy Conductor*), yaitu kawat penghantar yang seluruhnya terbuat dari campuran alluminium.
- ACSR (*Alluminium Conductor Steel-Reinforced*), yaitu kawat penghantar alluminium ber-inti kawat baja.
- ACAR (*Alluminium Conductor Alloy-Reinforced*), yaitu kawat penghantar alluminium yang diperkuat dengan logam campuran.

Karena untuk saluran-saluran transmisi tegangan tinggi, dimana jarak antara dua menara jauh, maka dibutuhkan kuat tarik yang lebih tinggi, sehingga digunakan kawat penghantar ACSR.

2.4.4. Kawat Tanah (*Ground Wires*)

Kawat tanah (*ground wires*) juga disebut sebagai kawat pelindung (*shield wires*). Kawat tanah ini berfungsi untuk melindungi kawat-kawat penghantar atau kawat fasa terhadap sambaran petir, dan dipasang diatas kawat fasa. Pada umumnya kawat tanah ini menggunakan kawat baja (*steel wires*) yang lebih murah, tetapi ada juga yang menggunakan ACSR.

2.5. Saluran Kabel Bawah Tanah (*Underground Cable*)

Saluran ini menyalurkan tenaga listrik melalui kabel-kabel tanah yang ditanam di bawah permukaan tanah. Keuntungan dari saluran kabel bawah tanah ini adalah tidak terpengaruh oleh cuaca buruk, taufan, hujan angin, bahaya petir, dan sebagainya; selain itu saluran ini juga lebih estetik karena tidak mengganggu pemandangan (karena alasan inilah, saluran bawah tanah lebih disukai, terutama untuk daerah yang padat penduduknya dan di kota-kota besar).

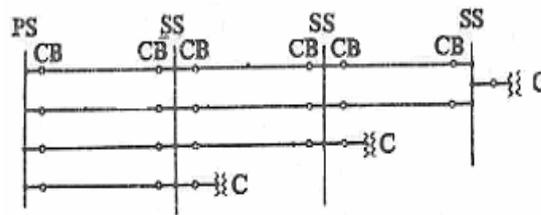
Kerugian dari saluran ini ialah lebih susah diperbaiki jika terjadi gangguan (contohnya: gangguan hubung singkat), dan biaya pembangunannya jauh lebih mahal dari saluran udara.

2.5.1. Macam-Macam Penyaluran Saluran Kabel Bawah Tanah

Menurut penyaluran tenaga listriknya saluran kabel bawah tanah dibagi menjadi lima, antara lain:

a. Sistem berturutan

Pada sistem ini, saluran yang keluar dari gardu primer menyalurkan tenaga listrik kepada konsumen melalui gardu-gardu sekunder yang letaknya berturutan (tandem) dan pemutus beban dipasang pada setiap ujung bagian saluran pada setiap gardu.

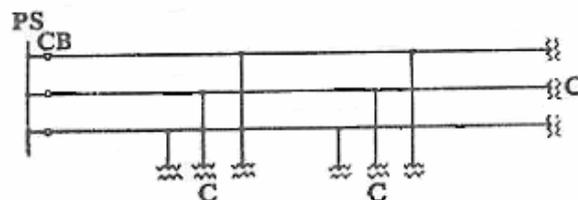


Gambar 2.8. Sistem Berturutan.

Sumber: Arismunandar, A., & Kuwahara, S. *Buku Pegangan Teknik Tenaga Listrik, Jilid II: Saluran transmisi*. Jakarta: PT. Pradnya Paramita, 1979, p. 138. Gambar 88 a.

b. Sistem banyak-terminal

Sistem ini sama dengan sistem berturutan, hanya saja pada sistem banyak-terminal setiap saluran dihubungkan dengan trafo, sedangkan pemutus beban hanya dipasang pada ujung gardu primer.

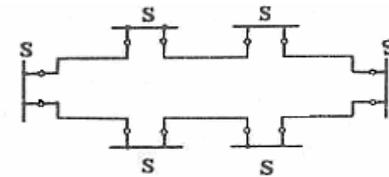


Gambar 2.9. Sistem Banyak-Terminal.

Sumber: Arismunandar, A., & Kuwahara, S. *Buku Pegangan Teknik Tenaga Listrik, Jilid II: Saluran transmisi*. Jakarta: PT. Pradnya Paramita, 1979, p. 138. Gambar 88 b.

c. Sistem rangkaian tertutup

Pada sistem rangkaian tertutup gardu-gardu dihubungkan satu sama lain sehingga membentuk suatu rangkaian yang tertutup. Sistem ini sangat menguntungkan, karena gangguan terbatas pada saluran yang terganggu. Sehingga jika saluran ini diputuskan, maka saluran yang lain masih mendapat tenaga dari sumber lain dalam rangkaian yang tidak terganggu.

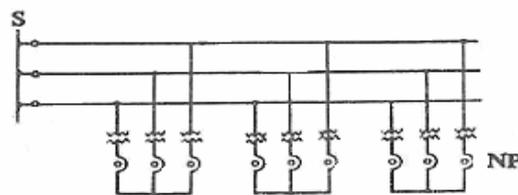


Gambar 2.10. Sistem Rangkaian Tertutup.

Sumber: Arismunandar, A., & Kuwahara, S. *Buku Pegangan Teknik Tenaga Listrik, Jilid II: Saluran transmisi*. Jakarta: PT. Pradnya Paramita, 1979, p. 138. Gambar 88 c.

d. Sistem jaringan

Sistem ini menyerupai sistem banyak-terminal. Bedanya ialah jika terjadi gangguan pada suatu saluran atau tafo, maka pelindung jaringan sekunder akan bekerja dan memutuskan aliran pada saluran yang terganggu. Tetapi karena semua bagian sekunder terhubung paralel, maka penyediaan tenaga listrik tidak akan terganggu.

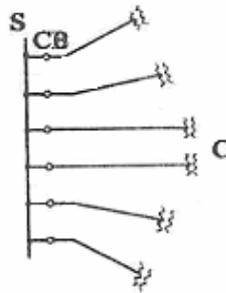


Gambar 2.11. Sistem Jaringan.

Sumber: Arismunandar, A., & Kuwahara, S. *Buku Pegangan Teknik Tenaga Listrik, Jilid II: Saluran transmisi*. Jakarta: PT. Pradnya Paramita, 1979, p. 138. Gambar 88 d.

e. Sistem radial

Pada sistem ini gardu primer menyalurkan tenaga listrik secara radial melalui gardu-gardu sekunder kepada konsumen, semuanya secara terpisah satu sama lain. Sistem ini sering dikombinasikan dengan sistem berturutan atau sistem banyak-terminal.



Gambar 2.12. Sistem Radial.

Sumber: Arismunandar, A., & Kuwahara, S. *Buku Pegangan Teknik Tenaga Listrik, Jilid II: Saluran transmisi*. Jakarta: PT. Pradnya Paramita, 1979, p. 138. Gambar 88 e.

