

IR. SHEYLIN WIMORA LUMBAN TOBING, ST., M.ENG.
DR. YULIARMAN SARAGIH, ST., M.T., IPU.

ANALISIS SISTEM TENAGA LISTRIK

PENGAPLIKASIAN PADA ETAP



BUKU AJAR :
**ANALISIS SISTEM TENAGA LISTRIK
& PENGAPLIKASIAN PADA ETAP**

DISUSUN OLEH :

IR. SHEYLIN WIMORA LUMBAN TOBING, ST., M.ENG.
DR. YULIARMAN SARAGIH, ST., M.T., IPU.

PENERBIT:



UU No 28 tahun 2014 tentang Hak Cipta
Pasal 113

- 1) Setiap Orang yang dengan tanpa hak melakukan pelanggaran hak ekonomi sebagaimana dimaksud dalam Pasal 9 ayat (1) huruf i untuk Penggunaan Secara Komersial dipidana dengan pidana penjara paling lama 1 (satu) tahun dan/atau pidana denda paling banyak Rp 100.000.000 (seratus juta rupiah).
- 2) Setiap Orang yang dengan tanpa hak dan/atau tanpa izin Pencipta atau pemegang Hak Cipta melakukan pelanggaran hak ekonomi Pencipta sebagaimana dimaksud dalam Pasal 9 ayat (1) huruf c, huruf d, huruf f, dan/atau huruf h untuk Penggunaan Secara Komersial dipidana dengan pidana penjara paling lama 3 (tiga) tahun dan/atau pidana denda paling banyak Rp. 500.000.000,00 (lima ratus juta rupiah).
- 3) Setiap Orang yang dengan tanpa hak dan/atau tanpa izin Pencipta atau pemegang Hak Cipta melakukan pelanggaran hak ekonomi Pencipta sebagaimana dimaksud dalam Pasal 9 ayat (1) huruf a, huruf b, huruf e, dan/atau huruf g untuk Penggunaan Secara Komersial dipidana dengan pidana penjara paling lama 4 (empat) tahun dan/ atau pidana denda paling banyak Rp1.000.000.000,00 (satu miliar rupiah).
- 4) Setiap Orang yang memenuhi unsur sebagaimana dimaksud pada ayat (3) yang dilakukan dalam bentuk pembajakan, dipidana dengan pidana penjara paling lama 10 (sepuluh) tahun dan/atau pidana denda paling banyak Rp. 4.000.000.000,00 (empat miliar rupiah).

BUKU AJAR :
ANALISIS SISTEM TENAGA LISTRIK
& PENGAPLIKASIAN PADA ETAP

DISUSUN OLEH :

IR. SHEYLIN WIMORA LUMBAN TOBING, ST., M.ENG.
DR. YULIARMAN SARAGIH, ST., M.T., IPU.

Desain Cover:
Sulaiman

Tata Letak:
Sulaiman

ISBN:
978-634-04-0559-0

Cetakan Pertama:
Juni, 2025

Hak Cipta 2025, Pada Penulis

Hak Cipta Dilindungi Oleh Undang-Undang

Copyright © 2025
by HADLA Media Informasi
All Right Reserved

Dilarang keras menerjemahkan, memfotokopi, atau memperbanyak sebagian atau seluruh isi buku ini tanpa izin tertulis dari Penerbit

PENERBIT:



Website: www.media.hadlacorp.com

KATA PENGANTAR

Puji dan syukur penulis panjatkan ke hadirat Tuhan Yang Maha Esa, karena atas rahmat dan karunia-Nya buku ajar yang berjudul "*Analisis Sistem Tenaga Listrik*" ini dapat diselesaikan dengan baik. Buku ini disusun sebagai referensi pembelajaran bagi mahasiswa teknik elektro, khususnya yang mempelajari mata kuliah sistem tenaga listrik, serta bagi praktisi dan pembaca umum yang ingin memahami dasar hingga konsep lanjutan dalam sistem tenaga listrik.

Sistem tenaga listrik merupakan tulang punggung infrastruktur modern yang melibatkan proses pembangkitan, transmisi, distribusi, hingga pemanfaatan energi listrik secara efisien dan andal. Oleh karena itu, pemahaman yang kuat terhadap konsep, komponen, dan analisis sistem tenaga sangat penting bagi calon insinyur dan tenaga profesional di bidang ketenagalistrikan.

Materi dalam buku ini mencakup pengenalan sistem tenaga listrik, model dan perhitungan komponen utama seperti generator, transformator, dan saluran transmisi, hingga analisis aliran daya dan gangguan dalam sistem. Penulis berusaha menyajikan materi secara sistematis, dengan bahasa yang mudah dipahami, serta dilengkapi contoh soal dan latihan untuk memperkuat pemahaman pembaca.

Penulis menyadari bahwa buku ini masih memiliki kekurangan dan keterbatasan. Oleh karena itu, kritik dan saran dari para pembaca sangat diharapkan untuk penyempurnaan edisi berikutnya.

Akhir kata, semoga buku ini dapat memberikan manfaat dan menjadi kontribusi positif bagi pengembangan ilmu pengetahuan, khususnya di bidang teknik tenaga listrik.

Medan, Juni 2025

Penulis

BIOGRAFI PENULIS



Ir. Sheylin Wimora Lumban Tobing, ST., M.Eng. lahir di Pematang Siantar tanggal 25 Juni 1995. Beliau merupakan seorang akademisi di bidang tekni elektro dan energi yang saat ini aktif sebagai Dosen Tetap di Universitas Sumatera Utara, Medan, Sumatera Utara.

Perjalanan akademiknya dimulai dengan menempuh Pendidikan di Institut Teknologi-PLN Jakarta pada tahun 2013-2017, dengan konsentrasi arus kuat pada bidang Teknik Elektro.

Untuk memperdalam ilmu pengetahuannya, beliau melanjutkan studi Magister di Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta 2018-2020. Dengan konsentrasi di bidang Tenaga Listrik, beliau meneliti “Optimasi Penempatan Kapasitor Pada Sistem Microgrid Testbed Dengan Metode Particle Swarm Optimization” yang mengangkat peran kapasitor dalam mendukung pengembangan energi terbarukan dalam system testbed microgrid.

Tahun 2021, Sheylin mengikuti perkuliahan profesi Insinyur di Universitas Kristen Atma Jaya Jakarta dan Sejak Februari 2021, Sheylin mengabdikan dirinya sebagai dosen tetap di Universitas Sumatera Utara. Dalam menjalankan Tri Dharma Perguruan Tinggi Negeri yang meliputi pengajaran, penelitian dan pengabdian kepada masyarakat. Di bidang pengajaran, beliau aktif menyusun Rencana Pembelajaran Semester (RPS), memberikan kuliah sesuai bidang keahliannya, membimbing mahasiswa, serta melakukan evaluasi akademik. Pada bidang penelitian, beliau berfokus pada kajian energi terbarukan, penggunaan Simulink Matlab dan optimasi dengan tujuan mempublikasikan hasil kajian dalam forum ilmiah nasional maupun internasional. Selain itu, Sheylin juga berperan dalam program pengabdian masyarakat melalui pelatihan dan edukasi berbasis teknologi.

