

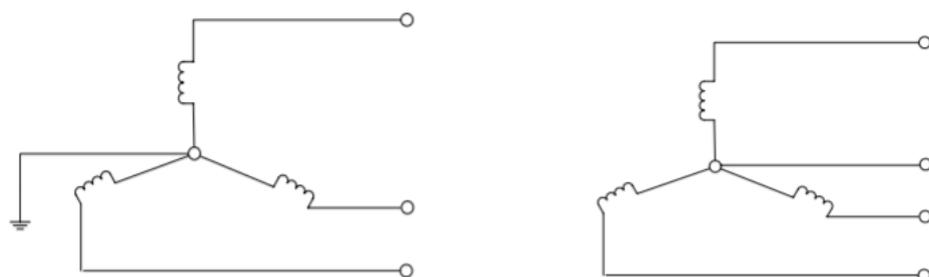
BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Saluran Transmisi

Saluran transmisi merupakan koridor yang harus dilalui dalam penyaluran energi listrik.^[1] Saluran Transmisi merupakan suatu media yang digunakan untuk mentransmisikan tenaga listrik secara besar-besaran dari Generator *Station/* Pembangkit Listrik sampai *distribution station* hingga sampai pada konsumen pengguna listrik. Tenaga listrik di transmisikan oleh suatu bahan konduktor yang mengalirkan tipe Saluran Transmisi Listrik.^[2]

Pada sistem tenaga listrik, jarak antara pembangkit dengan beban yang cukup jauh dapat menimbulkan adanya penurunan kualitas pada tegangan yang diakibatkan pada saluran yang mengalami drop tegangan. Dengan demikian sebuah saluran transmisi harus memiliki berbagai komponen untuk menjaga kestabilan kualitas listrik hingga sampai kepada konsumen. Berdasarkan arus yang dialirkan terdapat dua jenis saluran transmisi yang dapat digunakan yaitu saluran transmisi arus bolak-balik (*AC*) dan saluran transmisi arus searah (*DC*). Arus bolak-balik dapat digunakan dengan sistem tiga-fasa-tiga-kawat atau dengan sistem tiga-fasa-empat-kawat seperti pada gambar 2.1 dibawah ini :



a. Sistem tiga-fasa-tiga-kawat

b. Sistem tiga-fasa-empat-kawat

Gambar 2.1 Saluran Transmisi

¹ Joko P., Montario C.B., dan Zamrudi, "Transmission of Electrical Energy (Transmisi Tenaga Listrik)", Depok: Departemen Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Indonesia, 2010.

² E-Learning Sistem Tenaga Listrik, diakses dari <https://kelasonlineblog.wordpress.com/> pada tanggal 21 November pukul 9.45

Terdapat beberapa jenis saluran transmisi yang digunakan dalam sistem tenaga:^[3]

1. Berdasarkan pemasangannya, saluran transmisi dibagi menjadi tiga kategori, yaitu:

a. Saluran udara (*overhead lines*)

Saluran transmisi yang menyalurkan energi listrik melalui kawat-kawat yang digantung pada isolator antar menara atau tiang transmisi. Keuntungan dari saluran transmisi udara adalah lebih murah, mudah dalam perawatan, mudah dalam mengetahui letak gangguan, mudah dalam perbaikan, dan lainnya. Namun juga memiliki kerugian, antara lain: karena berada di ruang terbuka, maka cuaca sangat berpengaruh terhadap keandalannya, dengan kata lain mudah terjadi gangguan, seperti gangguan hubung singkat, gangguan tegangan lebih karena tersambar petir, dan gangguan-gangguan lainnya. Dari segi estetika/keindahan juga kurang, sehingga saluran transmisi bukan pilihan yang ideal untuk suatu saluran transmisi didalam kota.

b. Saluran kabel tanah (*underground cable*)

Saluran transmisi merupakan saluran yang menyalurkan energi listrik melalui kabel yang dipendam didalam tanah. Hal ini menjadi *favorite* dalam pemasangan saluran transmisi di dalam kota, karena salurannya berada di dalam tanah dan tidak mengganggu keindahan kota serta tidak mudah terjadi gangguan yang diakibatkan oleh kondisi cuaca atau kondisi alam. Namun, hal ini juga memiliki kekurangan, yaitu tingginya biaya investasi dan sulitnya dalam menentukan titik gangguan serta dalam melakukan perbaikannya.

c. Saluran Isolasi Gas

Saluran Isolasi Gas (*Gas Insulated Line/GIL*) merupakan saluran yang memiliki isolasi berupa gas, misalnya: gas SF₆. Saluran isolasi gas jarang digunakan, karena mahal dan risiko terhadap lingkungan sangat tinggi.

³ Joko P, Op.cit hal.8



2. Berdasarkan arus listrik, maka saluran transmisi terdiri dari :
 - a. Saluran transmisi *AC*

Dalam sistem *AC*, kenaikan dan penurunan tegangannya sangat mudah dilakukan dengan bantuan transformator dan juga memiliki 2 sistem, sistem fasa tunggal dan sistem fasa tiga.
 - b. Saluran transmisi *DC*

Dalam saluran transmisi *DC*, daya guna atau efisiensinya tinggi karena mempunyai faktor daya = 1, tidak memiliki masalah terhadap stabilitas terhadap sistem, sehingga dimungkinkan untuk penyaluran jarak jauh dan memiliki isolasi yang lebih sederhana.
3. Berdasarkan klasifikasi tegangannya, maka saluran transmisi terdiri dari :^[4]
 - a. Saluran Udara Tegangan Ekstra Tinggi (SUTET) 200 KV – 500 KV
 - 1) Pada umumnya digunakan pada pembangkitan dengan kapasitas di atas 500 MW.
 - 2) Tujuannya adalah agar drop tegangan dan penampang kawat dapat direduksi secara maksimal, sehingga diperoleh operasional yang efektif dan efisien.
 - 3) Permasalahan mendasar pembangunan SUTET adalah: konstruksi tiang (*tower*) yang besar dan tinggi, memerlukan tapak tanah yang luas, memerlukan isolator yang banyak, sehingga pembangunannya membutuhkan biaya yang besar.
 - 4) Masalah lain yang timbul dalam pembangunan SUTET adalah masalah sosial, yang akhirnya berdampak pada masalah pembiayaan, antara lain: Timbulnya protes dari masyarakat yang menentang pembangunan SUTET, Permintaan ganti rugi tanah untuk tapak *tower* yang terlalu tinggi tinggi, Adanya permintaan ganti rugi sepanjang jalur SUTET dan lain sebagainya.
 - 5) Pembangunan transmisi ini cukup efektif untuk jarak 100 km sampai dengan 500 km.

⁴ Anto Supri, "Klasifikasi Saluran Transmisi Berdasarkan Tegangan", diakses dari <http://blog.unnes.ac.id/antosupri/klasifikasi-saluran-transmisi-berdasarkan-tegangan/>, pada tanggal 21 November 2019 pukul 20.07



b. Saluran Udara Tegangan Tinggi (SUTT) 30 KV – 150 KV

- 1) Tegangan operasi antara 30 KV sampai dengan 150 KV.
- 2) Konfigurasi jaringan pada umumnya *single* atau *double* sirkuit, dimana 1 sirkuit terdiri dari 3 fasa dengan 3 atau 4 kawat. Biasanya hanya 3 kawat dan penghantar netralnya digantikan oleh tanah sebagai saluran kembali.
- 3) Apabila kapasitas daya yang disalurkan besar, maka penghantar pada masing-masing fasa terdiri dari dua atau empat kawat (*Double* atau *Quadrupole*) dan Berkas konduktor disebut *Bundle Conductor*. Jika transmisi ini beroperasi secara parsial, jarak terjauh yang paling efektif adalah 100 km.
- 4) Jika jarak transmisi lebih dari 100 km maka tegangan jatuh (*drop voltage*) terlalu besar, sehingga tegangan diujung transmisi menjadi rendah.
- 5) Untuk mengatasi hal tersebut maka sistem transmisi dihubungkan secara ring sistem atau *interconnection* sistem. Ini sudah diterapkan di Pulau Jawa dan akan dikembangkan di Pulau-pulau besar lainnya di Indonesia.

c. Saluran Kabel Tegangan Tinggi (SKTT) 30 KV – 150 KV

SKTT dipasang di kota-kota besar di Indonesia (khususnya di Pulau Jawa), dengan beberapa pertimbangan :

- 1) Di tengah kota besar tidak memungkinkan dipasang SUTT, karena sangat sulit mendapatkan tanah untuk tapak *tower*.
- 2) Untuk ruang bebas juga sangat sulit dan pasti timbul protes dari masyarakat, karena padat bangunan dan banyak gedung-gedung tinggi.
- 3) Adanya permintaan dan pertumbuhan beban yang sangat tinggi.

Jenis kabel yang digunakan:

- 1) Kabel yang berisolasi (berbahan) *Poly Ethelene* atau kabel jenis *Cross Link Poly Ethelene (XLPE)*.
- 2) Kabel yang isolasinya berbahan kertas yang diperkuat dengan minyak (*oil paper impregnated*).

Inti (*core*) kabel dan pertimbangan pemilihan:

- 1) *Single core* dengan penampang $240 \text{ mm}^2 - 300 \text{ mm}^2$ tiap *core*.
 - 2) *Three core* dengan penampang $240 \text{ mm}^2 - 800 \text{ mm}^2$ tiap *core*.
 - 3) Pertimbangan fabrikasi.
 - 4) Pertimbangan pemasangan di lapangan.
- d. Saluran Udara Tegangan Menengah (SUTM) 6 KV – 30 KV
- Di Indonesia, pada umumnya tegangan operasi pada SUTM adalah 6 KV dan 20 KV. Namun secara berangsur-angsur untuk tegangan operasi 6 KV dihilangkan dan saat ini hampir semuanya menggunakan tegangan operasi 20 KV.
- 1) Transmisi SUTM digunakan untuk jaringan tingkat tiga, yaitu jaringan distribusi yang menghubungkan dari Gardu Induk, Penyulang (*Feeder*), SUTM, Gardu Distribusi, sampai dengan ke Instalasi Pemanfaatan (Pelanggan/ Konsumen).
 - 2) Berdasarkan sistem pentanahan titik netral trafo, efektifitas penyalurannya hanya pada jarak (panjang) antara 15 km sampai dengan 20 km. Jika transmisi lebih dari jarak tersebut, efektifitasnya menurun, karena *relay* pengaman tidak bisa bekerja secara selektif. Dengan mempertimbangkan berbagai kondisi yang ada (kemampuan likuiditas atau keuangan, kondisi geografis dan lain-lain) transmisi SUTM di Indonesia melebihi kondisi ideal di atas.
- e. Saluran Kabel Tegangan Menengah (SKTM) 6 KV – 20 KV
- Ditinjau dari segi fungsinya, transmisi SKTM memiliki fungsi yang sama dengan transmisi SUTM. Hanya ada perbedaan mendasar yaitu, SKTM yang ditanam di dalam tanah.