2.5.2. Jenis-Jenis Kabel

Jenis-jenis kabel yang digunakan pada saluran kabel bawah tanah banyak sekali, namun demikian dapat di bagi menurut kelompok-kelompok berikut:

- a. Kelompok menurut kulit pelindungnya (*armor*), misalnya kabel bersarung timah hitam (*lead sheathed*), kabel berkulit pita baja (*steel-tape armored*), kabel berkulit kawat baja (*steel-wire armored*), kabel berkulit kawat tembaga (*copper-wire armored*), kabel berkulit baja tahan karat (*stainlees steel armored*), kabel bersarung guni (*jute*), dan kabel tahan karat.
- b. Kelompok menurut konstruksinya, misalnya kabel plastik dan karet (jenis belt , H, SL, SA), kabel jenis datar (*flat type*), kabel minyak (*oil-filled*), kabel pipa (pipe-type; misalnya berisi gas (*gas filled*), gas tekan (*compression gas*), dan berisi minyak (*oil filled*)), kabel berisi gas tekanan

rendah (*low pressure gas filled*), dan kabel tekan (*self-contained compression*).

- c. Kelompok menurut penggunaannya, misalnya kabel saluran (*duct draw-in*), kabel taruh (*direct-laying*), kabel laut (*submarine*), kabel corong utama (*main shaft*), dan kabel udara (*overhead*).

2.5.3. Cara Memasang Kabel

Ada berbagai cara memasang atau menaruh kabel, antara lain:⁴

- a. Cara menaruh langsung (*direct laying*), yaitu kabel ditanam langsung dalam tanah. Kadang-kadang kabel ini ditaruh terlebih dahulu dalam pipa tanah genting atau pipa beton. Sistem ini digunakan jika kabel yang ditanam kurang dari lima.
- b. Sistem pipa (*duct line*), yang menggunakan pipa-pipa beton bertulang atau asbes-semen atau baja atau PVC keras, yang ditanam dan dihubungkan dengan lubang-lubang kerja (*manholes*) berjarak 100-200 meter. Kabel ditarik dalam pipa-pipa ini dan dihubungkan melalui lubang-lubang kerja tadi. Cara ini digunakan dalam pemasangan kurang dari 16 kabel.
- c. Sistem terusan tertutup, sama dengan sistem pipa. Bedanya ialah cara ini dipakai jika jumlah kabel lebih dari 20 buah. Penaruhan kabel dalam lombong (pit) dengan tutup di gardu termasuk sistem ini juga. Kadang-kadang kabel ini ditaruh bersama dengan kabel telepon, pipa air, saluran pembuangan, dan pipa gas di dalam satu terowongan.

2.6. Jenis-Jenis Gangguan Pada Saluran Transmisi

Oleh karena letak saluran transmisi yang tersebar, maka saluran transmisi mengalami gangguan baik yang disebabkan oleh alam, maupun oleh sebab-sebab lain. Hampir semua gangguan pada saluran 187 kV keatas disebabkan oleh petir, sedangkan gangguan pada saluran 60 kV- 154 kV disebabkan oleh gejala-gejala alamiah seperti: petir, angin, banjir, gempa,

⁴ Arismunandar, A., & Kuwahara, S. *Buku Pegangan Teknik Tenaga Listrik, Jilid II: Saluran transmisi*. Jakarta: PT. Pradnya Paramita, 1979, p. 139.

binatang (burung, dsb), dan manusia (gangguan ini berupa layang-layang yang menyangkut di kabel saluran transmisi).

Jenis-jenis gangguan pada saluran transmisi dibagi menjadi dua kategori, yaitu:

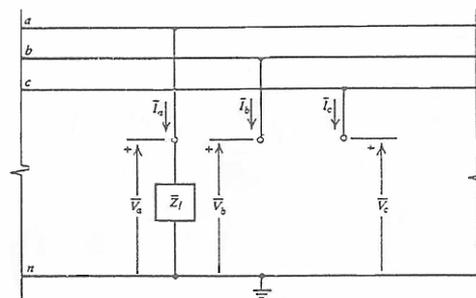
- Gangguan shunt atau paralel.
- Gangguan seri.

2.6.1. Gangguan Shunt atau Paralel

Gangguan shunt atau paralel disebut juga gangguan hubung singkat. Jenis gangguan ini sering terjadi pada saluran transmisi dan gangguan ini merupakan gangguan yang paling berbahaya karena akan mengakibatkan munculnya arus gangguan yang sangat besar. Akibatnya, arus yang sangat besar ini akan merusak peralatan-peralatan pada sisi pembangkit, saluran transmisi, dan pengaman.

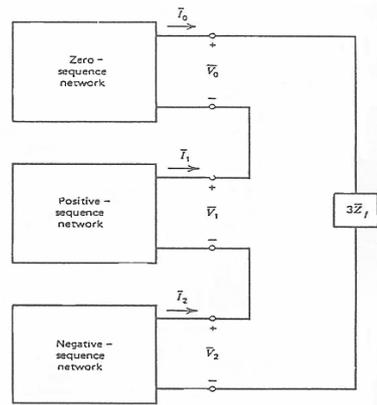
Jenis gangguan shunt ada empat jenis, yaitu:

1. Satu fasa ke tanah



Gambar 2.13. Gangguan Shunt Satu Fasa ke Tanah.

Sumber: Gross, Charles A. *Power System Analysis*. 2th ed. Canada: John Willey & Sons, 1986, p. 344. Gambar 9.9.



Gambar 2.14. Hubungan Rangkaian Urutan.

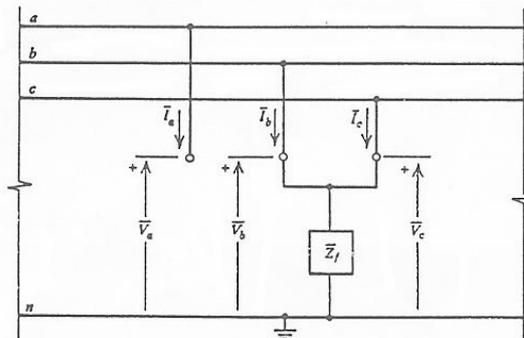
Sumber: Gross, Charles A. *Power System Analysis*. 2th ed. Canada: John Willey & Sons. 1986, p. 345, Gambar 9.10.

$$I_a = I_{a0} + I_{a1} + I_{a2}$$

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

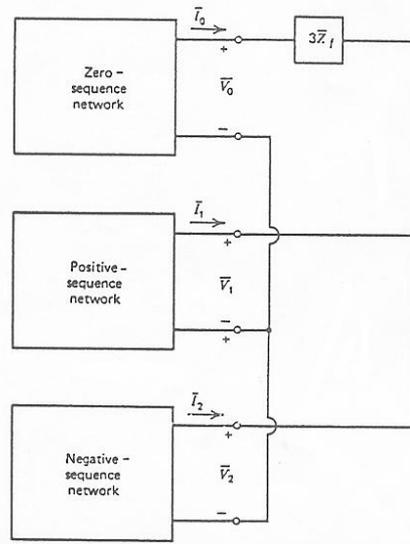
$$\text{Jika } Z_f = 0, \text{ maka } V_a = 0$$

2. Dua fasa ke tanah



Gambar 2.15. Gangguan Shunt Dua Fasa ke Tanah.

Sumber: Gross, Charles A. *Power System Analysis*. 2th ed. Canada: John Willey & Sons, 1986, p. 350. Gambar 9.15.



Gambar 2.16. Rangkaian Hubungan Urutan.