Kontak:

sheylin@usu.ac.id

082165017774



Dr. Ir. Yuliarman Saragih, S.T., M.T., IPU, lahir di Rantau-Kabupaten Aceh Timur pada tanggal 1 Juli tahun 1971, anak ke 4 dari 6 bersaudara pasangan A.K.Saragih-Ramentina boru Damanik yang merupakan rumpun keluarga Batak Simalungun di Sumatera Utara. Menyelesaikan Program S1 untuk Sarjana Teknik Program Studi Teknik Elektro di Universitas Mercu Buana Jakarta pada tahun 2002. Berhasil menyelesaikan Magister Teknik, Program Studi Magister Teknik Elektro di Universitas Trisakti Jakarta pada tahun 2008. Pada tahun 2009 diterima sebagai Mahasiswa Program Doktor (S3) Program Studi Doktor Teknik Elektro di Universitas Indonesia. Pada tahun 2013 menjadi mahasiswa S3 Fakultas Interdisiplin Bidang Teknik Elektro dan menyelesaikan Studi Doktor tersebut dengan Nilai Sangat Memuaskan dengan konsentrasi penelitian adalah telekomunikasi berbiaya murah di Universitas Kristen Satya Wacana (UKSW) Salatiga. Dr.Ir. Yuliarman Saragih, S.T., M.T., IPM pernah bekerja di PT ARCO Indonesia, Perusahaan Tambang Minyak Lepas Pantai di Laut Jawa sebagai Teknisi Telekomunikasi hingga tahun 1994, Lalu diterima sebagai karyawan PT Freeport McMorran Indonesia di Tembagapura dan Timika hingga tahun 1996 sebagai senior teknisi telekomunikasi dan radio bandar udara. Sebagai Engineer AT&T dan Lucent Technologies di bidang radio dan wireless CDMA dan GSM, Yuliarman Saragih dipercayakan bertugas sebagai engineer certified untuk support internasional project di asia pasifik sejak 1996 hingga tahun 2003 dan bertugas di banyak negara sebagai Internasional Engineer of CDMA. Bidang Managerial di Samsung Electronic terkhusus di bidang Jaringan CDMA untuk wilayah Indonesia dan Australia hingga tahun 2005. Masa perjalanan tahun 2006 hingga saat ini berfokus di dunia pendidikan terkhusus dalam pengajaran dan penelitian serta pengabdian masyarakat di berbagai universitas. Mulai dari Dosen Tetap di LP3I Jakarta dan pada akhirnya memilih menjadi Dosen Tetap Fakultas Teknik Program Studi Teknik Elektro di Perguruan Tinggi Negeri (PTN) Universitas Singaperbangsa Karawang sejak 2015 hingga saat ini.

Kontak:

yuliarman@yahoo.com

08128594780

DAFTAR ISI

| | |
|--|------|
| KATA PENGANTAR | v |
| BIOGRAFI PENULIS | vi |
| DAFTAR ISI | viii |
| DAFTAR GAMBAR | x |
| BAB 1 SISTEM TENAGA LISTRIK | 1 |
| 1.1 Listrik | 2 |
| 1.2 Sistem Tenaga Listrik..... | 3 |
| 1.3 Persoalan Umum di Sistem Tenaga Listrik..... | 9 |
| 1.4 Persoalan di Sisi Suplai | 10 |
| 1.5 Tugas Formatif | 11 |
| BAB 2 GENERAL NETWORK FOR NETWORK CALCULATION | 13 |
| 2.1 Model komponen sistem tenaga listrik..... | 14 |
| 2.2 Diagram Segaris | 15 |
| 2.3 Impedansi/admitansi..... | 17 |
| 2.4 Komponen Simetris..... | 27 |
| 2.5 Besaran per Unit..... | 28 |
| 2.6 Model rangkaian dan model matematik | 29 |
| 2.7 Tugas Formatif | 30 |
| BAB 3 ALIRAN DAYA PADA SISTEM KELISTRIKAN | 31 |
| 3.1 Busbar..... | 32 |
| 3.2 Aliran Daya | 33 |
| 3.3 Gauss Seidel (Pertemuan 3)..... | 34 |
| 3.4 Newton Raphson (Pertemuan 4)..... | 35 |
| 3.5 Tugas Formatif | 37 |
| BAB 4 PENGENALAN ETAP (ALIRAN DAYA) | 38 |
| 4.1 Gambar Sistem | 39 |
| 4.2 Daya Listrik dan Faktor Daya | 40 |
| BAB 5 HUBUNG SINGKAT | 42 |
| 5.1 Masalah Arus Hubung Singkat (Short Circuit) | 43 |
| 5.2 Pengertian Hubung Singkat (<i>Short Circuit</i>) | 45 |
| 5.3 Jenis – Jenis Gangguan Hubung Singkat..... | 46 |

| | |
|---|------------|
| 5.4 Analisis Gangguan..... | 51 |
| 5.5 Tugas Formatif | 66 |
| BAB 6 GANGGUAN SIMETRIS DAN ASIMETRIS | 67 |
| 6.1 Pengertian Gangguan pada Sistem Tenaga | 68 |
| 6.2 Komponen Simetri..... | 69 |
| 6.3 Gangguan Asimetris pada Sistem Tenaga Listrik | 71 |
| 6.4 Perhitungan Arus dan Tegangan pada Gangguan Asimetris | 76 |
| 6.5 Gangguan pada Generator Sinkron | 79 |
| 6.6 Tugas Formatif | 80 |
| BAB 7 KONSEP DASAR STABILITAS DAYA..... | 81 |
| 7.1 Faktor-faktor Utama dalam Masalah Kestabilan..... | 82 |
| 7.2 Dinamika Rotor Dan Persamaan Ayunan..... | 84 |
| 7.3 Persamaan Sudut Daya | 90 |
| 7.4 Koefisien Daya Sinkronisasi | 94 |
| 7.5 Tugas Formatif | 102 |
| RANGKUMAN..... | 102 |
| DAFTAR PUSTAKA | 106 |