Beberapa pertimbangan pembangunan transmisi SKTM adalah:

- 1) Kondisi setempat yang tidak memungkinkan dibangun SUTM.
- 2) Kesulitan mendapatkan ruang bebas (*ROW*), karena berada di tengah kota dan pemukiman padat.
- 3) Pertimbangan segi estetika.

Beberapa hal yang perlu diketahui:

- 1) Pembangunan transmisi SKTM lebih mahal dan lebih rumit, karena harga kabel yang jauh lebih mahal dibanding penghantar udara dan dalam pelaksanaan pembangunan harus melibatkan serta berkoordinasi dengan banyak pihak.
 - 2) Pada saat pelaksanaan pembangunan transmisi SKTM sering menimbulkan masalah, khususnya terjadinya kemacetan lalu lintas.
 - 3) Jika terjadi gangguan, penanganan (perbaikan) transmisi SKTM relatif sulit dan memerlukan waktu yang lebih lama jika dibandingkan SUTM.
 - 4) Hampir seluruh (sebagian besar) transmisi SKTM telah terpasang di wilayah PT. PLN (Persero) Distribusi DKI Jakarta & Tangerang.
- f. Saluran Udara Tegangan Rendah (SUTR) 40 Volt – 1000 Volt

Transmisi SUTR adalah bagian hilir dari sistem tenaga listrik pada tegangan distribusi di bawah 1000 Volt, yang langsung memasok kebutuhan listrik tegangan rendah ke konsumen. Di Indonesia, tegangan operasi transmisi SUTR saat ini adalah 220/ 380 Volt.

Radius operasi jaringan distribusi tegangan rendah dibatasi oleh:

- 1) Susut tegangan yang disyaratkan.
- 2) Luas penghantar jaringan.
- 3) Distribusi pelanggan sepanjang jalur jaringan distribusi.
- 4) Sifat daerah pelayanan (desa, kota, dan lain-lain).
- 5) Susut tegangan yang diijinkan adalah + 5% dan – 10 %, dengan radius pelayanan berkisar 350 meter.

Saat ini transmisi SUTR pada umumnya menggunakan penghantar *Low Voltage Twisted Cable (LVTC)*.

g. Saluran Kabel Tegangan Rendah (SKTR) 40 Volt – 1000 Volt

Ditinjau dari segi fungsi, transmisi SKTR memiliki fungsi yang sama dengan transmisi SUTR. Perbedaan mendasar adalah SKTR di tanam didalam di dalam tanah. Jika menggunakan SUTR sebenarnya dari segi jarak aman/ ruang bebas (*ROW*) tidak ada masalah, karena SUTR menggunakan penghantar berisolasi.

4. Berdasarkan Panjang Saluran

Saluran transmisi dapat dikategorikan menjadi tiga jenis berdasarkan panjang salurannya, antara lain:

1) Saluran Pendek

Saluran pendek memiliki panjang saluran kurang dari 80 km.

2) Saluran Menengah

Saluran menengah memiliki panjang saluran di antara 80 km sampai dengan 250 km.

3) Saluran Panjang

Saluran panjang memiliki panjang saluran lebih dari 250 km.

2.2. Tegangan Transmisi

Tegangan transmisi yang ditinggikan menyebabkan nilai daya yang sama, daya guna atau efisiensi penyaluran akan naik, karena nilai daya transmisi yang turun. Kenaikan nilai tegangan pada transmisi juga berarti kenaikan nilai isolasi, biaya peralatan dan biaya gardu induk. Oleh karena itu, pemilihan pada tegangan transmisi dilakukan dengan cara memperhitungkan nilai daya yang disalurkan, keandalan (*reliability*), jumlah rangkaian, jarak penyaluran, biaya peralatan untuk tegangan tertentu, dan tegangan-tegangan yang sekarang sudah ada dan yang akan direncanakan. Penentuan tegangan harus dilihat juga dari segi standarisasi peralatan yang ada. Penentuan tegangan merupakan bagian dari perencanaan sistem secara keseluruhan.

Meskipun tidak jelas menyebutkan keperluannya sebagai tegangan transmisi, di Indonesia pemerintah telah menyeragamkan seretan tegangan tinggi sebagai berikut:^[5]

1. Tegangan nominal sistem (kV)
2. (30) – 66 – 110 – (150) – 220 – 380 – 500
3. Tegangan tertinggi untuk perlengkapan :
4. (36) – 72,5 – 123 – (170) – 245 – 420 – 525

2.3. Generator

Generator memproduksi energi listrik dari sumber energi mekanik, biasanya dengan menggunakan induksi elektromagnetik. Proses ini dikenal sebagai pembangkit listrik. Walau generator dan motor punya banyak kesamaan tetapi motor adalah alat yang mengubah energi listrik menjadi energi mekanik. Generator mendorong muatan listrik untuk bergerak melalui sebuah sirkuit listrik eksternal, tetapi generator tidak menciptakan listrik yang sudah ada di dalam kabel lilitannya. Rotor generator akan diputar dengan menggunakan turbin sehingga menghasilkan energi listrik.

Terdapat beberapa jenis generator berdasarkan klasifikasinya, antara lain:^[6]

1. Berdasarkan Letak Kutub

Generator dapat dikategorikan dalam dua jenis berdasarkan letak kutub, antara lain:

a. Generator Kutub Dalam

Generator jenis ini mempunyai rotor yang memiliki medan magnet di dalamnya.

b. Generator Kutub Luar

Generator jenis ini mempunyai stator yang memiliki medan magnet di dalamnya.

⁵ Cekmas Cekdin, Taufik Berlian, *Transmisi Daya Listrik* (Yogyakarta: ANDI, 2013), hlm 5

⁶ Jenni Legita, "Analisa Kontigensi Saluran Transmisi dengan Menggunakan Indeks Performa Tegangan (PIV) dan Indeks Performa Daya Aktif (PIMW)", Skripsi S1 Teknik Elektro, UNILA, 2018, hlm.10



2. Berdasarkan Putaran Medan

Generator dapat dikategorikan dalam dua jenis berdasarkan letak kutub, antara lain:

a. Generator Sinkron

Generator jenis ini menghasilkan medan magnet pada stator kemudian akan membangkitkan energi listrik pada kumparan rotornya. Volt sampai dengan 1000 Volt.

b. Generator Asinkron

Generator jenis ini memiliki bagian rotor yang akan digerakkan lebih cepat dibandingkan bagian sinkron sehingga menghasilkan slip negatif.

3. Berdasarkan Jenis Arus

a. Generator AC

Generator AC akan menghasilkan gaya gerak listrik induksi bolak balik atau *alternating current*.

b. Generator DC

Generator DC yang akan menghasilkan gaya gerak listrik induksi searah atau *direct current*.

4. Berdasarkan Jumlah Fasa

a. Generator Satu Fasa

Generator satu fasa merupakan jenis generator yang hanya memiliki satu kumparan saja.

b. Generator Tiga Fasa

Generator tiga fasa merupakan jenis generator yang memiliki tiga kumparan sehingga dapat menghasilkan tiga gelombang *sinusoidal* yang memiliki selisih sudut senilai 120 derajat.

5. Berdasarkan Bentuk Rotor

a. Generator Silindris

Generator silindris digunakan sebagai pembangkit listrik yang memiliki putaran cepat atau dengan nilai rpm tinggi.



b. Generator Kutub Menonjol

Generator kutub menonjol digunakan sebagai pembangkit listrik yang memiliki dengan putaran lambat atau dengan nilai rpm yang rendah.

2.4. Analisa Aliran Daya

Analisa kontingensi dengan metode aliran daya digunakan untuk mengetahui pengaruh gangguan yang terjadi pada sistem tenaga listrik baik gangguan yang terjadi merupakan gangguan tunggal (*single contingencies*) atau gangguan jamak (*multiple contingencies*) pada saluran transmisi terhadap besarnya tegangan pada bus dan sudut fasa tegangan, serta perubahan aliran daya pada sistem tenaga listrik dengan perhitungan dan kecepatan komputasi yang baik.^[7] Aliran daya akan memberikan gambaran mengenai kondisi operasi *steady state* pada sebuah sistem tenaga listrik. Selain itu, aliran daya juga dapat dijadikan sebagai batasan sebuah operasi dinamis sebuah sistem tenaga listrik. Setelah dilakukan analisa aliran daya maka akan didapatkan informasi mengenai tegangan, sudut fasa, daya aktif, dan daya reaktif sebuah sistem tenaga listrik.

Klasifikasi bus pada analisa aliran daya terbagi menjadi:^[8]

1. *Slack Bus*

Slack bus dalam sebuah sistem hanya satu, dimana besar dan sudut tegangan diketahui/ditentukan. Daya aktif dan reaktifnya tidak diketahui. *Bus* yang dipilih sebagai *slack bus* harus mempunyai sumber daya aktif dan reaktif. Hal ini karena daya yang diinjeksikan ke *bus* ini harus bisa “berubah-ubah” agar didapat solusi dalam STL. Pilihan terbaik untuk *slack bus* memerlukan pengalaman dalam sistem yang dianalisa (biasanya ada lebih dari satu bus yang memiliki sumber daya aktif dan reaktif). Sifat dari sebuah solusi sering dipengaruhi oleh pemilihan *slack bus*.

⁷ Ahmad Hermawan, 2007, “Analisa Kontingensi Pada Sistem Tenaga Listrik dengan Metode Aliran Daya”, *Jurnal ELTEK*, Volume 05 Nomor 01, April 2007 ISSN 1693-4024.