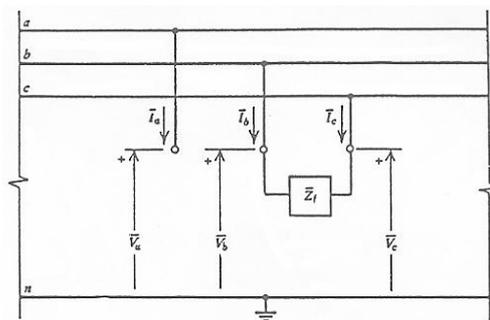
Sumber: Gross, Charles A. *Power System Analysis*. 2th ed. Canada: John Willey & Sons, 1986, p. 351. Gambar 9.16.

$$I_b + I_c = 3 I_{a0}$$

$$I_a = 0 \quad V_b = V_c = Z_f (I_b + I_c)$$

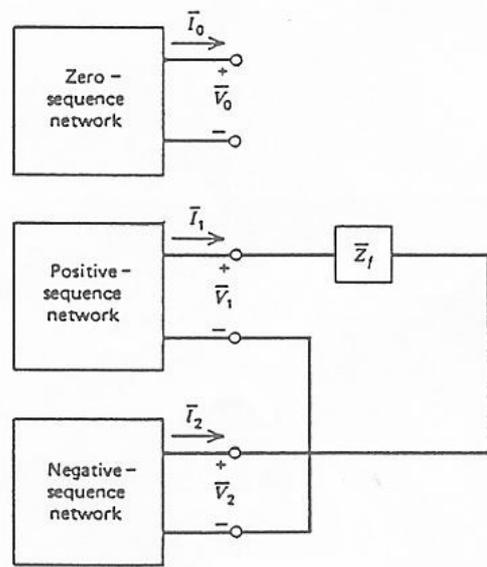
$$\text{Jika } Z_f = 0, \text{ maka } V_b = V_c = 0$$

3. Antar fasa ke tanah



Gambar 2.17. Gangguan Shunt Antar Fasa ke Tanah.

Sumber: Gross, Charles A. *Power System Analysis*. 2th ed. Canada: John Willey & Sons, 1986, p. 347. Gambar 9.12.



Gambar 2.18. Rangkaian Hubungan Urutan.

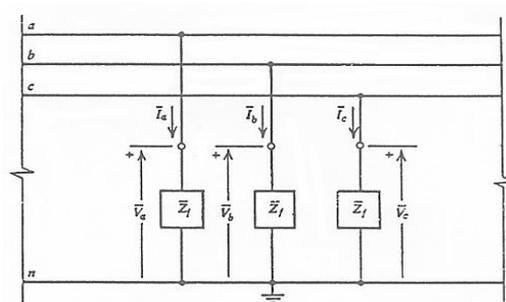
Sumber: Gross, Charles A. *Power System Analysis*. 2th ed. Canada: John Willey & Sons, 1986, p. 348. Gambar 9.13.

$$I_a = 0$$

$$I_b = -I_c$$

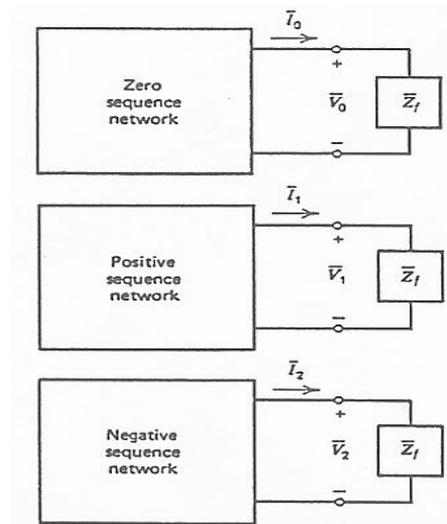
$$V_b = V_c$$

4. Tiga fasa ke tanah



Gambar 2.19. Gangguan Shunt Tiga Fasa ke Tanah.

Sumber: Gross, Charles A. *Power System Analysis*. 2th ed. Canada: John Willey & Sons, 1986, p. 341. Gambar 9.6.



Gambar 2.20. Rangkaian Hubungan Urutan.

Sumber: Gross, Charles A. *Power System Analysis*. 2th ed. Canada: John Willey & Sons, 1986, p. 342. Gambar 9.7.

$$V_a = Z_f I_a$$

$$V_b = Z_f I_b$$

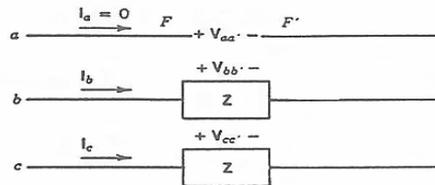
$$V_c = Z_f I_c$$

2.6.2. Gangguan Seri

Gangguan seri ini sering disebut juga gangguan hubung terbuka. Dalam gangguan ini, tidak lagi memperhitungkan hubungan antara fasa dengan netral. Gangguan ini terjadi akibat satu saluran putus atau satu pemutus trip dan dua saluran putus atau dua pemutus trip. Putusnya saluran ini bisa disebabkan oleh keausan pada konduktor sehingga pada saat terjadi angin kencang maka konduktor tersebut putus, atau karena saluran transmisi tertimpa pohon, dan dapat disebabkan juga oleh pemasangan konduktor yang terlalu kencang.

Jenis gangguan seri ada dua jenis, yaitu:

1. Satu saluran terbuka



Gambar 2.21. Rangkaian Satu Saluran Terbuka.

Sumber: Gonen, Turan. *Modern Power System Analysis*. New York: John Willey & Sons, 1988, p. 301.

Dari gambar diatas diperoleh:

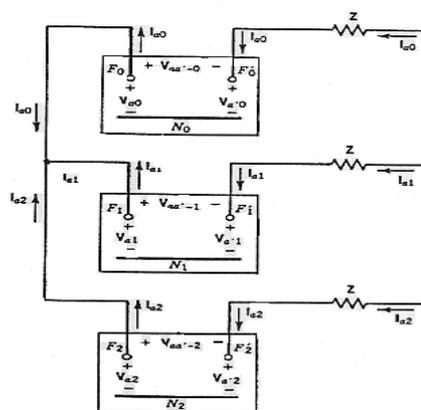
I_a = arus yang mengalir pada fasa a.

I_b = arus yang mengalir pada fasa b.

I_c = arus yang mengalir pada fasa c.

$$V_{aa'} = V_b - V_{b'}$$

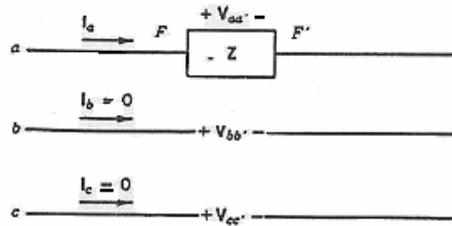
$$V_{cc'} = V_c - V_{c'}$$



Gambar 2.22. Rangkaian Hubungan Urutan.

Sumber: Gonen, Turan. *Modern Power System Analysis*. New York: John Willey & Sons, 1988, p. 301.

2. Dua saluran terbuka



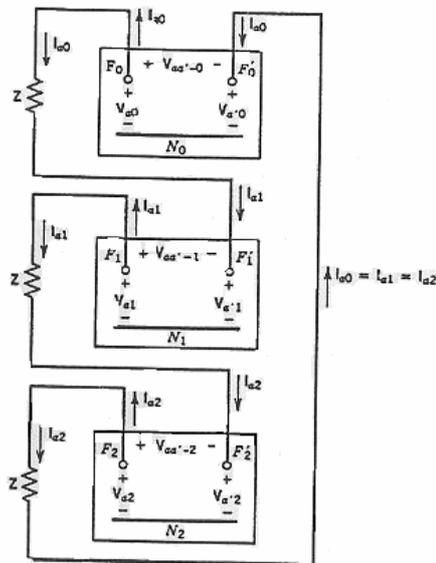
Gambar 2.23. Rangkaian Dua Saluran Terbuka.