DAFTAR GAMBAR

| | |
|--|----|
| Gambar 1. 1 Muatan listrik melalui penampang | 8 |
| Gambar 1. 2 Single line diagram sistem tenaga listrik secara sederhana | 8 |
| Gambar 1. 3 Rangkaian ekuivalen pada saluran transmisi yang terdistribusi secara menyeluruh | 9 |
| Gambar 1. 4 Rangkaian ekuivalen suatu saluran transmisi pendek | 9 |
| Gambar 1. 5 Transformator dua gulungan | 11 |
| Gambar 1. 6 Representasi skema transformator dua gulungan | 13 |
| Gambar 2. 1 Diagram satu garis sistem tenaga Listrik | 18 |
| Gambar 2. 2 Diagram segaris suatu sistem Listrik | 20 |
| Gambar 2. 3 Rangkaian RLC | 23 |
| Gambar 2. 4 Segitiga daya | 23 |
| Gambar 2. 5 Grafik arus dan tegangan | 25 |
| Gambar 2. 6 Grafik arus dan tegangan pada inductor | 26 |
| Gambar 2. 7 Grafik arus dan tegangan pada kapasitor | 28 |
| Gambar 2. 8 Rangkaian ekuivalen untuk DC dan frekuensi tinggi: (a) induktor, (b) kapasitor | 29 |
| Gambar 2. 9 Tiga himpunan fasor seimbang yang merupakan komponen dari tiga fasor yang tak seimbang | 31 |
| Gambar 3. 1 Nameplate PQ bus | 37 |
| Gambar 4. 1 Tampilan program ETAP dan keterangan singkatnya | 43 |
| Gambar 5. 1 Gangguan tiap fasa | 50 |
| Gambar 5. 2 Kontak dengan pohon menyebabkan korsleting selama badai | 51 |
| Gambar 5. 3 Tegangan yang sama di setiap sirkuit | 51 |
| Gambar 5. 4 Plug pada kabel | 53 |
| Gambar 5. 5 Gangguan Hubung Singkat Satu Fasa Ketanah | 57 |
| Gambar 5. 6 Gangguan hubung singkat satu phasa ke tanah | 58 |
| Gambar 5. 7 Rangkaian ekivalen gangguan hubung singkat satu phasa ke tanah | 60 |
| Gambar 5. 8 Vektor diagram arus dan tegangan gangguan hubung singkat satu phasa ke tanah | 61 |
| Gambar 5. 9 Gangguan hubung singkat satu phasa ke tanah | 61 |
| Gambar 5. 10 Gangguan hubung singkat tiga fasa | 62 |
| Gambar 5. 11 Gangguan hubung singkat tiga fasa dengan vektor diagramnya | 62 |
| Gambar 5. 12 Gangguan hubung singkat dua fasa | 63 |
| Gambar 5. 13 Gangguan hubung singkat dua fasa | 65 |
| Gambar 5. 14 Persentase gangguan berdasarkan sebab | 65 |
| Gambar 5. 15 Rangkaian equivalent hubungan singkat phasa-phasa | 66 |
| Gambar 5. 16 Diagram vektor arus dan tegangan untuk gangguan hubung singkat fasa ke fasa | 67 |
| Gambar 5. 17 Persentase gangguan berdasarkan sebab | 67 |
| Gambar 5. 18 Gangguan hubung singkat fasa ke fasa | 67 |
| Gambar 5. 19 Gangguan hubung singkat fasa-fasa ke tanah | 68 |
| Gambar 5. 20 Gangguan Hubung Singkat Tiga Phasa | 69 |

| | |
|--|-----|
| Gambar 6. 1 Rangkaian (a) komponen urutan nol. (b) komponen urutan positif dan (c) komponen urutan negative | 75 |
| Gambar 6. 2 Gambar rangkaian pada keadaan gangguan | 77 |
| Gambar 6. 3 Diagram garis tunggal sederhana | 78 |
| Gambar 6. 4 Konstanta α | 79 |
| Gambar 6. 5 Gangguan satu fasa ke tanah | 82 |
| Gambar 6. 6 Gangguan dua fasa | 83 |
| Gambar 6. 7 Gangguan dua fasa ke tanah | 83 |
| Gambar 7. 1 Diagram segaris dan faktor-faktor utama dalam masalah kestabilan | 90 |
| Gambar 7. 2 Representasi suatu rotor mesin yang membandingkan arah perputaran serta momen putar mekanis dan elektris untuk (a) generator dan (b) motor | 91 |
| Gambar 7. 3 Diagram fasor mesin serempak untuk studi-studi kestabilan Peralihan | 96 |
| Gambar 7. 4 Diagram skema untuk studi-studi kestabilan. reaktansi peralihan yang berhubungan dengan E'_1 dan E'_2 dimasukkan ke dalam saluran transmisi | 98 |
| Gambar 7. 5 Bandul piringan berputar untuk melukiskan suatu rotor yang berayun terhadap suatu rel tak terhingga | 100 |
| Gambar 7. 6 Model sistem yang digunakan dalam studi stabilitas transient | 101 |
| Gambar 7. 7 Diagram reaksi sebelum terjadinya gangguan (prefault) | 102 |
| Gambar 7. 8 Menghitung tegangan generator pada waktu sebelum gangguan dan sudut mula-mula | 103 |
| Gambar 7. 9 Diagram reaktansi ketika terjadi gangguan semua saluran ditanahkan dan dihubungkan bintang untuk mencari impedansi pengganti | 104 |
| Gambar 7. 10 Diagram reaktansi ketika saluran telah dihubung Bintang | 105 |
| Gambar 7. 11 Diagram reaktansi untuk reaktansi pengganti | 105 |
| Gambar 7. 12 Diagram reaktansi setelah reaktansi transformasi Y- Δ | 106 |
| Gambar 7. 13 Diagram reaktansi setelah terjadi gangguan (post fault) B1 dan B2 terbuka | 106 |

BAB 1 SISTEM TENAGA LISTRIK

PENDAHULUAN

Sistem tenaga listrik merupakan suatu kesatuan yang terdiri dari pembangkitan, transmisi, distribusi, dan pemanfaatan energi listrik. Sistem ini berperan penting dalam mendukung berbagai aktivitas kehidupan modern, baik dalam sektor industri, komersial, maupun rumah tangga. Ketersediaan dan keandalan energi listrik yang stabil sangat menentukan kelancaran berbagai proses produksi dan pelayanan publik.

Seiring dengan meningkatnya kebutuhan energi listrik dan berkembangnya teknologi, sistem tenaga listrik menjadi semakin kompleks. Oleh karena itu, diperlukan suatu analisis yang mendalam untuk memastikan bahwa sistem bekerja secara optimal, aman, dan efisien. Analisis sistem tenaga listrik mencakup berbagai aspek teknis seperti aliran daya (*power flow*), gangguan (*fault analysis*), stabilitas sistem, kualitas daya, hingga efisiensi energi.

Tujuan dari analisis sistem tenaga listrik adalah untuk memahami karakteristik operasi sistem, mendeteksi permasalahan, serta merancang solusi atau perbaikan yang diperlukan. Dengan melakukan analisis ini, para insinyur dan perencana dapat mengambil keputusan yang tepat dalam perancangan, pengembangan, serta pemeliharaan infrastruktur kelistrikan.

Dalam konteks ini, analisis sistem tenaga listrik menjadi suatu kegiatan yang krusial dalam menjamin kontinuitas suplai daya yang andal dan ekonomis, sekaligus mendukung transisi menuju sistem energi yang lebih berkelanjutan dan ramah lingkungan.

TABEL CAPAIAN

| | |
|---|--|
| CAPAIAN PEMBELAJARAN MATA KULIAH (CPMK) | Mahasiswa mampu menjelaskan konsep dasar sistem tenaga listrik secara komprehensif |
| Sub-CPMK1 | Mahasiswa akan mampu mengidentifikasi konsep dasar pada sistem tenaga |

ISI

1.1 Listrik

Dalam pembahasan listrik statik dipelajari tentang partikel yang bermuatan listrik di dalam atom, yaitu elektron dan proton. Elektron adalah pembawa muatan listrik negatif yang dapat digunakan untuk menjelaskan terjadinya arus listrik dan proton pembawa muatan positif (Giancoli, 2008).