⁸ Imaduddin, “Klasifikasi Bus” diakses dari <https://imadudd1n.wordpress.com/2009/09/06/klasifikasi-bus/>, pada tanggal 21 November 2019 pukul 20.48



Slack bus juga dikenal sebagai *Reference bus*. Artinya, bus lain dibandingkan propertinya terhadap *reference bus* ini. Karena inilah, salah satu tips untuk memulai perhitungan *load flow*, biasanya dilakukan dengan memberi nilai tegangan dan besar sudutnya dengan $1\angle 0$ p.u. , atau yang disebut sebagai *flat start*. *Flat start* akan dilakukan dengan asumsi, nilai tegangan dan sudut pada bus lain yang akan dicari, nilainya tidak akan jauh-jauh dari $1\angle 0$ p.u.

2. Voltage Controlled Bus (P-V Bus)

Sembarang *bus* yang besar tegangan dan daya aktif yang diinjeksikan telah ditentukan, dikelompokkan sebagai *bus* yang tegangannya dikendalikan (P-V Bus).^[11] Pada *bus* ini juga mempunyai kendala untuk daya semu (Q) yang melalui *bus*, bila kendala ini di dalam perhitungan integritasnya tak dapat dipenuhi, maka bus ini diganti dengan *bus* beban, sebaliknya apabila daya memenuhi kendala maka, akan dihitung sebagai *bus control* tegangan kembali. Selain itu, daya reaktif yang diinjeksikan ke dalam bus ini bersifat variabel, yang artinya dapat berubah-ubah dalam batas tertentu (batas atas dan batas bawah). P-v Bus harus memiliki sumber daya reaktif variabel, yaitu contohnya terhubung dengan generator.

3. Load Bus (P-Q Bus)

Load bus diartikan sebagai sembarang *bus* yang beban daya aktif dan reaktifnya diketahui. *Load bus* dapat memiliki generator yang keluaran daya aktif dan reaktifnya diketahui. Namun demikian, lebih enak jika kita menyebutkan sembarang *bus* yang diinjeksi daya kompleks yang ditentukan sebagai *load bus*. Parameter-parameter yang diketahui dari beban adalah P dan Q dengan V dan S selama perhitungan aliran daya akan tetap tidak berubah.

Tiap-tiap bus mendapat 4 besaran, yaitu :

- a. Daya aktif P
- b. Daya reaktif Q
- c. Nilai saklar tegangan (V)
- d. Sudut fasa tegangan θ

Tujuan studi aliran daya dalam analisis kontingensi adalah :^[9]

1. Mengetahui apakah sistem beroperasi secara handal dan ekonomis pada tingkat tegangan dan frekuensi yang dipertahankan dalam batas-batas yang telah ditentukan.
2. Mengetahui bahwa komponen-komponen sistem seperti generator dan saluran transmisi tidak beroperasi pada kondisi beban lebih yang terus-menerus.
3. Membantu dalam melakukan studi kontingensi jika saluran transmisi mengalami gangguan dan keluar dari sistem, yang berakibat pada perubahan tegangan pada bus-bus yang terkait dan kemungkinan pembebanan berlebih pada saluran transmisi yang dapat menyebabkan pemadaman bertingkat yang berakhir dengan pemadaman total.

Tabel 2.1. Tipe-Tipe *Bus*^[10]

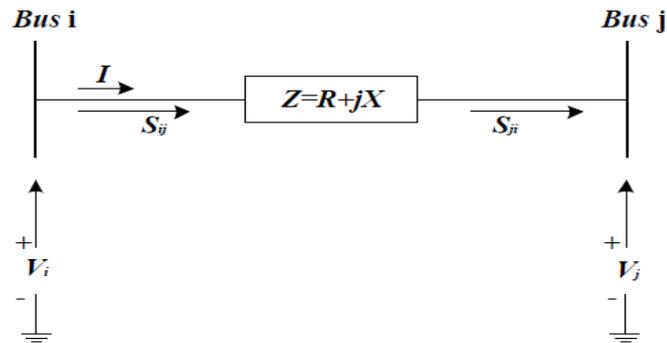
Variabel Tipe Bus	V	θ	P	Q
<i>Load</i>	?	?	✓	✓
<i>Generator</i>	✓	?	✓	?
<i>Slack</i>	✓	✓	?	?

⁹ Syafii dan Nurul Rahmawati, 2012. "Analisis Kontingensi Sistem Tenaga Listrik dengan Metode Bounding", Jurnal Rekayasa Elektrika Vol 10, No. 2

¹⁰ Jenni Legita, Op.cit, hlm 13

2.4.1 Perhitungan Aliran Daya Diagram Satu Garis dan Sistem Per Unit

a. Daya Kompleks Pada Saluran Transmisi Seimbang^[11]



Gambar 2.2 Diagram Garis Tunggal Saluran Transmisi

Gambar 2.2 Merupakan penggambaran suatu kondisi sebuah saluran transmisi dalam keadaan pendek seimbang yang menghubungkan antara bus i dan j dengan sebuah asumsi tegangan antara saluran ke netral pada setiap bus sebesar V_i dan V_j dan memiliki impedansi saluran adalah Z pada setiap fasanya.

Daya kompleks per fasa yang dikirim dari bus j ke bus i dapat dinyatakan sebagai:

$$S_{ij} = P_{ij} + jQ_{ij} = V_i I^* \dots\dots\dots (2.1)$$

Dengan cara yang sama daya kompleks yang dikirim dari bus j ke bus I :

$$S_{ij} = P_{ij} + jQ_{ij} = V_i (-I) \dots\dots\dots (2.2)$$

Dan arus pada saluran adalah:

$$I = \frac{V_i - V_j}{Z} \dots\dots\dots (2.3)$$

Keterangan:

- S_{ij} = Daya kompleks saluran antara bus i dan bus j
- S_{ji} = Daya kompleks saluran antara bus j dan bus i
- P_{ij} = Daya aktif saluran antara bus i dan bus j
- P_{ji} = Daya aktif saluran antara bus j dan bus i
- Q_{ij} = Daya reaktif saluran antara bus i dan bus j

¹¹ Cekmas Cekdin, Taufik Berlian, Op.cit hal 43



Q_{ji} = Daya reaktif saluran antara bus j dan bus i

V_i = Tegangan bus i

V_j = Tegangan bus j

I = Arus yang mengalir pada saluran

Z = Impedansi saluran

Substitusikan persamaan (1) dan (2) dengan (3) diperoleh:

$$S_{ij} = V_i \frac{V_i^* - V_j^*}{Z^*} \dots\dots\dots (2.4)$$

$$S_{ij} = \frac{|V_i|^2 - |V_i||V_j| \cos(\theta_i - \theta_j)}{R + jX} \dots\dots\dots (2.5)$$

Dan

$$S_{ji} = V_j \frac{V_j^* - V_i^*}{Z^*} \dots\dots\dots (2.6)$$

$$S_{ji} = \frac{|V_j|^2 - |V_i||V_j| \cos(\theta_j - \theta_i)}{R + jX} \dots\dots\dots (2.7)$$

Sudut fasa tegangan antara kedua bus dituliskan dalam persamaan:

$$\alpha = \theta_i - \theta_j \dots\dots\dots (2.8)$$

Sehingga, persamaan daya aktif dan reaktif adalah

$$P_{ij} = \frac{1}{R^2 + X^2} (R|V_i|^2 - R|V_i||V_j|) \cos \gamma + X|V_i||V_j| \sin \gamma \dots\dots\dots (2.9)$$

$$Q_{ij} = \frac{1}{R^2 + X^2} (X|V_i|^2 - X|V_i||V_j|) \cos \gamma - R|V_i||V_j| \sin \gamma \dots\dots\dots (2.10)$$

Untuk

$$P_{ij} = \frac{1}{R^2 + X^2} (R|V_i|^2 - R|V_i||V_j|) \cos \gamma - X|V_i||V_j| \sin \gamma \dots\dots\dots (2.11)$$

$$Q_{ij} = \frac{1}{R^2 + X^2} (X|V_i|^2 - X|V_i||V_j|) \cos \gamma + R|V_i||V_j| \sin \gamma \dots\dots\dots (2.12)$$

Nilai reaktansi saluran transmisi akan dianggap sama dengan nol karena nilainya jauh lebih kecil daripada nilai impedansi saluran.

Sehingga persamaan (2.9) dan persamaan (2.10) berubah menjadi:

$$P_{ij} = \frac{|V_i||V_j|}{X} \sin \gamma \dots\dots\dots (2.13)$$

$$Q_{ij} = \frac{1}{X} (|V_i|^2 - |V_i||V_j|) \cos \gamma \dots\dots\dots (2.14)$$



Dan

$$P_{ji} = \frac{|V_i| |V_j|}{X} \sin \gamma = - P_{ij} \dots\dots\dots (2.15)$$

$$Q_{ji} = \frac{1}{x} (|V_j|^2 - |V_i| |V_j|) \cos \gamma \dots\dots\dots (2.16)$$

b. Metode *Newton-Raphson*

Grainger dan Stevenson memperkenalkan analisa kontingensi dengan aliran daya menggunakan metode *Newton-Raphson bus* untuk menyelesaikan analisa kontingensi tunggal (*single contingencies*) dan kontingensi jamak (*multiple contingencies*) pada saluran transmisi terhadap perubahan tegangan *bus* dan sudut fasa tegangan dan dapat menyelesaikan dengan memuaskan komputasi numeris analisa kontingensi pada sistem tenaga listrik.^[12] Metode *Newton-Raphson* banyak digunakan untuk melakukan analisa aliran daya sebuah sistem tenaga listrik karena memiliki karakteristik konvergen dominan dibandingkan dengan metode aliran beban yang tersisa.

Metode *Newton-Raphson* memiliki perhitungan yang lebih sedikit. Metode ini dapat digunakan untuk mengukur nilai tegangan, arus, daya aktif dan daya reaktif pada *bus* yang berbeda. Metode ini sangat cocok apabila digunakan untuk permasalahan aliran daya, khususnya untuk sistem tenaga yang cukup besar karna apabila ingin mencapai nilai konvergensi yang ditempuh dalam waktu yang cukup singkat jika dibandingkan dengan metode aliran daya lainnya.