Sumber: Gonen, Turan. *Modern Power System Analysis*. New York: John Willey & Sons, 1988, p. 302.

Pada gambar diatas, fasa b dan c dalam keadaan terbuka sehingga:

$$I_b = I_c = 0$$

Tegangan pada fasa a adalah $V_{aa'} = V_a - V_{a'}$.



Gambar 2.24. Rangkaian Dua Saluran Terbuka.

Sumber: Gonen, Turan. *Modern Power System Analysis*. New York: John Willey & Sons, 1988, p. 302.

2.7. Aliran Beban (*Load Flow*)

Aliran beban (*load flow*) sama dengan aliran daya (*power flow*).⁵ Studi beban adalah penentuan atau perhitungan tegangan, arus, daya, dan faktor daya atau daya reaktif yang terdapat pada berbagai titik dalam suatu jaringan listrik pada keadaan pengoperasian normal, baik yang sedang berjalan maupun yang diharapkan akan terjadi di masa yang akan datang.

Persamaan simpul standar dalam notasi matriks dapat dinyatakan sebagai:

$$I = Y_{bus} \cdot V \quad (2.1)^6$$

$$Z_{bus} = Y_{bus}^{-1} \quad (2.2)^7$$

$$V = Z_{bus} \cdot I \quad (2.3)^8$$

Sedangkan rumus umum untuk arus sumber yang mengalir menuju simpul k suatu jaringan yang mengandung N buah simpul bebas yaitu N buah bus selain netral adalah:

$$I_k = \sum_{n=1}^N Y_{kn} \cdot V_n \quad (2.4)^9$$

Dalam suatu studi aliran beban keterangan utama yang diperoleh adalah besar dan sudut fasa tegangan pada setiap bus serta daya nyata dan daya reaktif yang mengalir pada setiap saluran.

Persamaan umum aliran daya adalah:

$$P_k - jQ_k = V_k^* \sum_{n=1}^N Y_{kn} V_n \quad (2.5)^{10}$$

⁵ Stevenson Jr., William D. *Element of Power System Analysis Fourth Edition*. Singapore: McGraw Hill Inc, 1982, p.5.

⁶ Ibid, p.178.

⁷ Ibid

⁸ Ibid, p.179.

⁹ Ibid, p.161.

¹⁰ Ibid, p.196.

Bus satu yang mana aliran daya nyatanya tidak ditentukan disebut *swing bus*, dan biasanya berupa suatu bus dimana dihubungkan sebuah generator.

2.7.1. Metode Gauss-Seidel¹¹

Untuk studi aliran beban ini akan dilakukan suatu proses ulangan dengan menetapkan nilai – nilai perkiraan untuk tegangan bus yang yang tidak diketahui dan menghitung nilai baru untuk setiap tegangan bus dari nilai – nilai perkiraan pada bus – bus yang lain, daya nyatanya yang ditentukan, dan daya reaktif yang ditentukan atau besarnya tegangan. Jadi akan diperoleh suatu himpunan baru nilai tegangan untuk setiap bus dan terus digunakan untuk menghitung satu lagi himpunan tegangan bus, dimana hal ini dinamakan iterasi (*iteration*). Proses ini diulangi untuk setiap bus berturut – turut untuk seluruh jaringan (kecuali pada *swing bus*) untuk menyelesaikan iterasi pertama. Kemudian proses ini dilakukan lagi berulang – ulang sehingga besarnya pembetulan tegangan pada setiap bus kurang dari suatu indeks ketepatan yang telah ditetapkan sebelumnya.

Untuk keseluruhan N buah bus, persamaan tegangan yang dihitung pada setiap bus dimana P_k dan Q_k diberikan adalah:

$$V_k = \frac{1}{Y_{kk}} \left(\frac{P_k - jQ_k}{V_k^*} - \sum_{n=1}^N Y_{kn} V_n \right) \quad (2.6)^{12}$$

Apabila untuk menghitung daya reaktif, dapat menggunakan persamaan sebagai berikut:

$$Q_k = -I_m \left(V_k^* \sum_{n=1}^N Y_{kn} V_n \right) \quad (2.7)^{13}$$

Dimana I_m berarti bilangan imajiner. Setelah menghitung daya reaktif Q_k , nilai Q_k ini dimasukkan dalam persamaan (2.6) untuk mendapatkan suatu V_k

¹¹ Stevenson Jr., William D. *Element of Power System Analysis Fourth Edition*. Singapore: McGraw Hill Inc, 1982, p.195

¹² Ibid

¹³ Ibid, p.196.

baru. Besar V_k baru ini kemudian dikalikan dengan perbandingan dari persamaan (2.6), yang hasilnya adalah tegangan kompleks yang telah dibetulkan dari besar yang ditentukan.

2.7.2. Metode Newton-Raphson¹⁴

Uraian deret Taylor untuk suatu fungsi dengan dua variabel atau lebih adalah dasar dari metode Newton-Raphson dalam penyelesaian soal – soal aliran beban. Dan seperti pada metode Gauss-Seidel *swing* bus diabaikan dari penyelesaian iterasi untuk menentukan tegangan, karena baik besar tegangan maupun sudut tegangan pada bus tersebut telah ditentukan.

Langkah yang harus dilakukan untuk pertama adalah dengan menentukan nilai $P_{k(\text{dihitung})}$ dan $Q_{k(\text{dihitung})}$ yang mengalir ke dalam sistem pada tiap bus untuk nilai yang ditentukan atau perkiraan dari besar dan sudut tegangan untuk iterasi pertama atau tegangan yang ditentukan paling akhir untuk iterasi berikutnya. Dimana untuk persamaan P_k dan Q_k adalah:

Dimana untuk persamaan P_k dan Q_k dalam persamaan umum aliran daya dalam bentuk *hybrid* adalah:

$$P_k = |V_k| \left| \sum_{n=1}^N |V_n| \{G_{kn} \cos(\theta_k - \theta_n) + B_{kn} \sin(\theta_k - \theta_n)\} \right| \quad (2.8)^{15}$$

$$Q_k = |V_k| \left| \sum_{n=1}^N |V_n| \{G_{kn} \sin(\theta_k - \theta_n) + B_{kn} \cos(\theta_k - \theta_n)\} \right| \quad (2.9)^{16}$$

Setelah itu menghitung besar ΔP dan ΔQ pada setiap bus, yang persamaannya adalah:

$$\Delta P = P_{k(\text{yang ditetapkan})} - P_{k(\text{dihitung})} \quad (2.10)^{17}$$

$$\Delta Q = Q_{k(\text{yang ditetapkan})} - Q_{k(\text{dihitung})} \quad (2.11)^{18}$$

¹⁴ Stevenson Jr., William D. *Element of Power System Analysis Fourth Edition*. Singapore: McGraw Hill Inc, 1982, p.197.

¹⁵ Bergen, Arthur R. and Vijay Vittal. *Power System Analysis Second Edition*. Prentice-Hall:New Jersey, 2000, p.198.