Listrik dinamis adalah ilmu yang mempelajari tentang listrik yang mengalir. Pada listrik statik, muatan listrik yang telah dipelajari itu pada umumnya tidak mengalir sama sekali atau kalau ada aliran, maka aliran tersebut berlangsung sangat singkat dan sangat kecil sehingga tak dapat ditunjukkan dengan alat pengukur arus (Ni Putu Trisna Sulistyan, 2022).

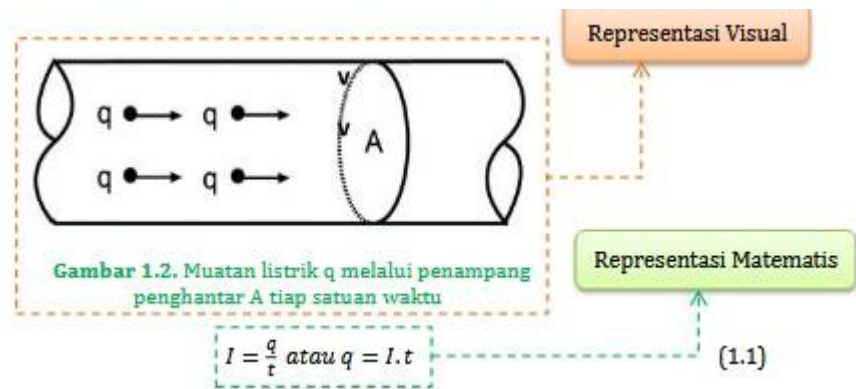
Seperti yang telah kita ketahui bahwa elektron-elektron itu adalah pembawa muatan negatif. Di dalam suatu penghantar elektron-elektron dapat berpindah dengan mudah, sedangkan di dalam suatu isolator elektron-elektron tersebut sukar berpindah (Silfiasyafitri, 2022).

a. Definisi Arus Listrik

Arus listrik adalah aliran muatan listrik atau muatan listrik yang mengalir tiap satuan waktu (Giancoli, 2008). Arah arus listrik dari dari potensial yang tinggi ke potensial rendah, jadi berlawanan dengan arah aliran electron. Seandainya muatan-muatan positif di dalam suatu penghantar dapat mengalir, maka arah alirannya sama dengan arah arus listrik, yaitu dari potensial tinggi ke potensial rendah.

b. Kuat Arus Listrik

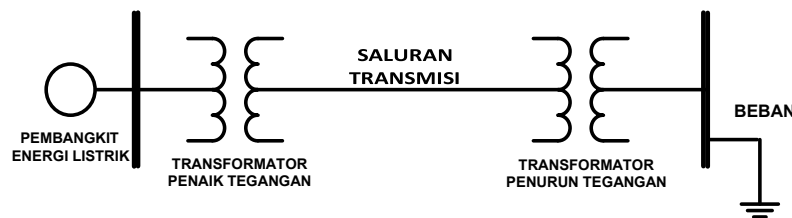
Kuat arus listrik ialah banyaknya muatan listrik yang mengalir tiap detik melalui suatu penghantar (Giancoli, 2008). Simbol kuat arus adalah I . Satuan kuat arus listrik ialah Ampere yang diambil dari nama seorang ilmuwan Perancis yaitu : Andrey Marie Ampere (1775 – 1836). Misalkan bahwa dalam waktu t detik mengalir muatan listrik sebesar q coulomb dalam suatu penghantar berpenampang A (Gambar 1.1), maka dirumuskan:



Gambar 1. 1 Muatan listrik melalui penampang

1.2 Sistem Tenaga Listrik

Sistem tenaga listrik adalah suatu sistem yang berfungsi untuk mengubah dan memindahkan tenaga listrik dari sumber tenaga pembangkit ke distribusi (beban) melalui saluran transmisi. Suatu sistem tenaga listrik terdiri dari tiga bagian utama yaitu pembangkit, saluran transmisi, dan distribusi (beban).



Gambar 1. 2 Single line diagram sistem tenaga listrik secara sederhana

Pembangkit merupakan sentral-sentral dari listrik (*electrical power stations*), terdiri dari turbin (*prime mover*), generator-generator, peralatan pengaturan frekuensi, serta transformator-transformator tegangan tinggi. Dalam pembangkitan ini tegangan yang dibangkitkan adalah 11–24 kV.

Saluran transmisi atau subtransmisi adalah pemberian nama yang didasarkan pada fungsinya dalam operasi, di mana:

- a. Transmisi, yang menyatukan daya besar dari pusat-pusat pembangkit ke daerah beban, atau antara dua atau lebih sistem. Yang terakhir disebut sebagai saluran interkoneksi atau “*tie line*”.
- b. Subtransmisi, transmisi percabangan dari saluran yang tinggi ke saluran yang lebih rendah.

Dalam saluran transmisi terdiri atas saluran-saluran transmisi tegangan tinggi, transformator-transformator pengatur daya aktif dan reaktif. Untuk saluran transmisi ini tegangan yang disalurkan adalah 70 kV, 150 kV, dan 500 kV (standar tegangan transmisi di Indonesia).

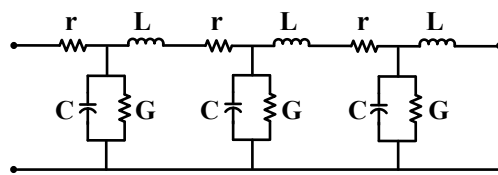
Distribusi atau beban adalah penghubung semua beban yang terpisah satu dengan yang lain ke saluran transmisi. Di Indonesia telah ditetapkan bahwa tegangan distribusi adalah 20 kV.

1. Saluran Transmisi

Menurut panjangnya saluran transmisi dapat diklasifikasikan sebagai berikut:

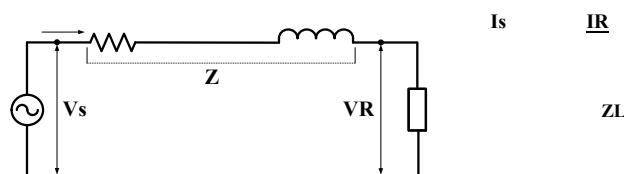
- Saluran transmisi pendek (kurang dari 80 km).
- Saluran transmisi menengah (antara 80 km sampai 240 km).
- Saluran transmisi panjang (lebih dari 240 km).

Rangkaian pengganti saluran transmisi terdiri dari parameterparameter saluran yaitu resistansi, induktansi, kapasitansi, dan konduktansi yang terdistribusi sepanjang saluran dan dapat digambarkan sebagai berikut.



Gambar 1.3 Rangkaian ekuivalen pada saluran transmisi yang terdistribusi secara menyeluruh

Rangkaian ekivalen (diagram pengganti) saluran transmisi pendek dengan mengabaikan parameter kapasitansi ditunjukkan dalam Gambar 1.4.