Persamaan arus injeksi untuk saluran *i*:^[13]

$$I_i = \sum_{j=1}^n Y_{ij} V_j = \sum_{j=1}^n |Y_{ij}| |V_j| \angle \theta_{ij} + \delta_j \dots\dots\dots (2.17)$$

Keterangan:

- n* = Jumlah *bus*
- Y_{ij}* = Admitansi antara saluran *i* dan *j*
- V_j* = Tegangan pada *bus j*
- θ_{ij}* = Sudut admitansi antara saluran *i* dan *j*
- δ_j* = Sudut tegangan pada *bus j*

¹² Ahmad Hermawan, 2007, "Analisa Kontingensi Pada Sistem Tenaga Listrik dengan Metode Aliran Daya", *Jurnal ELTEK*, Volume 05 Nomor 01, April 2007 ISSN 1693-4024.

¹³ Cekmas Cekdin, Taufik Berlian, Op.cit hal 44



Persamaan injeksi daya aktif dan reaktif:

$$P_i - jQ_i = V_i^* I_i \dots\dots\dots (2.18)$$

Keterangan:

- P_i = Daya aktif yang diinjeksi dari bus i menuju sistem tenaga listrik
- Q_i = Daya reaktif yang diinjeksi dari bus i menuju sistem tenaga listrik
- V_i = Tegangan pada bus i

Apabila dibagi menjadi persamaan *real* dan imajiner maka:

$$P_i = \sum_{j=1}^n |V_i| |V_j| |Y_{ij}| \cos(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \dots\dots\dots (2.19)$$

$$Q_i = - \sum_{j=1}^n |V_i| |V_j| |Y_{ij}| \sin(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \dots\dots\dots (2.20)$$

Keterangan :

- P_i = Persamaan daya aktif
- Q_i = Persamaan daya imajiner

Persamaan daya aktif dan reaktif untuk sebuah sistem tenaga listrik multi bus:

$$P_i^{(k)} = \sum_{j=1}^n |V_i^{(k)}| |V_j^{(k)}| |Y_{ij}| \cos(\theta_{ij} - \delta_i^{(k)} + \delta_j^{(k)}) \dots\dots\dots (2.21)$$

$$Q_i^{(k)} = \sum_{j=1}^n |V_i^{(k)}| |V_j^{(k)}| |Y_{ij}| \sin(\theta_{ij} - \delta_i^{(k)} + \delta_j^{(k)}) \dots\dots\dots (2.22)$$

Persamaan-persamaan di atas ialah perhitungan awal yang dilakukan dalam melakukan perhitungan aliran daya. Perhitungan aliran daya dapat diselesaikan dengan menggunakan proses iterasi (k+1) dengan nilai k = 0 untuk iterasi yang pertama. Nilai ini dapat diidentifikasi sebagai nilai estimasi pertama yang telah ditetapkan sebelum melakukan perhitungan aliran daya.

Hasil perhitungan tersebut dapat digunakan sebagai elemen matriks *Jacobian* pada persamaan:

$$\begin{bmatrix} \Delta P_2^{(k)} \\ \vdots \\ \Delta P_n^{(k)} \\ \Delta Q_2^{(k)} \\ \vdots \\ \Delta Q_n^{(k)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_2^{(k)}}{\partial \delta_2} & \dots & \frac{\partial P_2^{(k)}}{\partial \delta_2} & \frac{\partial P_2^{(k)}}{\partial |V_2|} & \dots & \frac{\partial P_2^{(k)}}{\partial |V_n|} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \dots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial P_n^{(k)}}{\partial \delta_2} & \dots & \frac{\partial P_n^{(k)}}{\partial \delta_n} & \frac{\partial P_n^{(k)}}{\partial |V_2|} & \dots & \frac{\partial P_n^{(k)}}{\partial |V_n|} \\ \frac{\partial Q_2^{(k)}}{\partial \delta_2} & \dots & \frac{\partial Q_2^{(k)}}{\partial \delta_2} & \frac{\partial Q_2^{(k)}}{\partial |V_2|} & \dots & \frac{\partial Q_2^{(k)}}{\partial |V_n|} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial Q_n^{(k)}}{\partial \delta_2} & \dots & \frac{\partial Q_n^{(k)}}{\partial \delta_n} & \frac{\partial Q_n^{(k)}}{\partial |V_2|} & \dots & \frac{\partial Q_n^{(k)}}{\partial |V_n|} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta_2^{(k)} \\ \vdots \\ \Delta \delta_n^{(k)} \\ \Delta [V_n^{(k)}] \\ \vdots \\ \Delta [V_n^{(k)}] \end{bmatrix} \dots\dots\dots (2.23)$$

Dapat dilihat bahwa terdapat hubungan antara perubahan daya dengan perubahan besar tegangan dan sudut fasa.

Secara sederhananya , persamaan (2.21) dapat dituliskan menjadi:

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

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \partial P / \partial \delta & \partial P / \partial |V| \\ \partial Q / \partial \delta & \partial Q / \partial |V| \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta |V| \end{bmatrix} \dots\dots\dots (2.25)$$

Elemen matriks *Jacobian* J1:

$$\frac{\partial P_i^{(k)}}{\partial \delta_i} = \sum_{j \neq i} |V_i^{(k)}| |V_j^{(k)}| |Y_{ij}| \sin (\theta_{ij} - \delta_i^{(k)} + \delta_j^{(k)}) \dots\dots\dots (2.26)$$

$$\frac{\partial P_i^{(k)}}{\partial \delta_i} = - |V_i^{(k)}| |V_j^{(k)}| |Y_{ij}| \sin (\theta_{ij} - \delta_i^{(k)} + \delta_j^{(k)}) \dots\dots\dots (2.27)$$

Elemen matriks *Jacobian* J2

$$\frac{\partial P_i^{(k)}}{\partial |V_i|} = 2 |V_i^{(k)}| |Y_{ij}| \cos \theta_{ij} + \sum_{j \neq i} |V_j^{(k)}| |Y_{ij}| \cos (\theta_{ij} - \delta_i^{(k)} + \delta_j^{(k)}) \dots\dots (2.28)$$

$$\frac{\partial P_i^{(k)}}{\partial |V_i|} = |V_i^{(k)}| |Y_{ij}| \cos (\theta_{ij} - \delta_i^{(k)} + \delta_j^{(k)}) \quad j \neq i \dots\dots\dots (2.29)$$

Element matriks *Jacobian* J3:

$$\frac{\partial Q_i^{(k)}}{\partial \delta_{i1}} = \sum_{j \neq i} |V_i^{(k)}| |V_j^{(k)}| |Y_{ij}| \cos (\theta_{ij} - \delta_i^{(k)} + \delta_j^{(k)}) \dots\dots\dots (2.30)$$

$$\frac{\partial Q_i^{(k)}}{\partial \delta_{i1}} = - |V_i^{(k)}| |V_j^{(k)}| |Y_{ij}| \cos (\theta_{ij} - \delta_i^{(k)} + \delta_j^{(k)}) \quad j \neq i \dots\dots\dots (2.31)$$

Elemen matriks *Jacobian* J4:

$$\frac{\partial Q_i^{(k)}}{\partial \delta_{i1}} = -2 |V_i^{(k)}| |Y_{ij}| \cos \theta_{ij} + \sum_{j \neq i} |V_j^{(k)}| |Y_{ij}| \cos (\theta_{ij} - \delta_i^{(k)} + \delta_j^{(k)}) \dots\dots(2.32)$$

$$\frac{\partial Q_i^{(k)}}{\partial \delta_{i1}} = - |V_i^{(k)}| |Y_{ij}| \cos (\theta_{ij} - \delta_i^{(k)} + \delta_j^{(k)}) \dots\dots\dots (2.33)$$

Daya aktif yang didiferensialkan dengan tegangan:

$$\frac{\partial P_i}{\partial |V_i|} = 2 |V_i| |Y_{ij}| \cos \theta_{ij} + \sum_{j \neq i} |V_j| |Y_{ij}| \cos (\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \dots\dots\dots (2.34)$$

$$\frac{\partial P_i}{\partial |V_i|} = |V_i| |Y_{ij}| \cos (\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad i \neq j \dots\dots\dots (2.35)$$

Perhitungan Daya sisanya :

$$\Delta P_i^{[k]} = P_i^{sch} - P_i^{[k]} \dots\dots\dots (2.36)$$

$$\Delta Q_i^{[k]} = Q_i^{sch} - Q_i^{[k]} \dots\dots\dots (2.37)$$

Keterangan :

P_i^{sch} = Daya aktif terjadwal pada bus i

Q_i^{sch} = Daya reaktif terjadwal pada bus i

Berdasarkan persamaan daya sisa dan matriks *Jacobian* maka diperoleh persamaan untuk mencari besar tegangan (V_i) dan sudut tegangan (δ_i):

$$\delta_i^{[k+1]} = \delta_i^{[k]} + \Delta \delta_i^{[k]} \dots\dots\dots (2.38)$$

$$|V_i^{[k+1]}| = |V_i^{[k]}| + \Delta |V_i^{[k]}| \dots\dots\dots (2.39)$$

2.5. Tegangan dan Daya pada Bus

Arus yang mengalir pada aliran daya akan mengakibatkan terjadinya perubahan tegangan, baik besarnya tegangan maupun sudut fasanya. Dengan alasan inilah, maka tegangan pada bus dijaga pada batas nilai tertentu yang masih dalam batas yang telah direncanakan (pada bus beban). Pengaturan atau pengendalian tegangan pada sistem aliran daya ini dapat dilakukan dengan pengaturan sudut fasa atau daya reaktif.

Untuk mendapatkan atau mencapai suatu nilai yang mencapai nilai yang konvergen atau mempunyai indeks presisi tertentu, maka untuk perhitungan aliran daya pada dasarnya perhitungan dilakukan dengan menggunakan cara iterasi, yaitu dengan metode pendekatan coba – koreksi. Nilai konvergensi pada proses iterasi ditentukan oleh besarnya indeks presisi yang nilainya antara 0,01 hingga 0,0001 atau sesuai dengan yang dikehendaki. Jumlah iterasi menentukan besarnya presisi makin banyak jumlah iterasi yang harus dilakukan.^[14] Besarnya aliran daya yang teliti dapat dihitung dari perolehan tegangan yang telah dikoreksi, sesuai dengan presisi yang dikehendaki.