¹⁶ Ibid

¹⁷ Stevenson Jr., William D. *Element of Power System Analysis Fourth Edition*. Singapore: McGraw Hill Inc, 1982, p.197.

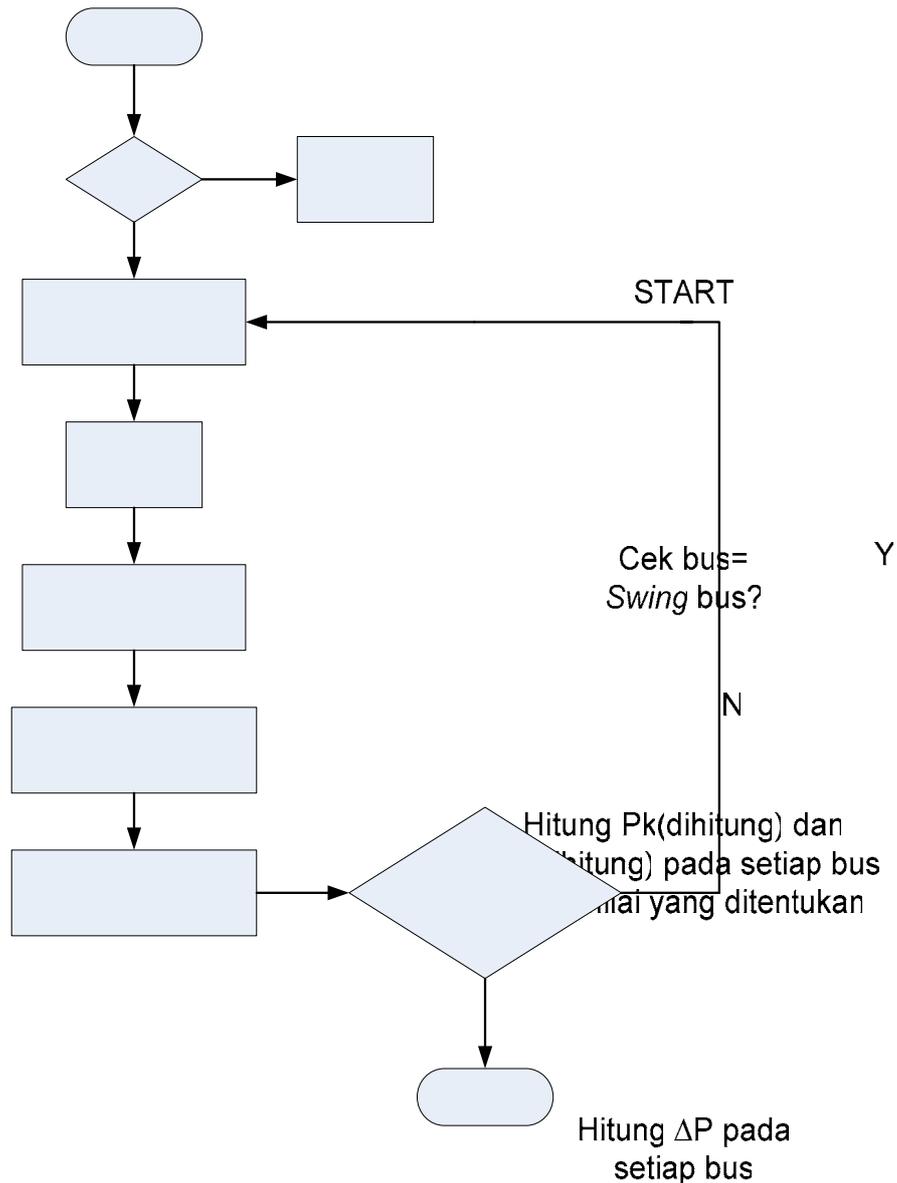
¹⁸ Ibid

Untuk nilai – nilai jacobian (matriks bujur sangkar turunan parsial) dihitung dengan menggunakan nilai – nilai perkiraan atau yang ditentukan dari besar dan sudut tegangan dalam persamaan turunan parsial yang ditentukan dengan diferensiasi persamaan (2.8) dan (2.91). seperti misalnya, dari persamaan (2.8) akan didapatkan (dimana $n \neq k$):

$$\frac{\partial P_k}{\partial \delta_n} = |V_k V_n Y_{kn}| \sin (\theta_{kn} + \delta_n - \delta_k) \quad (2.12)^{19}$$

Hasil dari jacobian tersebut dibalik (invers), kemudian mengkoreksi tegangan $\Delta \delta_k$ dan $\Delta |V_k|$ pada setiap bus. Nilai baru dari δ_k dan $|V_k|$ ditambahkan $\Delta \delta_k$ dan $\Delta |V_k|$ pada nilai sebelumnya. Semua langkah – langkah perhitungan tersebut diulangi dengan menggunakan nilai untuk besar dan sudut tegangan yang ditentukan paling akhir sehingga semua besar ΔP dan ΔQ atau semua nilai δ dan $|V|$ lebih kecil dari indeks ketepatan yang dipilih.

¹⁹ Stevenson Jr., William D. *Element of Power System Analysis Fourth Edition*. Singapore: McGraw Hill Inc, 1982, p.197.



Besar V b
sampai ite
terakhir s

Gambar 2.25. Flowchart Newton-Raphson

Sumber: Stevenson Jr., William D. *Element of Power System Analysis Fourth Edition*. Singapore: McGraw Hill Inc, 1982, p. 202.

2.8. Cara Menghitung Keandalan Sistem Transmisi

Metode yang digunakan untuk menghitung keandalan transmisi adalah *Failure Effect Analysis (FEA)*, atau analisa efek kegagalan. Metode FEA ini dipilih karena kurangnya metode analitis untuk menghitung indeks secara langsung dan kemampuan metode simulasi yang digunakan dalam FEA untuk secara akurat memodelkan perilaku sistem tenaga. Nilai jacobian diinvers, lalu hitung koneksi tegangan $\Delta\delta_k$ dan ΔV_k pada setiap bus

memungkinkan pengguna untuk menentukan level ketepatan yang diinginkan dan asumsi yang berhubungan dengan aplikasi khususnya. Kekurangan utama dari metode FEA ini adalah persyaratan perhitungannya tinggi, dan oleh karena itu jumlah kemungkinan yang bisa diteliti menjadi terbatas.

Tahap-tahap untuk melakukan metode FEA adalah:

- Mendefinisikan calon kejadian.
- Menentukan kejadian untuk dipelajari.
- Menghitung kuantitas jaringan.
- Menentukan kejadian mana yang menghasilkan kegagalan (*failure*).
- Menghitung probabilitas dan frekuensi kejadian.
- Menghitung indeks kehandalan (*reliability*).

2.8.1. Mendefinisikan Calon Kejadian

Tahap pertama dalam FEA adalah mendefinisikan tipe-tipe kejadian yang akan diteliti dan dievaluasi dalam tahap berikutnya. Pilihan tipe kejadian yang akan diteliti bergantung pada teknik analisa yang akan digunakan untuk sistem. Contohnya, jika sebuah teknik aliran daya (*power flow*) akan digunakan untuk mengevaluasi kondisi, maka calon kejadian akan terdiri dari saluran transmisi dan *outage* saluran transmisi. Tipe kejadian yang diteliti bergantung pada jumlah dan detil data yang tersedia serta tipe model sistem yang akan digunakan.