Gambar 1.4 Rangkaian ekuivalen suatu saluran transmisi pendek

2. Mesin Serempak

Mesin serempak (*synchronous machine*) sebagai suatu generator ac yang digerakkan turbin adalah suatu alat yang mengubah energi mekanis menjadi energi listrik. Kedua bagian utama sebuah mesin serempak adalah *susunan ferromagnetik*. Bagian yang diam pada dasarnya adalah sebuah silinder kosong dinamakan stator dan mempunyai alur (*slots*) memanjang yang di dalamnya terdapat lilitan kumparan stator. Sedangkan bagian yang berputar dinamakan rotor yang terpasang pada poros dan berputar di dalam stator yang kosong. Lilitan pada rotor dinamakan lilitan medan (*field winding*) yang dicatu dengan arus searah menghasilkan medan magnet yang berasal dari arus yang mengalir pada belitan rotor.

Prinsip kerja dari generator serempak adalah rotor yang dicatu oleh sumber arus searah menghasilkan medan magnet yang berasal dari arus yang mengalir pada belitan rotor. Rotor tersebut diputar oleh turbin sehingga medan magnet yang dihasilkan rotor tersebut memotong kumparan-kumparan pada stator, akibatnya tegangan diinduksi pada kumparan stator tersebut. Frekuensi dari tegangan yang diinduksikan pada kumparan stator tersebut adalah:

$$f = \frac{P N}{2 60}$$

di mana

f = Frekuensi dalam Hz P

= Jumlah kutub-kutub rotor

N = Kecepatan rotor dalam rpm

Tegangan yang dibangkitkan pada kumparan stator tersebut adalah tegangan beban nol. Generator tiga fasa dengan belitan stator yang seimbang tiga fasa membangkitkan tegangan tiga fasa seimbang. Bila suatu beban tiga fasa seimbang dihubungkan ke generator maka akan mengalir arus tiga fasa seimbang pada belitan-belitan stator tiga fasa (belitan jangkar). Arus tersebut menimbulkan mmf dari reaksi jangkar sehingga medan magnet di dalam *air gap* merupakan resultan dari mmf yang

BAB 2 GENERAL NETWORK FOR NETWORK CALCULATION

PENDAHULUAN

Dalam analisis sistem tenaga listrik, pemodelan jaringan listrik secara akurat merupakan langkah fundamental untuk mendukung berbagai perhitungan teknik seperti aliran daya (*load flow*), analisis gangguan (*fault analysis*), dan studi kestabilan sistem. Salah satu pendekatan yang digunakan untuk mempermudah dan menstandarkan proses ini adalah melalui General Network for Network Calculation (GNC).

GNC merupakan kerangka umum yang dirancang untuk merepresentasikan elemen-elemen sistem tenaga dalam bentuk matematis yang seragam dan fleksibel. Pendekatan ini menyatukan berbagai komponen sistem, seperti generator, transformator, saluran transmisi, beban, dan lainnya ke dalam struktur jaringan yang dapat dianalisis menggunakan metode numerik. Dengan GNC, semua elemen sistem digambarkan sebagai bagian dari jaringan umum yang dapat dihitung menggunakan teknik matriks dan algoritma optimasi.

Keunggulan dari pendekatan GNC adalah kemampuannya untuk mengakomodasi sistem yang kompleks dan berubah-ubah tanpa harus merombak struktur perhitungan dari awal. Hal ini sangat bermanfaat dalam perencanaan dan pengoperasian sistem tenaga modern yang dinamis, seperti integrasi sumber energi terbarukan, pengembangan microgrid, dan penerapan teknologi smart grid.

Tujuan dari penggunaan GNC dalam perhitungan jaringan adalah untuk menyederhanakan pemodelan teknis, mempercepat proses komputasi, serta meningkatkan akurasi hasil analisis. Oleh karena itu, pemahaman tentang prinsip kerja dan penerapan GNC menjadi penting bagi para insinyur dan akademisi yang bergerak di bidang sistem tenaga listrik.

TABEL CAPAIAN

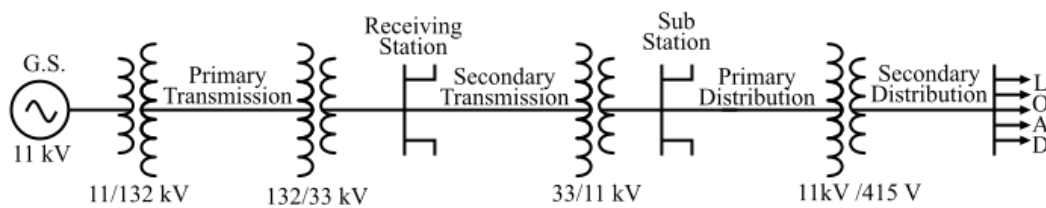
| | |
|---|---|
| CAPAIAN PEMBELAJARAN MATA KULIAH (CPMK) | Mampu menjelaskan konsep dasar sistem tenaga listrik secara komprehensif |
| Sub-CPMK2 | Mahasiswa akan mampu mengidentifikasi dan menghitung pemodelan: model komponen utama, |

| | |
|--|--|
| | diagram segaris, diagram impedansi/admitansi, besaran per unit, model rangkaian, model matematik |
|--|--|

ISI

2.1 Model komponen sistem tenaga listrik

Sistem *tenaga listrik* adalah jaringan perangkat listrik yang saling terhubung, yang digunakan untuk menghasilkan, mengirimkan, mendistribusikan, dan memanfaatkan tenaga listrik.



Gambar 2. 1 Diagram satu garis sistem tenaga listrik

Sistem tenaga listrik pada umumnya mempunyai komponen-komponen utama berikut ini :

- Stasiun Pembangkit
- Sistem Transmisi
- Sistem Distribusi
- Beban Listrik

Stasiun pembangkit listrik terdiri dari dua atau lebih alternator 3 fase yang dioperasikan secara paralel. Karena beberapa alasan teknis, tegangan pembangkitan biasanya berada dalam kisaran 6 kV hingga 20 kV. Umumnya, pembangkit listrik terletak cukup jauh dari pusat beban. Karena alasan ekonomis, tenaga listrik harus disalurkan melalui saluran transmisi pada tegangan yang sangat tinggi.

Oleh karena itu, di stasiun pembangkit listrik, tegangan yang dihasilkan dinaikkan ke nilai yang tinggi (misalkan 150 kV) dengan bantuan transformator step-up. Kemudian, daya listrik disalurkan melalui saluran transmisi pada tegangan tinggi ini.

Di pinggiran kota (juga disebut gardu transmisi), tegangan diturunkan ke nilai rendah (katakanlah 20kV) dengan bantuan transformator step-down. Sekarang,

pengumpulan menyalurkan daya listrik ke gardu induk distribusi. Di gardu induk distribusi, tegangan diturunkan lagi menjadi 380/220 V dengan bantuan transformator step-down. Di sini, tegangan antara dua saluran, yang juga disebut *tegangan saluran*, adalah 280 V sedangkan tegangan antara satu saluran dan netral, yang disebut *tegangan fasa*, adalah 220 V. Akhirnya, distributor digunakan untuk memasok daya ke berbagai konsumen.