¹⁴ Lia Dahlia, "Aliran Daya Listrik" diakses dari https://www.academia.edu/20135085/aliran_daya_listrik, pada tanggal 22 November 2019 pukul 21.40

2.6. Operasi Sistem Tenaga Listrik

Operasi sistem dinyatakan berada dalam keadaan operasi yang berhasil atau memuaskan bila tercapai kondisi:^[15]

- a. Frekuensi dalam atas kisaran operasi normal (50 ± 0.2 Hz), kecuali penyimpangan dalam waktu singkat diperkenankan pada kisaran ($50 \pm 0,5$ Hz), sedangkan selama kondisi gangguan frekuensi boleh berada pada batas 47.5 Hz sampai 51.5 Hz. Tegangan di Gardu Induk berada dalam batas yang ditetapkan yaitu : Tegangan 500 kV adalah $\pm 5\%$ sedangkan Tegangan 150 kV, 70 kV, 20 kV adalah $+5\%$ dan -10% .
- b. Tingkat pembebanan saluran transmisi dipertahankan pada batas-batas yang telah ditetapkan dan tingkat pembebanan arus di semua peralatan jaringan transmisi dan gardu induk berada dalam batas *rating* normal.
- c. Konfigurasi sistem sedemikian rupa sehingga semua PMT (*circuit breaker*) jaringan transmisi mampu memutus arus gangguan yang mungkin terjadi dan mengisolir peralatan yang terganggu.

Operasi sistem tenaga listrik dapat dibagi menjadi empat keadaan operasi yaitu:

- a. Pengiriman yang optimal (*Optimal dispatch*), sistem tenaga listrik bekerja pada keadaan optimal secara ekonomis tetapi sistem tidak terjamin dalam keadaan aman.
- b. Setelah kontingensi (*Post contingency*), sistem tenaga listrik setelah kontingensi terjadi.
- c. Pengiriman yang terjamin (*Secure dispatch*), sistem tenaga listrik tidak ada kontingensi yang menyebabkan kegagalan, dengan koreksi terhadap parameter sehingga pengiriman tenaga cukup aman
- d. Keadaan terjamin setelah kontingensi (*Secure post-contingency*), sistem tenaga listrik setelah kontingensi terjadi dan sistem beroperasi dengan normal.

¹⁵ A.N. Afandi, ST, MT, METF, "Sistem Tenaga Listrik" diakses dari https://www.academia.edu/12186478/SISTEM_TENAGA_LISTRIK, pada tanggal 22 November 2019 pukul 22.07

Sistem tenaga listrik memiliki sifat dinamis dikarenakan memiliki parameter tegangan, kuat arus, dan aliran daya yang dapat berubah-ubah sesuai dengan komponen yang terpasang pada sistem tenaga listrik tersebut. Komponen sebuah tenaga listrik terbagi menjadi tiga bagian yaitu, pembangkitan, penyaluran, dan

Terdapat beberapa kondisi yang terjadi pada komponen-komponen tersebut, antara lain:^[16]

a. Komponen Pembangkitan

Pada komponen pembangkitan dapat terjadi ketidaksesuaian antara daya yang dialirkan *bus* tegangan dengan *rating* sistem tenaga listrik.

b. Komponen Penyaluran

Pada komponen penyaluran dapat terjadi kesalahan berupa aliran daya yang menuju beban dialirkan melalui saluran transmisi yang tidak semestinya.

c. Komponen Beban

Pada komponen beban dapat terjadi kondisi pembebanan yang melebihi kapasitas yang dimiliki sehingga menyebabkan terjadinya kenaikan kuat arus yang mengalir pada sistem tenaga listrik.

Ketiga komponen tersebut telah dirancang sehingga dapat dilepas dan dipasang sesuai dengan kondisi yang dibutuhkan pada sebuah sistem tenaga listrik.

Berdasarkan alasannya maka terdapat dua jenis dari pelepasan komponen tersebut:

a. *Forced Outage* (Pelepasan langsung/paksa)

Merupakan suatu kejadian atau terjadinya suatu gangguan yang berada dalam kondisi darurat dimana dilepas paksa yaitu pelepasan yang dilakukan secara langsung. Gangguan yang terjadi bisa disebabkan dari gangguan luar maupun gaguan dari dalam. Karena sistem pembangkit berhubungan dengan kerusakan komponen, maka perlunya perlepasan paksa atau dilepas dengan segera, baik secara manual oleh operator maupun secara otomatis.

¹⁶ “Bab II, Tinjauan Pustaka dan Dasar Teori” diakses dari <http://repository.umy.ac.id/bitstream/handle/123456789/28907/F.%20BAB%20II.pdf?sequence=6&isAllowed=y>, diakses pada tanggal 22 November pukul 22.24

b. *Schedule Outage* (Pelepasan Terencana/terjadwal)

Merupakan suatu kegiatan dimana sistem dilepas saat adanya keperluan annual inspection, pemeliharaan peralatan skala besar, atau gangguan pada peralatan. Kegiatan ini sudah terjadwal sebelumnya dan dilaksanakan ketika memasuki jadwal tersebut.

2.7. Analisa Kontingensi

Analisa kontingensi adalah studi pelepasan elemen jaringan seperti saluran transmisi, trafo dan generator, dan hasilnya adalah efek yang ditimbulkan pasca kontingensi terhadap aliran daya dan tegangan bus pada sistem.^[17] Analisa kontingensi adalah komponen yang berfungsi untuk pengujian sistem keamanan dan merupakan kelanjutan hasil program *load flow*, yang berfungsi untuk mempertimbangkan berbagai kondisi yang mungkin terjadi dalam sistem di masa yang akan datang dengan pengoperasian sistem untuk mengatasi terjadinya kasus-kasus yang ditimbulkan oleh kontingensi saluran transmisi.

Analisa ini digunakan sebagai alat studi untuk analisa kejadian kontingensi secara *off-line*, dan sebagai alat *on-line* untuk menunjukkan operator bagaimana efek dari *outage* yang akan datang. Sehingga operator telah dipersiapkan untuk menghadapi *outage* dengan operasi pemulihan yang telah direncanakan sebelumnya. Penyebab terjadinya kontingensi generator ini antara lain karena adanya arus hubung singkat akibat gangguan dalam generator atau petir. Gangguan lainnya bisa berupa beban lebih pada generator.

¹⁷ Ulfa Aulia, Tiyono, Lesnanto Mulia Putranto, "Analisis Kontingensi Generator Pada Sistem Transmisi 500 kV Jawa Bali", Yogyakarta: Jurusan Teknik Elektro dan Teknologi Informasi Fakultas Teknik Universitas Gajah Mada, 2014.

Terdapat empat kondisi yang dapat menunjukkan kondisi keamanan sistem tenaga:^[18]

a. Kondisi Normal

Kondisi ini merupakan kondisi ketika sistem tenaga listrik dalam keadaan normal tanpa adanya gangguan ataupun pelepasan komponen.

b. Kondisi Setelah Kontingensi

Kondisi ini merupakan kondisi ketika sistem tenaga listrik telah mengalami pelepasan salah satu atau beberapa komponennya.

c. *Secure Dispatch*

Pada kondisi ini parameter operasi dikoreksi dengan tujuan untuk memperhitungkan pelanggaran yang terjadi terhadap keamanan sistem tenaga listrik.

d. *Secure Post-Contingency*

Kondisi ini terjadi untuk mengatasi pelanggaran terhadap sistem tenaga listrik setelah terjadi kontingensi sehingga dapat kembali ke kondisi awal operasi sistem tenaga listrik.

2.7.1 Pembagian Analisa Kontingensi

Analisa kontingensi terbagi menjadi 2, yaitu sebagai berikut:^[19]

1. Analisa Kontingensi Tunggal (*Single Contingency*)

Analisis kontingensi tunggal merupakan analisis kontingensi yang dilakukan setelah salah satu bagian sistem terputus dengan aliran listrik (*outage*), artinya tidak terjadi dua pemutusan secara bersamaan. Pemutusan bisa disebabkan oleh terlepasnya salah satu transformator, saluran, generator dari sistem ataupun terjadinya pergeseran pembangkit baik karena pemeliharaan rutin yang direncanakan, maupun terpaksa karena gangguan atau kondisi cuaca.

¹⁸ Kianfar Sorooshian, "Load Flow And Contingency Analysis In Power System". Oregon: Master of Science in Electrical Engineering Portland State University, 1984.

¹⁹ D. Kevinamarta dan T. Wrahatnolo, "Evaluasi Keandalan Sistem Tenaga Listrik Subsistem Krian-Gresik 150 kV dengan Metode Analisis Kontingensi (N-1)," *J. Tek. Elektro*, vol. 06, pp. 2–3, 2017.



2. Analisis Multi Kontingensi (*Multiple Contingency*)

Analisis multi kontingensi merupakan analisis yang dilakukan apabila terjadi dua kontingensi tunggal berturut-turut dengan menghitung perubahan arus yang mengalir ke setiap saluran dengan mengkombinasikan faktor-faktor distribusi dari kontingensi tunggal yang telah dihitung lebih dahulu pada studi kontingensi tunggal.

Setelah kontingensi terjadi, masalah sistem tenaga bisa diukur dari:^[20]

- a. Tidak sama sekali : Saat sistem tenaga dapat diseimbangkan kembali setelah kontingensi, tanpa adanya beban berlebih pada semua elemen.
- b. Keras : Saat beberapa elemen seperti saluran dan transformator menjadi terbebani lebih dan mempunyai resiko kerusakan
- c. Kritis : Saat sistem tenaga menjadi tidak stabil dan akan dengan cepat menjadi kacau

Analisa kontingensi merupakan analisa yang memperhitungkan aliran daya dengan berbagai kondisi yang dapat terjadi dengan melakukan berbagai proses kontingensi. Proses analisa ini akan digunakan sebagai parameter dalam menentukan langkah-langkah yang diambil untuk kestabilan pengoperasian sistem tenaga listrik setelah terjadinya kontingensi.

Analisa kontingensi dapat dilakukan dengan cara skenario gangguan berupa terlepasnya sebuah saluran transmisi atau generator pembangkit. Setelah dilakukan skenario gangguan tersebut, dilakukanlah penyelidikan pengaruh gangguan tersebut terhadap aliran daya sistem tenaga listrik berupa tegangan dan aliran daya aktif saluran.

²⁰ Febry Johan Palasworo, Anang Widiatoro, " Analisis Kontingensi Saluran Transmisi Pada Jaringan 150 Kv Surabaya Selatan", Surabaya : Program Studi Teknik Elektro FT, UM-Surabaya.