2.8.2. Menentukan Kejadian Untuk Dipelajari

Tahap ini melibatkan penentuan calon kejadian mana yang akan secara aktual di evaluasi. Kejadian yang diteliti ditentukan secara manual berdasarkan pada pengetahuan pengguna dari sistem tenaga, pengalaman, dan keputusan. Hal ini dilakukan karena tidak ada prosedur otomatis yang tersedia.

2.8.3. Menghitung Kuantitas Jaringan

Metode yang dipilih untuk memecahkan persamaan sistem daya adalah kritis terhadap prosedur reliabilitas, karena ketepatan dan penafsiran dari indeks bergantung pada solusi jaringan.

Persamaan sistem daya seringkali di linierkan untuk penggunaan dalam perhitungan kemungkinan aliran daya untuk mengurangi perhitungan. Tiga metode yang biasa digunakan adalah aliran daya linier (DC), aliran daya faktor-faktor distribusi, atau *fast decoupled power flow*.

Setelah melakukan perhitungan aliran daya, beberapa perhitungan tambahan selanjutnya bisa dilakukan. Batas transfer antara sistem atau area sistem bisa ditemukan dari sebuah rangkaian perhitungan aliran daya. Perhitungan lainnya yang tersedia adalah *Load Supplying Capability* (LSC). Kedua prosedur ini mengukur kemampuan sistem daya untuk mengirim daya dari pembangkitan ke beban yang mempertimbangkan batas statis. Metode hasil stabilitas juga digunakan untuk menghitung batas pengiriman seperti yang dibatasi oleh kinerja dinamis dari jaringan.

2.8.4. Menentukan Kejadian Mana Yang Menghasilkan Kegagalan (*Failure*)

Dengan tujuan untuk menggolongkan kejadian-kejadian sebagai berhasil atau gagal, hal ini adalah baik untuk merumuskan masalah yang berhubungan dengan lima kondisi operasi yang mendefinisikan kondisi sistem tenaga. Lima kondisi, seperti yang ditunjukkan dalam gambar 2.7, adalah normal, siaga, gawat, sangat gawat, dan kondisi pemeliharaan (*restorative*). Kondisi-kondisi ini didefinisikan oleh arus dan tegangan sistem, yang seharusnya tidak melebihi level maksimum berdasarkan pada keterbatasan perlengkapan dan pedoman operasi sistem tenaga.

Dalam kondisi normal semua perlengkapan dan batasan operasi adalah dalam batas-batas yang menunjukkan bahwa pembangkitan bisa memenuhi suplai beban (permintaan total) tanpa peralatannya mengalami kelebihan beban (*overload*). Dalam kondisi ini terdapat margin yang memenuhi seperti kehilangan dari banyak elemen (*the loss of any elements*), yang ditunjukkan oleh beberapa kriteria (seperti semua elemen-elemen tunggal, akan bergantung pada perencanaan dan filosofi operasi dari utilitas tertentu), tidak akan menghasilkan sebuah batas yang dilanggar.

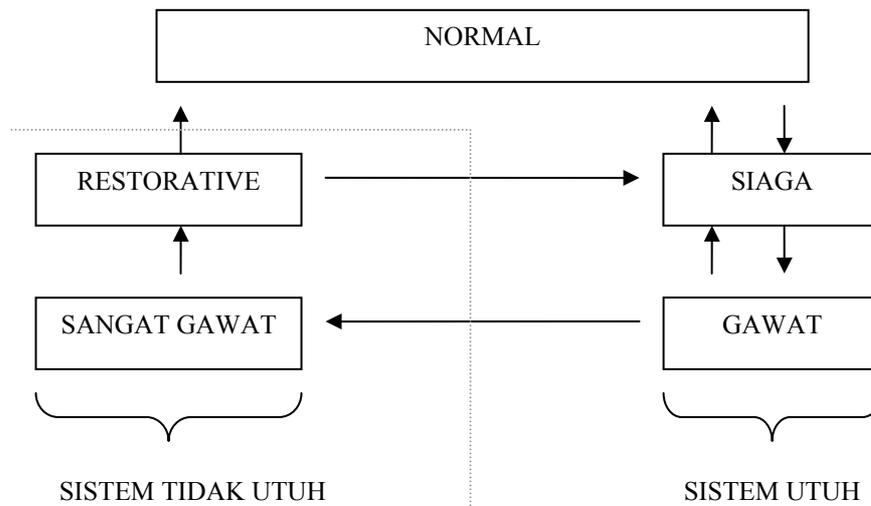
Jika sebuah sistem memasuki sebuah kondisi dimana kehilangan berbagai elemen dalam kriteria akan dihasilkan dalam pelanggaran arus atau

tegangan, maka sistem ini masuk dalam kondisi siaga. Kondisi siaga serupa dengan kondisi normal dimana tidak terjadi kelebihan beban, tetapi tidak lagi terdapat margin yang memenuhi untuk menahan *outage*. Sistem bisa memasuki kondisi siaga oleh *outage* dari perlengkapan, oleh perubahan dalam jadwal pembangkitan, atau sebuah pertumbuhan dalam beban sistem. Dari kondisi siaga, tindakan perbaikan bisa memulihkan sistem pada kondisi operasi normal.

Jika sebuah kemungkinan terjadi atau pembangkitan dan beban berubah sebelum tindakan perbaikan diambil, sistem akan memasuki kondisi gawat. Tidak ada beban yang dibatasi dalam kondisi gawat, tetapi perlengkapan atau batasan *outage* telah dilanggar. Jika pengukuran kontrol tidak tepat waktu untuk memperbaiki sistem pada kondisi siaga, sistem akan berubah dari kondisi gawat menjadi kondisi sangat gawat.

Dalam kondisi sangat gawat, perlengkapan dan batasan-batasan operasi telah dilanggar dan beban tidak disuplai. Sebuah tindakan perbaikan yang tepat dari kondisi gawat ke kondisi siaga bisa jadi sebuah tindakan seperti pengaliran beban (*load shedding*) atau penurunan tegangan. Kita bisa mendefinisikan sebuah kondisi sangat gawat seperti tidak mengontrol pengurangan beban. Gambar 2.7 menunjukkan bahwa ketika sistem membuat transisi dari kondisi gawat ke sangat gawat, sistem tidak lagi utuh. Ini menunjukkan bahwa *islanding* atau pengurangan beban telah terjadi. Untuk mentransfer kondisi sangat gawat, sistem harus memasuki kondisi pemeliharaan (*restorative*) untuk menghubungkan kembali beban dan mensinkronkan kembali jaringan.

Karena beban tidak disuplai hanya dalam kondisi sangat gawat, maka kejadian yang dihasilkan dalam kondisi sangat gawat cenderung digunakan untuk perhitungan kehandalan. Kelima kondisi diatas jarang dimodelkan, tetapi dalam konsep definisi kehandalan bisa dimodifikasi untuk memasukkan transisi ke kondisi lainnya.



Gambar 2.26. Kondisi Operasi Sistem.

Sumber: General Electrical Company. *Report Reliability Indexes for Power Systems*. New York: Electric Power Research Institute, 1981, p. 4-10. Gambar 4.2.