2.2 Diagram Segaris

Definisi diagram satu garis adalah sebuah diagram atau gambar listrik yang merepresentasikan komponen-komponen sistem instalasi listrik yang diwakilkan oleh simbol-simbol, dan menggambarkan bagaimana komponen-komponen itu berhubungan. Kadang diagram atau gambar garis tunggal instalasi listrik ini disebut juga *one-line diagram*. Pada artikel ini kita akan membahas sekilas tentang apa itu SLD kelistrikan, jenis diagram listrik, pentingnya serta manfaat, diagram satu garis atau *single line diagram*. Juga akan dibahas apa pentingnya atau perlunya memperbarui atau memperbarui dokumen gambar instalasi listrik secara rutin untuk keperluan keandalan, pengoperasian maupun keselamatan kerja listrik (*electrical safety*).

Suatu sistem tiga fasa yang simetris selalu dipecahkan per satu fasa dengan menggambarkan diagram segaris (*single line diagram*). Diagram segaris memiliki tujuan untuk memberikan semua informasi yang perlu dalam bentuk yang sesuai dengan kondisi sistem sebenarnya. Diagram segaris itu berbeda-beda sesuai dengan studi yang akan dilakukan.

Pada persoalan-persoalan dalam sistem tenaga adalah : aliran daya (*load flow*), hubung singkat (*short circuit*), operasi ekonomi, kestabilan peralihan, pengaturan-pengaturan daya reaktif dan tegangan seta pelepasan beban. Dilihat dari batasan waktu, persoalan-persoalan diatas dapat dikelompokkan dalam tiga kelompok keadaan yaitu: keadaan *steady*, keadaan peralihan, dan keadaan subperalihan.

Pada suatu aliran daya dan operasi ekonomi yang dibutuhkan adalah besaran-besaran dalam keadaan *steady*, pada studi kestabilan peralihan dibutuhkan besaran-besaran dalam keadaan peralihan dan pada hubung singkat dibutuhkan besaran-besaran dalam keadaan sub-peralihan.

BAB 3 ALIRAN DAYA PADA SISTEM KELISTRIKAN

PENDAHULUAN

Sistem tenaga listrik terdiri dari tiga komponen utama, yaitu pembangkitan, transmisi, dan distribusi energi listrik. Untuk menjamin keandalan dan efisiensi dalam pengoperasian sistem tersebut, diperlukan suatu kajian teknis yang mampu menggambarkan kondisi operasional jaringan secara menyeluruh. Salah satu analisis dasar dan paling penting dalam sistem tenaga listrik adalah analisis aliran daya (*load flow analysis*).

Analisis aliran daya bertujuan untuk menentukan besarnya tegangan, sudut fasa, daya aktif (P), dan daya reaktif (Q) pada setiap bus (node) dalam sistem tenaga listrik. Informasi ini sangat penting untuk memastikan bahwa energi listrik didistribusikan secara merata dan sesuai kebutuhan, tanpa menimbulkan gangguan operasional seperti kelebihan beban, tegangan rendah/tinggi, atau kerugian daya yang tinggi.

Metode aliran daya digunakan dalam perencanaan dan pengoperasian sistem tenaga, terutama untuk:

- Menentukan kondisi *steady-state* sistem kelistrikan.
- Mengevaluasi kapasitas saluran dan transformator.
- Membantu pengambilan keputusan dalam penambahan pembangkit, saluran baru, atau beban.
- Mempersiapkan sistem terhadap gangguan atau perubahan konfigurasi.

Beberapa metode yang umum digunakan dalam perhitungan aliran daya antara lain adalah metode Newton-Raphson, Gauss-Seidel, dan Fast Decoupled Load Flow. Pemilihan metode sangat bergantung pada ukuran dan kompleksitas sistem, serta tingkat ketelitian yang diinginkan.

Dengan melakukan analisis aliran daya secara sistematis, operator dan perencana sistem tenaga dapat mengoptimalkan kinerja jaringan listrik, meminimalkan kerugian, serta menjaga stabilitas dan kontinuitas pasokan listrik kepada konsumen.

TABEL CAPAIAN

| | |
|---|--|
| CAPAIAN PEMBELAJARAN MATA KULIAH (CPMK) | Mampu menganalisis studi aliran daya menggunakan metode iterasi numerik |
| SUB-CPMK | Mahasiswa akan mampu menghitung secara matematis aliran daya menggunakan menggunakan metode yang tepat |

ISI

3.1 Busbar

Bus berasal dari kata “busbar”. Dalam tiap bus, ada 4 hal yang ingin kita ketahui nilainya:

1. Daya Aktif, P
2. Daya Reaktif, Q
3. Besar Tegangan, $|V|$
4. Sudut Tegangan, δ

Dalam tiap bus di sistem yang dianalisis, dua dari empat hal di atas akan diketahui, sedang dua lainnya yang akan dicari. Tiap bus dalam sistem dapat dikelompokkan berdasarkan dua hal yang diketahui tersebut. Biasanya bus dikelompokkan sebagai berikut:

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 dianalisis (biasanya ada lebih dari satu bus yang memiliki sumber daya aktif dan reaktif). Sifat dari sebuah solusi sering dipengaruhi oleh pemilihan slack bus.

Slack bus juga sering disebut sebagai *Reference bus*. Artinya, bus lain dibandingkan propertinya terhadap *reference bus* ini. Oleh sebab ini lah, 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 ini 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. 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*.

| Voltage Control | | | |
|-----------------|-----------|---|-------------------------|
| Mvar Output | 4.180 | Regulated Bus Number | 1 |
| Min Mvars | -9900.000 | <input checked="" type="checkbox"/> Available for AVR | SetPoint Voltage 1.0500 |
| Max Mvars | 9900.000 | <input type="checkbox"/> Use Capability Curve | Remote Reg % 100.0 |

Gambar 3. 1 Nameplate PQ bus

3. 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). Daya reaktif yang diinjeksikan ke dalam bus ini bersifat variabel, artinya dapat berubah-ubah dalam batas tertentu (batas atas dan batas bawah). P-V Bus harus mempunyai sumber daya reaktif variabel, contohnya terhubung dengan generator. Dalam kenyataan, biasanya kita akan menganggap P-V Bus sebagai Generator Bus karena generator memiliki kemampuan mengubah-ubah (variabel) daya reaktifnya, untuk menjaga agar besar tegangan di busnya tetap.

3.2 Aliran Daya

Definisi studi aliran daya atau *load flow study* adalah analisis numerik aliran tenaga listrik dalam sebuah sistem kelistrikan. Studi aliran daya – kadang disebut juga studi aliran beban – juga merupakan analisa dan asesmen terhadap kondisi *steady-state* sistem listrik. Sasarannya adalah untuk mengetahui aliran tenaga, arus, tegangan, daya nyata (*real power*) dan daya reaktif (*reactive power*) dalam suatu sistem dalam kondisi beban apa pun. Studi aliran daya diperlukan selama fase desain proyek baru atau ketika mengevaluasi perubahan dan ekspansi sistem kelistrikan yang ada.

Melalui analisa aliran beban kita dapat mendapat informasi tentang level tegangan (V) dan sudut fasa tegangan (δ) di setiap bus dalam kondisi steady-state.