2.7.2 Seleksi Kontingensi

Pengelompokan saluran memerlukan suatu parameter yang dapat dipakai untuk mengidentifikasi seberapa parah pengaruh terlepasnya saluran tersebut pada sistem tenaga, hal itu dikenal sebagai seleksi kontingensi. Pengelompokan kontingensi dilakukan dengan cara menghitung tingkat keparahan dari suatu kontingensi pada saluran yang disebut sebagai performansi indeks.

Nilai performansi indeks yang didapatkan akan diurutkan dari nilai terbesar hingga terkecil.^[21] Performansi indeks adalah sebuah indeks yang digunakan untuk mengukur deviasi dari sebuah variabel sistem tenaga listrik seperti aliran daya, tegangan bus dari nilai *rating* yang telah ditentukan, serta dapat mengevaluasi kestabilan relatif dari sebuah kejadian kontingensi.

2.8. Indeks Performa (*PI*) Sistem Tenaga Listrik

Indeks performa (*PI*) merupakan sebuah indeks yang dapat digunakan untuk mengukur deviasi dari sebuah variabel sistem tenaga listrik seperti tegangan bus, dan aliran daya dari nilai *rating* yang terukur. Indeks ini juga dapat digunakan untuk mengevaluasi stabilitas relatif dari sebuah kontingensi. Terdapat 3 pilihan yang dapat digunakan sebagai opsi dalam pembuatan daftar kontingensi.

1. Indeks performa PI_V atau PI_{VQ} dengan tipe pelepasan saluran dan/atau generator
2. Indeks performa PI_p dengan tipe pelepasan saluran
3. Indeks performa PI_p dengan tipe pelepasan generator

Pada penelitian laporan akhir ini, indeks yang digunakan ialah :

1. Indeks performa daya aktif (PI_p)
2. Indeks performa tegangan (PI_V)

²¹ A. J. Wood, and B. F. Wollenberg, *POWER GENERATION, OPERATION, AND CONTROL*, Second Edi. New York: JOHN WILEY & SONS, INC, 1996.



2.8.1. Indeks Performa Daya Aktif (PI_p) Saluran Transmisi

Indeks performa daya aktif (PI_p) adalah indeks yang dapat digunakan untuk mengidentifikasi aliran daya lebih yang terjadi pada saluran transmisi. Indeks ini juga dapat membantu dalam menentukan batas *overload* pada saluran transmisi.

Persamaan indeks performa daya aktif (PI_p) :^[22]

$$PI_p = \sum_{l=1}^{N_l} \left(\frac{P_l}{P_l^{max}} \right)^{2n} \dots\dots\dots (2.40)$$

Keterangan :

PI_p = Performasi daya aktif pada saluran transmisi

P_l = Nilai daya aktif yang mengalir setelah kontingensi pada saluran l
(MW)

P_l^{max} = Nilai kapasitas daya aktif maksimum yang dapat mengalir pada saluran l
(MW)

N_l = Jumlah saluran transmisi

n = Eksponen fungsi penalty

Indeks performa daya aktif (PI_p) memiliki daya saluran yang telah dinormalkan dengan batas daya tersebut. Hal ini dapat dilakukan dengan cara mengalikan daya saluran dengan faktor atau nilai yang terkait, seperti integral yang memiliki nilai yang sama dengan nilai yang diinginkan. Nilai yang diinginkan bernilai sama dengan 1. Selain itu, koefisien ini juga dapat dipilih berdasarkan seberapa pentingnya saluran pada berbagai jenis gangguan batas operasi. Efek kesalahan *ranking* dapat diatasi dengan melakukan pemilihan bobot yang optimal untuk indeks performa. Sehingga ketika koefisien *Weighting* dan eksponen fungsi penalti bernilai sama dengan 1 maka efek kesalahan *ranking* dapat dihilangkan untuk sistem sampel yang diuji.^[23]

²² Halim Wirmen, "Analisis Kontingensi Pada Jaringan Transmisi 150kV Substems Borang", Tugas Akhir, Pekanbaru: Universitas Islam Negeri Sultan Syarif Kasim Riau. 2019

²³ Ching-Yin Lee dan Nanming Chen. Op.Cit



Persamaan P_{max} :

$$P_{max} = 0,707 \cdot V_{nom} \cdot I_{nom} \dots\dots\dots (2.41)$$

Keterangan :

I_{nom} = Arus Nominal Penghantar (A)

V_{nom} = Tegangan Nominal Penghantar (kV)

Oleh sebab itu, indeks performa daya aktif (PI_p) berbanding terbalik, yang artinya indeks performa daya aktif (PI_p) akan bernilai kecil apabila tidak ditemukannya saluran yang mengalami *overload* dan akan bernilai besar apabila terdapat saluran yang mengalami *overload*. Sehingga indeks performa (PI) sistem tenaga listrik ketika salah satu saluran dilepas didapatkan dari persamaan:

$$PI = PI_V + PI_p \dots\dots\dots (2.42)$$

Keterangan :

PI_V = Nilai indeks performa tegangan

PI_p = Nilai indeks performa daya aktif

Secara umum nilai indeks performa (PI) dapat digunakan untuk menggambarkan bagaimana kondisi sistem tenaga listrik setelah terjadi kontingensi pada salah satu komponen sistemnya. Selain itu, Indeks performa (PI) bersifat dinamis yang artinya nilainya akan berubah-ubah sesuai dengan kondisi pembebanan. Hal ini dapat digambarkan dengan melihat besar nilai indeks performa (PI). Semakin besar nilai indeks performa (PI) yang terhitung maka kondisi sistem tenaga listrik semakin buruk.



2.8.2 Indeks Performa Tegangan (PI_V) Saluran Transmisi

Indeks performa tegangan (PI_V) berfungsi agar dapat mengidentifikasi besarnya bahaya pelepasan pada saluran transmisi, sehingga stabilitas tegangan dapat tetap dipertahankan. Selain itu, Indeks ini juga dapat membantu dalam menentukan batas tegangan lebih pada bus.

Persamaan indeks performa tegangan:

$$PI_V = \sum_{i=1}^{Npq} \left| \frac{2(V_i - V_{inom})}{V_{imax} - V_{imin}} \right|^2 \dots\dots\dots (2.43)$$

Keterangan:

- V_i = Nilai tegangan setelah kontingensi pada bus i (kV)
- V_{imax} = Nilai batas tegangan maksimum (165kV)
- V_{imin} = Nilai batas tegangan minimum (135kV)
- V_{inom} = Nilai rata-rata dari V_{imax} dan V_{imin} (kV)
- Npq = Jumlah bus beban

Selisih nilai batas tegangan maksimum dan tegangan minimum yang digunakan untuk menyatakan ambang batas penyimpangan tegangan. Ketika kontingensi terjadi dan akan menyebabkan tegangan bernilai lebih kecil atau lebih besar dari tegangan operasi maka nilai indeks performa tegangan (PI_V) yang tinggi.^[24] Perubahan dari tegangan pada setiap bus dapat diinformasikan oleh nilai indeks performa tegangan (PI_V). Nilai indeks performa tegangan (PI_V) akan mengukur tingkat pelanggaran nilai profil tegangan setelah terjadinya kontingensi dari nilai batas tegangan operasi.

²⁴ Ching-Yin Lee dan Nanming Chen. Ibid



2.8.3 Pembebanan (*Loading*) Saluran Transmisi

Pembebanan dinyatakan sebagai perbandingan arus yang mengalir pada saluran l dengan arus maksimum yang diperbolehkan melaluinya (kapasitas penyaluran arus atau *ampacity*), hal ini berdasarkan pendekatan kondisi sebenarnya^[25]. dimana :

$$\text{Loading (Saluran)} = \frac{I_l}{I_{lmax}} \times 100\% \dots\dots\dots(2.44)$$

Keterangan :

I_l = Arus mengalir pada saluran (A)

I_{lmax} = Arus maksimum pada saluran l (A)

2.9 Keamanan Operasi Sistem Tenaga Listrik

Dalam operasi sistem tenaga listrik, selain upaya untuk meminimalisasi biaya operasi, faktor penting lainnya adalah menjaga keamanan (*security*) dalam operasinya.^[26] Salah satu tindakan pengamanan sistem tenaga yang amat diperlukan adalah menjaga agar saluran transmisi tidak ada yang mengalami pembebanan lebih, terutama bila terdapat satu atau beberapa elemen sistem yang terganggu. Pembebanan yang berlebih tersebut akan mengakibatkan jatuh tegangan pada elemen sistem yang bersangkutan bertambah. Akibatnya tegangan pada beberapa bus dalam sistem tenaga tersebut menurun.

Penurunan tegangan pada setiap bus harus dikontrol, agar tidak melebihi standar yang ditetapkan.^[27] Setiap perubahan parameter baik tegangan pada bus-bus maupun kuat arus pada saluran transmisi yang diakibatkan oleh terjadinya gangguan berupa kontingensi memiliki batasan-batasan atau dinamakan dengan standar operasi sistem. Adapun untuk standar operasi tegangan pada bus-bus yaitu

²⁵ Syahputra *et al.*, "Studi Analisis Kontingensi pada Jaringan Interkoneksi 150 kV Sub Sistem Aceh," vol. 2, no. 4, pp. 59–72, 2017.

²⁶ Halim Wirmen, Op.Cit

²⁷ Alen J Wood. Op.Cit

diatur oleh SPLN No 1:1995^[28] dan aturan system tenaga listrik Sumatera yaitu +10%, -10% dari tegangan nominal 150 kV. Sedangkan untuk standar operasi pembebanan jaringan transmisi tidak melebihi 50% dari arus nominal jaringan transmisi (memenuhi kriteria N-1).^[29]

Pada suatu pusat pengatur operasi (*operation control center*), upaya untuk menjaga keamanan sistem dilakukan dalam 3 tahap yaitu:^[30]

1. Pemantauan Sistem (*System Monitoring*)

Pemantauan sistem adalah identifikasi *online* dari kondisi sistem tenaga yang sebenarnya. Untuk mendapat informasi *real-time* tentang sistem, belakangan telah dikembangkan sistem yang dikombinasikan dengan sistem kontrol pengawasan yang memungkinkan operator untuk mengontrol sistem dari jarak jauh yang dinamai sistem SCADA (*Supervisory Control and Data Acquisition*). Hasil dari pemantauan ini kemudian diproses untuk memperkirakan kemungkinan yang dapat terjadi seperti pembebanan lebih atau tegangan yang berada diluar batas untuk selanjutnya dilakukan tindakan pencegahan ataupun perbaikan yang diperlukan.