2.8.5. Menghitung Probabilitas Dan Frekuensi Kejadian

Untuk menghitung indeks probabilitas, estimasi dari probabilitas kejadian dan frekuensi sangat dibutuhkan. Asumsi yang umumnya dibuat yaitu bahwa kejadian adalah mandiri (*independent*). Asumsi ini bisa memiliki efek signifikan pada nilai indeks. Mengasumsikan kebebasan (*independence*) biasanya dihasilkan dalam sebuah estimasi probabilitas yang rendah bagi *outages* ganda. Karena *outage* ini cenderung untuk memberikan kontribusi pada indeks, perhitungan kehandalan bisa dilakukan.

Parameter saluran *outage* digunakan untuk membentuk parameter probabilitas dan frekuensi yang dibutuhkan. Dua tipe parameter yang digunakan adalah:

- Tipe 1. $P(A_i)$, yaitu probabilitas dimana kejadian A_i terjadi, dan kejadian A_i terdiri hanya dari saluran diluar servis. Probabilitas tipe 1 ini digunakan untuk menghitung indeks jika pendekatan rangkaian minimum digunakan.
- Tipe 2. P_i , yaitu probabilitas dimana sistem dalam kondisi memiliki saluran yang didefinisikan oleh i dalam servis dan yang lainnya diluar servis. Probabilitas tipe 2 ini digunakan dengan pendekatan penghitungan kondisi.

Mean time to failure (MTTF) atau waktu tengah untuk kegagalan:

$$m = \frac{1}{\lambda} \quad \text{Jam}$$

Dimana:

m = *Mean time to failure* (MTTF) atau waktu tengah untuk kegagalan.

λ = *Failure rate* atau laju kegagalan.

Mean time to repair (MTTR) atau waktu tengah untuk perbaikan:

$$r = \frac{1}{\mu} \quad \text{Jam}$$

Dimana:

r = *Mean time to repair* (MTTR) atau waktu tengah untuk perbaikan.

μ = *Repair rate* atau laju perbaikan.

Mean time between failure (MTBF) atau waktu tengah antara kegagalan:

$$MTBF = MTTR + MTTF$$

Outage probability atau P_{down} :

$$\text{Outage Probability} = P_{down} = \frac{MTTR}{MTBF}$$

$$P_{up} = 1 - P_{down}$$

State probability:

$$P_0 = \prod_{i=1}^n P_{iup}$$

$$P_i = P_{idown} \prod_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n P_{jup}$$

Dimana:

P_0 = Probabilitas dimana semua saluran transmisi dalam keadaan normal.

P_i = Probabilitas dimana semua saluran transmisi ke i dalam keadaan terlepas (atau mengalami *outage*).

P_{down} = Probabilitas dimana saluran transmisi dalam keadaan terlepas (atau mengalami *outage*).

P_{up} = Probabilitas dimana saluran transmisi dalam keadaan normal.

2.8.6. Menghitung Indeks Keandalan (*Reliability*)

Indeks keandalan adalah parameter dari proses *stochastic* ($Z(t)$). Parameter ini bisa dianggap sebagai deterministik atau probabilistik. Indeks deterministik mencatat sebuah nilai maksimum yang berkaitan dengan proses atau jumlah waktu suatu kejadian yang terjadi atau statistik serupa lainnya. Kunci utama dari indeks deterministik adalah bahwa mereka mencatat informasi dalam bentuk data “mentah” dan tidak merangkum seluruh proses. Sedangkan indeks probabilistik merefleksikan seluruh proses dan merangkum karakteristik dari proses.

2.8.6.1. Indeks Deterministik

Karena kurangnya data signifikan dan kurangnya program komputer untuk menghitung indeks transmisi probabilistik, maka indeks deterministik telah digunakan pada tingkat yang lebih besar. Indeks didefinisikan dengan mengasumsikan bahwa tidak semua kemungkinan yang ada di evaluasi. Pendekatan ini dipilih karena tidak mungkin untuk meneliti semua kombinasi dan persamaan yang dihasilkan adalah umum. Beberapa indeks deterministik yang digunakan, yaitu:

1. Beban maksimum yang tidak disuplai (*maximum load not supplied*)

Indeks ini melibatkan penentuan jumlah terbesar beban yang tidak disuplai karena kemungkinan yang diteliti.

$$Max Load N. S. = Max \left(\sum_{k=1}^{NB} Zk1, \sum_{k=1}^{NB} Zk2, \dots, \sum_{k=1}^{NB} Zkm \right) \quad (2.13)^{20}$$

Dimana:

Z_{ki} = Beban yang dibatasi pada bus k selama kondisi transmisi i.

NB = Jumlah bus dalam sistem.

m = Jumlah kemungkinan/kejadian yang diteliti.

Besaran aktual dari beban yang dibatasi bergantung pada metode solusi yang dipilih.

2. Energi maksimum yang tidak disuplai (*maximum energy not supplied*)

Indeks ini sama dengan indeks sebelumnya, hanya saja yang diperhatikan adalah energi dari daya.

$$Max Energy N. S. = Max \left(\sum_{k=1}^{NB} Zk1Dk1, \sum_{k=1}^{NB} Zk2Dk2, \dots, \sum_{k=1}^{NB} ZkmDkm \right) \quad (2.14)^{21}$$

Dimana:

D_{ki} = Durasi kehilangan beban pada bus k karena kejadian i.

Persyaratan perhitungan sama dengan indeks sebelumnya, kecuali bahwa durasi *outage* dibutuhkan untuk menghitung indeks ini. Ini adalah kuantitas yang sangat sulit untuk dihitung, karena sebuah model beban sebagai fungsi waktu untuk masing-masing bus dibutuhkan.

3. Kemampuan suplai beban minimum (*minimum load supplying capability*)

Kemampuan suplai beban minimum atau *minimum Load Supplying Capability* (LSC) dari sistem daya didefinisikan sebagai beban sistem maksimum yang bisa disuplai tanpa adanya kelebihan beban pada saluran. LSC dihitung dengan meragamkan pengiriman pada generator dan

²⁰ General Electrical Company. *Report Reliability Indexes for Power Systems*. New York, 1981, p. 4-14.

²¹ Ibid

maksimum yang bisa diimpor pada sebuah sistem tertentu atau dikirim antara area dari sebuah sistem untuk kondisi sistem tertentu. Perbedaan utama SIC dengan LSC yaitu bahwa beban adalah tetap untuk perhitungan SIC dan jumlah daya yang dikirim dari utilitas yang saling berhubungan dimaksimalkan. Jika ini berulang untuk semua kemungkinan, SIC minimum adalah sebuah ukuran dari reliabilitas sistem.

$$\text{MinSIC} = \min[\text{SIC1}, \text{SIC2}, \dots, \text{SICm}] \quad (2.16)^{23}$$

Dimana: SIC_i = Kemampuan pertukaran simultan untuk kemungkinan i .

Dengan tujuan untuk menghitung SIC, masalah LP dirumuskan sebagai berikut:

$$\text{Maximize } \sum_{i=1}^I P_{gk}$$

Subyek terhadap, Aliran saluran transmisi < Batas transmisi

$$\sum_{i=1}^I P_{Ai} + P_{gA} = \text{beban}$$

Dimana: P_{Ai} = Daya yang diimpor oleh A dari sistem i .

I = Jumlah Interkoneksi.

P_{gA} = Daya yang dihasilkan secara internal oleh sistem A.