Ini penting karena besarnya tegangan bus harus dipertahankan dalam batas yang ditetapkan. Setelah sudut dan level tegangan bus dihitung menggunakan aliran daya, besar dan deviasi daya reaktif (Q) dan nyata (P) yang melalui setiap saluran dapat dihitung. Juga berdasarkan perbedaan antara aliran daya di ujung pengirim dan penerima, rugi-rugi di jalur tertentu juga dapat dihitung. Selain itu, kita juga dapat mengetahui status beban lebih dan kurang. Solusi aliran daya sangat penting untuk evaluasi berkelanjutan atas kinerja sistem tenaga sehingga tindakan pengendalian yang sesuai dapat diambil jika diperlukan.

3.3 Gauss Seidel (Pertemuan 3)

Metode iterasi Gauss-Seidel adalah metode yang menggunakan proses iterasi hingga diperoleh nilai-nilai yang berubah-ubah dan akhirnya relatif konstan. Metode Gauss-Seidel digunakan untuk menyelesaikan sistem persamaan linear berukuran besar proporsi keofisien nolnya besar, seperti sistem-sistem yang banyak ditemukan dalam sistem persamaan diferensial. Metode iterasi Gauss-Seidel dikembangkan dari gagasan metode iterasi pada solusi persamaan tak linear. Teknik iterasi jarang digunakan untuk menyelesaikan sistem persamaan linear berukuran kecil karena metode-metode langsung seperti metode eliminasi Gauss lebih efisien daripada metode iteratif. Akan tetapi, untuk sistem persamaan linear berukuran besar dengan persentase elemen nol pada matriks koefisien besar, teknik iterasi lebih efisien daripada metode langsung dalam hal penggunaan memori komputer maupun waktu komputasi. Dengan metode iterasi Gauss-Seidel toleransi pembulatan dapat diperkecil karena dapat meneruskan iterasi sampai solusinya seteliti mungkin dengan batas toleransi yang diperbolehkan.

1. Persiapan Data Sistem:

- Data bus (jenis bus: slack, PV, PQ).
- Data saluran (impedansi, admittansi, dan susunan matriks Y-bus).
- Toleransi konvergensi dan tegangan awal (biasanya $1\angle 0^\circ$ pu untuk semua bus selain bus slack).

2. Perhitungan Awal:

- Tegangan awal di setiap bus ditentukan.

BAB 4 PENGENALAN ETAP (ALIRAN DAYA)

PENDAHULUAN

Dalam perancangan dan analisis sebuah sistem tenaga listrik, sebuah software aplikasi sangat dibutuhkan untuk merepresentasikan kondisi real. Hal ini dikarenakan sulitnya menguji coba suatu sistem tenaga listrik dalam skala yang besar terhadap kondisi transien yang ekstrim. *ETAP Power Station 6.0.0* merupakan salah satu software aplikasi yang banyak digunakan untuk mensimulasikan sistem tenaga listrik. Secara umum ETAP dapat digunakan untuk simulasi hasil perancangan dan analisis suatu sistem tenaga listrik yang meliputi:

1. Menggambarkan denah beban-beban
2. Men-setting data-data beban dan jaringan
3. Merancang diagram satu garis (*One Line Diagram*)
4. Menganalisis aliran daya (*Load Flow*)
5. Menghitung gangguan hubung singkat (*Short Circuit*)
6. Menganalisis Motor Starting atau keadaan Transien.

TABEL CAPAIAN

| | |
|---|--|
| CAPAIAN PEMBELAJARAN MATA KULIAH (CPMK) | Mampu menganalisis studi aliran daya menggunakan metode iterasi numerik |
| SUB-CPMK | Mahasiswa akan mampu menganalisis aliran daya menggunakan metode iterasi pada <i>software</i> ETAP |

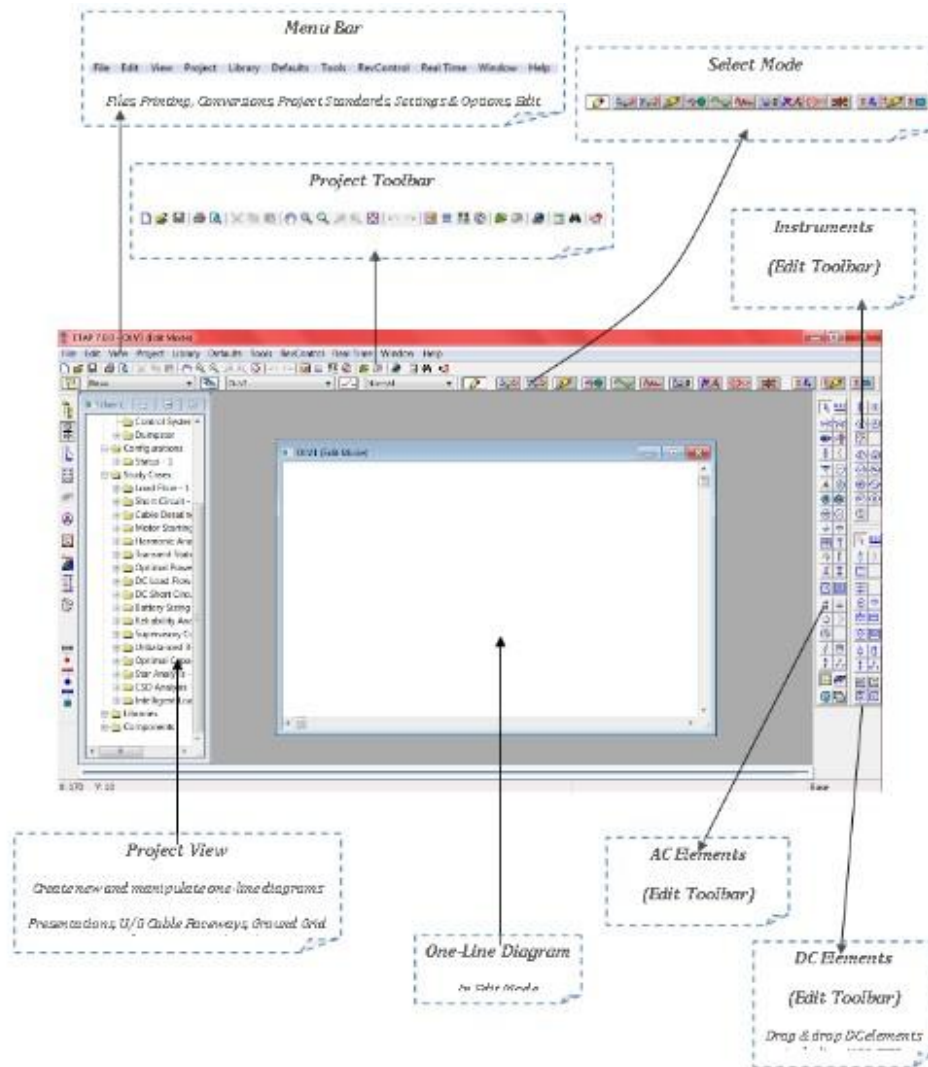
Penggunaan Program ATP / EMTP

Electromagnetic Transient Program (EMTP) dikembangkan pada *domain public* di *Bonneville Power Administration* (BPA) Portland. Program ini mampu memperkirakan hasil dari variabel tertentu (tegangan dan arus) pada sebuah rangkaian listrik dalam fungsi waktu. Digunakan secara luas untuk studi analisa *switching*, surja petir, gangguan hubung singkat, koordinasi isolasi, harmonisa dan keandalan sistem tenaga listrik, dsb.