2. Analisis Kontingensi (*Contingency Analysis*)

Dalam analisis ini gangguan berupa terlepasnya salah satu elemen sistem dari sebuah sistem tenaga listrik yang mungkin terjadi pada dimodelkan, sehingga bias diambil tindakan yang diperlukan jika benar-benar terjadi.

3. Analisis untuk Tindakan Pemulihan (*Corrective Action Analysis*)

Salah satu bentuk analisis ini dikenal dengan istilah SCOPF (*Security Constrained Optimal Power Flows*). Dalam SCOPF, analisis kontingensi digabungkan dengan aliran daya optimal diikuti dengan melakukan beberapa penyesuaian, sehingga tidak ada lagi pelanggaran saat terjadi gangguan. Dalam melakukan analisis keamanan, diperlukan informasi-informasi seperti

²⁸ Spln No 1:1995, "Tegangan-Tegangan Standar," 1995.

²⁹ PT PLN (Persero) P3B Sumatera, "Evaluasi Operasi Tahun 2017," Pekanbaru, Indonesia, 2018.

³⁰ Alen J Wood. Op.Cit



pemantauan keamanan, daftar peralatan yang sedang dalam kondisi perawatan, daftar kontingensi serta batasan-batasan keamanan.

Kondisi operasi dari suatu sistem tenaga dapat diklasifikasikan sebagai kondisi normal, kondisi darurat (*emergency*), dan kondisi untuk mengupayakan agar sistem kembali normal (*restorative*). Kondisi normal adalah suatu keadaan dimana kebutuhan total dari sistem dapat dilayani dengan memenuhi semua batasan-batasan operasi. Gangguan atau menurunnya kemampuan unit pembangkitan, hubung singkat yang kemudian diikuti dengan terbukanya cabang, naiknya beban diluar perkiraan dan sebagainya dapat menimbulkan dua bentuk kondisi darurat.

Bentuk kondisi darurat pertama, sistem tetap stabil tetapi beroperasi dengan terdapat pelanggaran terhadap batasan operasi. Pada bentuk ini kebutuhan konsumen tetap dilayani tetapi muncul kondisi tegangan yang tidak normal (*abnormal*), pembebanan pada saluran dan transformator melanggar batasan. Kondisi darurat ini dapat ditoleransi untuk periode waktu tertentu.

Pada kondisi darurat yang kedua, sistem menjadi tidak stabil dan beban tidak sepenuhnya dapat disuplai. Bentuk kedua ini akan menyebabkan pelanggaran terhadap batasan pembebanan dan batasan-batasan operasi yang jika tidak dilakukan usaha perbaikan dengan segera maka sistem akan menjadi padam total. Dalam kondisi pemulihan kembali, upaya perbaikan dilakukan sehingga sistem dapat kembali ke kondisi normal.^[31]

³¹ P. Kundur, *Power System Stability and Control*. New York: McGraw-Hill, Inc, 1993.



2.10 Program Analisis Sistem Tenaga Listrik

Program analisis sistem tenaga listrik terdiri dari berbagai macam, seperti aplikasi ETAP *PoweringSuccess*, DIgSILENT *PowerFaktery*, PSSE, Matlab, EDSA dan lain-lain. Pada umumnya, semua program memiliki fungsi yang sama yaitu dapat menganalisis sistem tenaga listrik, sehingga dalam perhitungan yang rumit akan menjadi mudah dengan perhitungan digital. Analisis sistem tenaga listrik yang dapat disimulasikan menggunakan beberapa *software* ini berupa studi aliran daya, analisis transien, analisis hubung singkat, analisis harmonisa dan juga optimalisasi aliran daya.

PT.PLN (Persero) P3B Sumatera menggunakan aplikasi DIgSILENT *PowerFaktery* dan juga aplikasi PSSE dalam melakukan analisis sistem tenaga listrik.^[32] Sedangkan pada penelitian ini menggunakan aplikasi ETAP *PoweringSucces* versi 12.6. Aplikasi ETAP dipilih karena memiliki metode iterasi aliran daya *Fast-Decoupled* sesuai dengan pemilihan metode pada penelitian tugas akhir ini sedangkan pada aplikasi DIgSILENT dan PSSE tidak memiliki metode iterasi aliran daya *Fast-Decoupled*.

2.11 Electrical Transient Analyzer Program^[33]

ETAP (Electrical Transient Analyzer Program) adalah aplikasi yang dapat digunakan untuk menganalisa pada suatu sistem pembangkit, sistem transmisi ataupun sistem distribusi tenaga listrik. Aplikasi ini digunakan untuk menyesuaikan simulasi tenaga listrik dalam keadaan offline, online untuk pengelolaan data real-time atau digunakan untuk mengendalikan sistem secara real-time.

³² R. Hidayat, "Draft Wawancara," PT.PLN (Persero) P3B Sumatera, Pekanbaru, Indonesia, 2019.

³³ Laboratorium Sistem Tenaga dan Distribusi Elektrik Teknik Elektro Universitas Andalas, "Tentang ETAP (Electric Transient and Analysis Program) Poers Station" diakses dari <http://stdlaboratory.blogspot.com/2013/11/tentang-etap-electric-transient-and.html>, pada tanggal 23 November pukul 19.48



Gambar 2.3 Icon Bar Elemen-Elemen pada ETAP 16.0.0

Gambar 2.3 ETAP menyajikan beberapa fitur yang dapat mempermudah penggunaannya untuk menyelesaikan suatu masalah dalam bentuk *single line diagram* untuk berbagai bentuk analisa, seperti: hubung singkat, koordinasi *relay* proteksi, *starting motor*, *transient stability*, dan aliran daya. Elemen-elemen yang dibutuhkan untuk melakukan analisa tersebut terdapat dalam ETAP. Proyek sistem tenaga listrik memiliki masing-masing elemen rangkaian yang dapat diedit langsung dari diagram satu garis dan atau jalur sistem pentanahan.

Untuk kemudahan hasil perhitungan analisa dapat ditampilkan pada diagram satu garis. Dalam menganalisa jaringan terutama untuk mengetahui tegangan dan arus yang mengalir digunakan analisa *load flow*.



Berikut cara penggunaan ETAP untuk menganalisa jaringan dengan sistem *load flow* :

1. Jalankan aplikasi etap
2. Buat lembar kerja baru dengan memilih menu *file* kemudian memilih *new project*
3. Masukkan nama proyek untuk *file* kemudian pilih standar sistem *metric*
4. Klik ok
5. Membuat *single line diagram* pada lembar kerja ETAP yang pertama-tama dimulai dari sumber, *transformer*, *CB*, *bus*, saluran transmisi kemudian ke beban. Pembuatan *single line diagram* pada ETAP 16.0.0 berdasarkan *single line diagram* asli jaringan yang ingin dianalisa
6. Memasukkan data dan parameter setiap elemen
 - a) Pengisian data untuk *generator* (Gambar 2.9)
 - 1) *Double* klik simbol generator sinkron pada lembar kerja ETAP 16.0.0
 - 2) Pada jendela info masukkan nama atau ID generator, dan pilih mode konfigurasi *swing*
 - 3) Pilih jendela '*rating*' , masukkan nominal tegangan dan daya generator
 - 4) Kemudian pilih jendela '*Imp/Model*', Klik *typical data*.
 - 5) Pilih jendela '*inertia*' masukkan nilai RPM pada penggerak primer dan pada generator. Pada jendela yang sama masukkan nilai WR2 untuk penggerak utama dan untuk *generator*.
 - 6) Klik OK.

Synchronous Generator Editor - PLTU SUMSEL5

Harmonic Protection Reliability Fuel Cost Time Domain O & M Remarks Comment
Info Rating Capability Imp/Model Grounding Inertia Exciter Governor PSS

11.5 kV 200 MW Swing

Rating

MW	kV	% PF	MVA	% Eff.	Poles
200	11.5	100	200	95	4
% of Bus Nom. kV		FLA		RPM	
100		10041		1500	

Gen. Category	% V	Angle	MW	Mvar	% PF	Qmax	Qmir
1 Design	100	0					
2 Normal	100	0					
3 Shutdown	100	0					
4 Emergency	100	0					

Prime Mover Rating

Continuous		Peak	
HP	MW	HP	MW
341961	255	341961	255

Mvar Limits

Capability Curve User-Defined

Peak Mvar: 158.035

Operating Values

% V	Vangle	MW	Mvar
100	0	17.132	12.314

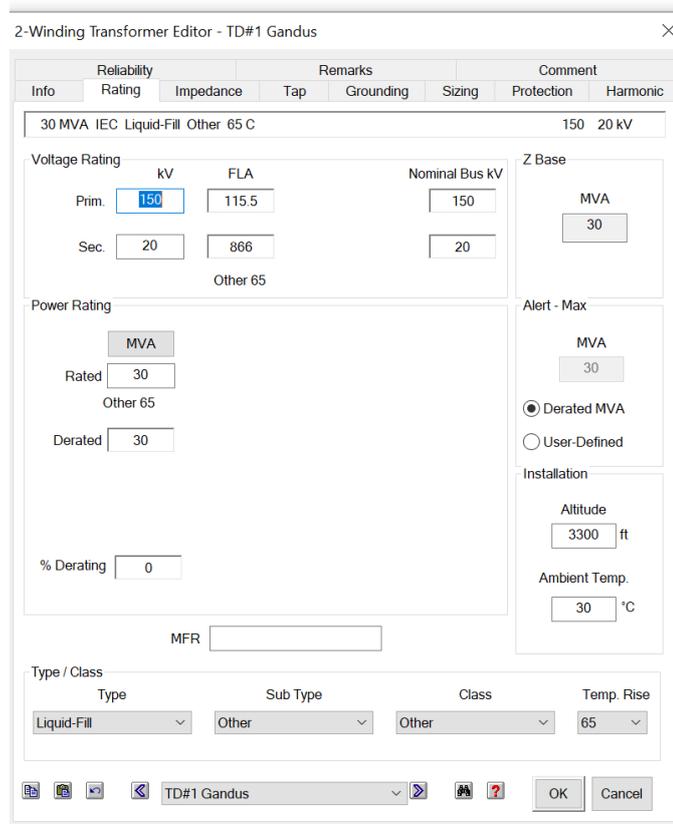
PLTU SUMSEL5

OK Cancel

Gambar 2.4 Pengaturan Generator ETAP 16.0.0

b. Pengisian data untuk *transformator* (Gambar 2.5) :

- 1) *Double* klik simbol *transformator* pada lembar kerja ETAP 16.0.0
- 2) Pada jendela info masukkan nama atau ID *transformator*
- 3) Pilih jendela 'rating', masukkan *rating* daya dan tegangan primer serta tegangan sekundernya sesuai dengan data pada *single line diagram*
- 4) Pilih jendel 'Impedansi', Klik *Typical Z & X/R*.
- 5) Klik Ok
- 6) Lakukan hal yang sama untuk semua *transformator* lainnya sesuai dengan data pada *single line diagram*.