Aliran saluran transmisi umumnya dimodelkan dengan persamaan jaringan yang dibuat linier. Ide dari perhitungan ini adalah untuk

²³ General Electrical Company. *Report Reliability Indexes for Power Systems*. New York, 1981, p. 4-16.

menurunkan daya yang dihasilkan dalam sistem seseorang dengan tujuan untuk memaksimalkan pengiriman daya.

5. Aliran saluran maksimum (*maximum line flow*)

Indeks ini adalah sebuah indikasi dari dampak kemungkinan pada aliran daya sirkuit khusus. Indeks ini membantu memberi seorang perencana sebuah indikasi dari ukuran yang dibutuhkan bagi sebuah saluran baru. Indeks ini ditulis sebagai:

$$\text{Max Flow on Line } j = \text{Max}[Flow_{j1}, Flow_{j2}, \dots, Flow_{jm}] \quad (2.17)^{24}$$

Dimana: Flow (aliran) j_i = Aliran pada saluran j selama kemungkinan i .

Aliran ini bisa dihitung dengan beberapa metode aliran daya yang tersedia yang disebutkan sebelumnya. Keputusan seperti untuk metode bergantung pada ketepatan yang dibutuhkan dan detil pemodelan yang diperlukan. Selain itu berguna untuk mengetahui berapa banyak kemungkinan yang dihasilkan dalam aliran tertentu atau semakin besar untuk tujuan perencanaan.

2.8.6.2. Indeks Probabilistik

Indeks probabilistik dibagi menjadi 3, yaitu:

1. Kehilangan probabilitas beban atau *Loss Of Load Probability* (LOLP)

Kehilangan probabilitas beban untuk sistem transmisi (LOLP) mengukur probabilitas kehilangan beban karena *outage* sistem transmisi. Perhitungan ini biasanya dilakukan pada beban puncak tahun itu.

²⁴ General Electrical Company. *Report Reliability Indexes for Power Systems*. New York, 1981, p. 4-16.

$$LOLP = \sum_{i \in L} P_i \text{ days/day} \quad (2.18)^{25}$$

Dimana: P_i = Probabilitas dimana sistem transmisi dalam kondisi i .

$i \in L$ = Semua kondisi i yang dihasilkan dalam kehilangan beban kejadian L .

Secara konseptual perhitungan LOLP bisa diperluas menjadi *Loss of Load Expectation* (LOLE) untuk beberapa rangkaian beban atau distribusi beban dengan menggunakan persamaan (2.7).

$$LOLE = \sum_{k=1}^{NL} \sum_{i, k \in L} P_i \text{ days/period} \quad (2.19)^{26}$$

Dimana: NL = Jumlah beban yang diteliti.

$i, k \in L$ = Semua kondisi transmisi i pada beban k yang dihasilkan dalam kehilangan beban kejadian L .

Perhitungan periode akan membutuhkan sejumlah perhitungan signifikan jika kuantitas sistem harus dihitung ulang selengkapnya. Prosedur LSC yang digambarkan sebelumnya bisa digunakan dalam perhitungan ini. Perbedaan antara LSC dan beban sistem yang mewakili beban yang tidak disuplai dalam cara serupa dengan kapasitas yang dipasang dikurangi beban dalam sebuah analisa keandalan pembangkitan. Oleh karena itu, dengan jenis asumsi ini, beban perhitungan dikurangi pada sebuah poin dimana perhitungan memungkinkan untuk beban ganda. Dengan menggunakan sebuah model linier dari aliran daya DC, perhitungan selanjutnya dikurangi

²⁵ General Electrical Company. *Report Reliability Indexes for Power Systems*. New York, 1981, p. 4-17.

²⁶ Ibid.

yang memungkinkan jumlah kejadian lebih besar dan beban-beban dimasukkan.

Perhitungan juga bisa dimasukkan untuk memberikan *Hourly Loss of Load Expectitation* (HLOLE), sebuah indeks dasar, untuk jaringan transmisi. Sedangkan perhitungan HLOLE tidak memungkinkan karena realitas perhitungan, indeks dimasukkan untuk kelengkapan.

$$HLOLE = \sum_{k=1}^{8760} \sum_{i,k \in L} P_i \quad \text{hours/year} \quad (2.20)^{27}$$

2. Frekuensi kehilangan beban atau *Frequency of Loss of Load* (FLOL)

Frekuensi dari kehilangan beban yang disebabkan oleh kondisi *outage* transmisi bisa didefinisikan sebagai:

$$FLOL = \sum_{i \in L} P_i \sum_{j \in S} \lambda_{ij} \quad (2.21)^{28}$$

Dimana: $j \in S$ = Semua kondisi j yang menghasilkan tidak adanya kehilangan beban pada sistem (berhasil).

λ_{ij} = Tingkat transisi dari kondisi kegagalan i terhadap kondisi keberhasilan j.

3. Energi yang diharapkan tidak disuplai atau *Expected Energy Not Supplied* (EENS)

Expected Energy Not Supplied (EENS) didefinisikan sebagai energi yang diharapkan tidak dilayani karena *outage* sistem transmisi. Untuk level beban yang ada, energi yang tidak disuplai adalah jumlah kekurangan untuk

²⁷ General Electrical Company. *Report Reliability Indexes for Power Systems*. New York, 1981, p. 4-18.

²⁸ Ibid

masing-masing *outage* dikali probabilitas dari *outage*, dijumlahkan untuk semua *outages*.

$$EENS = \sum Z_i P_i \quad \text{MW H} \quad (2.22)^{29}$$

Dimana: Z_i = Beban yang dibatasi pada bus k selama kondisi transmisi i .

P_i = Probabilitas dimana sistem transmisi dalam kondisi i .

Kuantitas ini selanjutnya bisa dijumlah pada semua beban yang diinginkan untuk menemukan energi yang tidak dilayani per periode.

$$EENS = \sum_{k=1}^{NL} \sum_{i, k \in L} Z_i P_i \quad \text{MW H/periode} \quad (2.23)^{30}$$

Jika dinamika sistem daya dimasukkan dalam simulasi, selanjutnya indeks ini akan memiliki signifikan dinamis. Disini, prosedur LSC bisa digunakan untuk membuat matematisnya mudah dikerjakan.

4. *Bulk Power Interruption Index (BPII)*

Index ini adalah rasio beban total yang tidak disuplai pada beban puncak tahunan.

$$BPII = \frac{1}{L_{\max}} \sum_{k=1}^{NL} \left(\sum_{k \in L} P_i \sum_{j \in S} \lambda_{ij} \right) Z_i \quad \text{MW/MW-yr} \quad (2.24)^{31}$$

Dimana: L_{\max} = Beban puncak tahun ini.

²⁹ General Electrical Company. *Report Reliability Indexes for Power Systems*. New York, 1981, p. 4-18.

³⁰ Ibid.

³¹ Ibid. p.4-19.

5. *Bulk Power Energy Curtailment Index (BPECI)*

BPECI adalah sebuah perluasan dari BPII. BPECI menghubungkan energi tahunan yang tidak disuplai pada beban puncak. Ini bisa dihitung dengan menggunakan EENS.

$$BPECI = \frac{EENS}{L_{\max}} \text{ MWH/MW-yr} \quad (2.25)^{32}$$

³² General Electrical Company. *Report Reliability Indexes for Power Systems*. New York, 1981, p. 4-19.