Gambar 2.5 Pengaturan *Transformator* ETAP 16.0.0

- c. Pengisian data untuk *line transmittion* (Gambar 2.6)
- 1) *Double* klik simbol *line transmittion* pada lembar kerja ETAP 16.0.0
 - 2) Pada jendela info masukkan nama atau ID *Line Transmittion* dan panjang dari *Line Transmittion*.
 - 3) Pilih jendela 'impedance', dan masukkan nilai resistansi dan reaktansi pada kondisi post sequence, negative sequence dan zero sequence pada setiap penghantar.
 - 4) Klik OK.

Transmission Line Editor - Betung - Sekayu #2

Protection	Sag & Tension	Ampacity	Reliability	Remarks	Comment
Info	Parameter	Configuration	Grouping	Earth	Impedance

Impedance (per phase)

	R - T1	R - T2	X	Y
Pos.	4.62767	4.62767	15.8798	0
Neg.	4.62767	4.62767	15.8798	0
Zero	14.5257	14.5257	49.2053	0

Project Frequency: 50 Hz

Calculated
 User-Defined

Unit: Ohms per 1 km Ohms

R, X, Y Matrices

Phase Domain Sequence Domain

R X Y

Library Temperatures

Base T1	Base T2
75 °C	75 °C

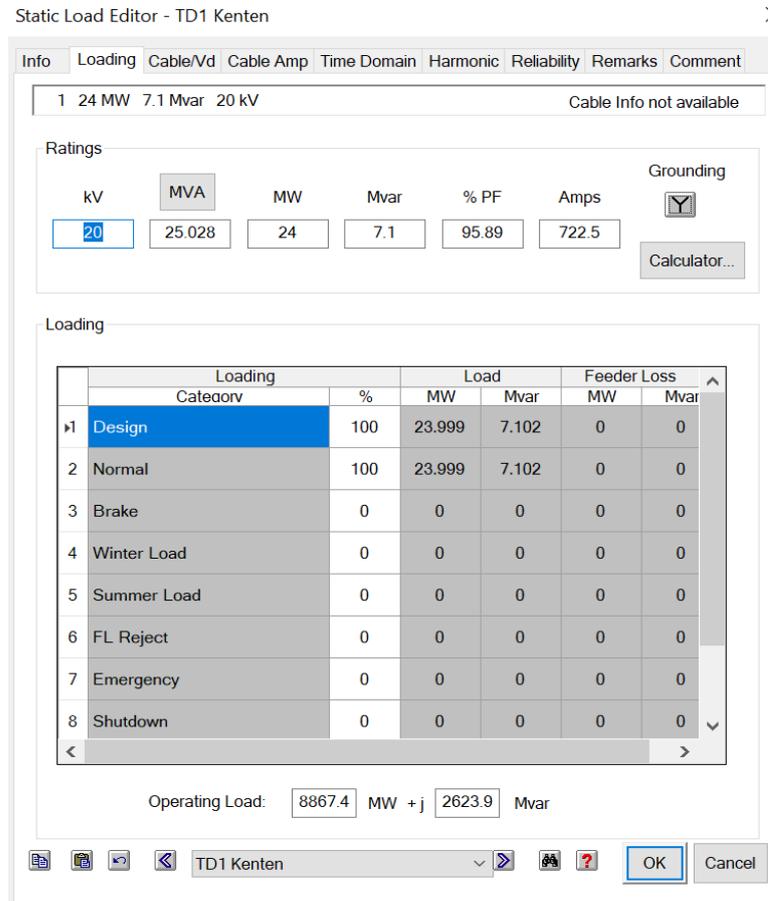
Operating Temperatures

Minimum	Maximum
75 °C	75 °C

OK Cancel

Gambar 2.6 Pengaturan *Line Transmission* ETAP 16.0.0d. Pengisian untuk beban *Lump* (Gambar 2.7)

- 1) *Double* klik simbol *Lump Load* pada lembar kerja ETAP 16.0.0.
- 2) Pilih jendela '*nameplate*', masukkan nilai pembebanannya sesuai dengan ID trafo distribusinya.
- 3) Klik Ok.



Gambar 2.7 Pengaturan *Lump Load* ETAP 16.0.0

2.11.1 Analisa Jaringan Dengan Sistem *Load Flow*

Pada fitur analisa ini, dapat diketahui besar tegangan, arus daya dan *losses* dari suatu jaringan yang disimulasikan dengan memasukkan data asli jaringan yang disimulasikan dalam bentuk *single line diagram* pada lembar kerja ETAP 16.0.0. Komponen yang biasa digunakan dalam menganalisa suatu jaringan pada ETAP adalah generator, *high volage circuit breaker*, transformer, saluran transmisi, bus, beban *static* dan/atau beban *lump*.

Dalam menganalisa jaringan dengan sistem *load flow*, dengan cara menentukan *load flow study case* terlebih dahulu, dapat dilakukan dengan cara memilih sub menu *load flow analysis* (gambar 2.8) pada ETAP, lalu pilih ikon *load flow study case* (gambar 2.9). Didalam ikon *load flow study case* kita dapat

menentukan metode aliran daya yang akan digunakan dan batasan standar operasi sistem.

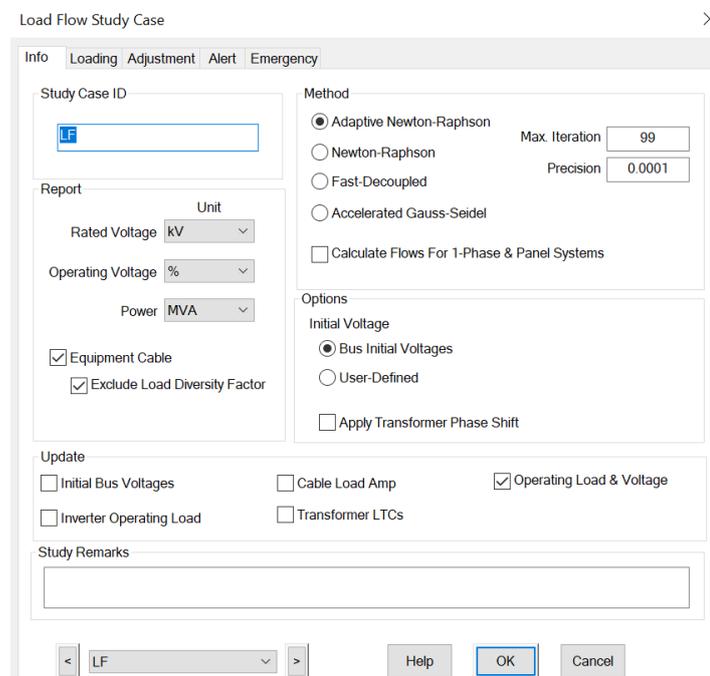


Gambar 2.8 Menu *Load Flow Analysis* pada ETAP 16.0.0



Gambar 2.9 Ikon *Load Flow Study Case* pada ETAP 16.0.0

Metode dapat ditentukan dengan memilih menu *Info* (gambar 2.10). Penulis memilih metode *Newton-Raphson* yang merupakan penyempurnaan dari metode *Gauss-Seidel*.



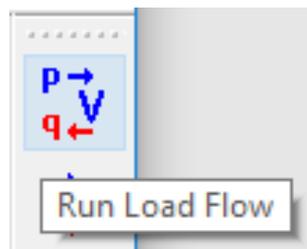
The screenshot shows the 'Load Flow Study Case' dialog box with the 'Info' tab selected. The 'Study Case ID' is 'LF'. The 'Method' section has 'Adaptive Newton-Raphson' selected, with 'Max. Iteration' set to 99 and 'Precision' set to 0.0001. The 'Options' section has 'Bus Initial Voltages' selected. The 'Update' section has 'Operating Load & Voltage' checked. The 'Study Remarks' field is empty. The 'Study Case ID' dropdown at the bottom shows 'LF'.

Gambar 2.10 Tampilan Menu *Info Load Flow Study Case* pada ETAP 16.0.0

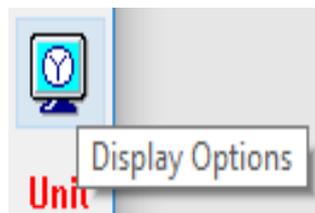
2.11.2 Pengujian Simulasi Aliran Daya

Pengujian simulasi aliran daya dengan meng-klik *run load flow* (gambar 2.11), untuk menampilkan parameter yang diinginkan seperti arus, tegangan, daya dan rugi-rugi daya maka klik *display options* (gambar 2.12). Simulasi yang dijalankan haruslah konvergen. Konvergen adalah nilai-nilai variabel sudah mulai menuju satu titik. Konvergen atau tidaknya suatu simulasi dilihat dari hasil pengujian *load flow* pada ETAP.

Didalam pengujian *load flow* menggunakan metode *Newton-Raphson* dengan persamaan (2.17) s/d (2.37) yang sudah terintegrasi ke dalam *software* ETAP 16.0.0 ETAP akan mengevaluasi apakah aliran daya sudah sesuai atau belum dengan cara mengklik ikon *run load flow* (gambar 2.11). Parameter yang kurang tepat akan dinyatakan *error* dan apabila proses *running* berhasil maka nilai *drop* tegangan pada masing-masing bus akan muncul serta tanda merah marjinal menunjukkan parameter pada sistem yang bekerja dengan normal. Simulasi akan terpenuhi apabila telah memenuhi standar tegangan bus dan pembebanan saluran yang telah ditentukan. Hasil simulasi aliran daya dapat di rekapitulasi dengan mengklik ikon *load flow report manager*.



Gambar 2.11 Ikon *Run Load Flow* pada ETAP 16.0.0



Gambar 2.12 Ikon *Display Options* pada ETAP 16.0.0