Setiap komponen Sistem Tenaga Listrik dapat digambarkan dalam worksheet atau ruang kerja program dengan lambang-lambang tertentu. Spesifikasi

masing-masing komponen dapat disesuaikan keadaan sebenarnya atau kondisi nyata di lapangan. Spesifikasi ini juga dapat dipilih sesuai data umumnya yang dapat diambil dari library atau data yang ada pada program. Misalnya, panjang dan ukuran kabel, kapasitas dan rating trafo, kapasitas dan tegangan beban dan lain-lain.

Adapun tampilan Program ETAP *Power Station* sebagaimana tampak ada gambar berikut:



Gambar 4.1 Tampilan program ETAP dan keterangan singkatnya

4.1 Gambar Sistem

Komponen Sistem Tenaga Listrik yang digunakan.

1. *Power Grid* merupakan sumber tegangan yang ideal, artinya sumber tegangan yang mampu mensuplai daya dengan tegangan tetap sekalipun

daya yang diserap cukup besar. *Power Grid* dapat berupa sebuah generator yang besar, atau sebuah Gardu Induk yang merupakan bagian dari sebuah sistem tenaga listrik interkoneksi yang cukup besar.

2. Transformator atau trafo adalah sebuah alat untuk menaikkan atau menurunkan tegangan sistem. Spesifikasi yang pokok pada sebuah trafo adalah:
 - Kapasitas trafo yaitu daya maksimum yang dapat bekerja pada trafo terus- menerus tanpa mengakibatkan kerusakan
 - Tegangan primer dan sekunder trafo.
 - Impedansi trafo yang merupakan gabungan antara resistansi kawat dan reaktansi kumparan trafo.
 - Tap trafo yang dapat digunakan untuk mengubah perbandingan antara kumparan primer dengan kumparan sekunder dari perbandingan semula.
3. Busbar atau sering disingkat bus, yaitu tempat penyambungan beberapa komponen sistem tenaga listrik (saluran transmisi, jaringan distribusi, *Power Grid*, beban atau generator). Level tegangan bus disesuaikan dengan level tegangan yang dihubungkan dengan bus tersebut.
4. Beban yaitu peralatan listrik yang memanfaatkan atau menyerap daya dari jaringan. Salah satu jenis beban sistem tenaga listrik adalah *Static load*, merupakan beban yang tidak banyak mengandung motor listrik, sehingga tidak banyak mempengaruhi tegangan sistem ketika start. Spesifikasi yang pokok pada sebuah *Static Load* adalah kapasitas daya dan faktor daya atau $\cos \Theta$.

4.2 Daya Listrik dan Faktor Daya

Pada listrik arus bolak-balik dikenal tiga besaran daya yang biasanya disebut segitiga daya yang digambarkan dengan sebuah segitiga siku-siku, yaitu:

- Daya aktif atau daya nyata, merupakan daya yang diserap beban yang selanjutnya diubah menjadi energi lain. Daya aktif mempunyai satu watt (W). Daya aktif ini digambarkan sebagai sisi mendatar segitiga daya.

- Daya reaktif, merupakan daya yang diserap beban yang mengandung lilitan yang selanjutnya diubah menjadi medan magnet pada motor atau trafo. Daya reaktif mempunyai satuan volt-ampere-reaktif (VAR). Daya aktif ini digambarkan sebagai sisi tegak segitiga daya.
- Daya semu, merupakan gabungan atau penjumlahan kedua besaran daya tersebut. Daya semu mempunyai satuan volt-ampere (VA). Daya aktif ini digambarkan sebagai sisi miring segitiga daya. Daya inilah yang harus dikirim oleh sumber ke beban melalui saluran atau jaringan.

Hubungan ketiga besaran daya tersebut dinyatakan dengan:

$$S^2 = P^2 + Q^2 \text{ atau sering dinyatakan dalam bentuk } S = P + j Q$$

Pada segitiga daya, antara daya semu (S) dan daya aktif (P) akan membentuk sudut tertentu (Θ), yang besarnya dipengaruhi oleh nilai masing-masing daya tersebut. Sudut inilah yang menjadikan adanya nilai faktor daya atau $\cos \Theta$ yang merupakan perbandingan antara daya aktif dengan daya semu. Daya semu (S) inilah yang mempengaruhi nilai arus yang mengalir pada jaringan.

Hubungan antara tegangan dan arus jaringan adalah:

Daya semu = tegangan sistem x arus yang mengalir pada jaringan atau

$$S = V \times I$$

Daya aktif = daya semu x faktor daya atau

$$P = S \times \cos \Theta$$

BAB 5 HUBUNG SINGKAT

PENDAHULUAN

Sistem tenaga listrik terdiri dari tiga komponen utama, yaitu pembangkitan, transmisi, dan distribusi energi listrik. Untuk menjamin keandalan dan efisiensi dalam pengoperasian sistem tersebut, diperlukan suatu kajian teknis yang mampu menggambarkan kondisi operasional jaringan secara menyeluruh. Salah satu analisis dasar dan paling penting dalam sistem tenaga listrik adalah analisis aliran daya (*load flow analysis*).

Analisis aliran daya bertujuan untuk menentukan besarnya tegangan, sudut fasa, daya aktif (P), dan daya reaktif (Q) pada setiap bus (node) dalam sistem tenaga listrik. Informasi ini sangat penting untuk memastikan bahwa energi listrik didistribusikan secara merata dan sesuai kebutuhan, tanpa menimbulkan gangguan operasional seperti kelebihan beban, tegangan rendah/tinggi, atau kerugian daya yang tinggi.

Metode aliran daya digunakan dalam perencanaan dan pengoperasian sistem tenaga, terutama untuk:

- Menentukan kondisi *steady-state* sistem kelistrikan.
- Mengevaluasi kapasitas saluran dan transformator.
- Membantu pengambilan keputusan dalam penambahan pembangkit, saluran baru, atau beban.
- Mempersiapkan sistem terhadap gangguan atau perubahan konfigurasi.

Beberapa metode yang umum digunakan dalam perhitungan aliran daya antara lain adalah metode Newton-Raphson, Gauss-Seidel, dan Fast Decoupled Load Flow. Pemilihan metode sangat bergantung pada ukuran dan kompleksitas sistem, serta tingkat ketelitian yang diinginkan.

Dengan melakukan analisis aliran daya secara sistematis, operator dan perencana sistem tenaga dapat mengoptimalkan kinerja jaringan listrik, meminimalkan kerugian, serta menjaga stabilitas dan kontinuitas pasokan listrik kepada konsumen.

TABEL CAPAIAN

| | |
|---|--|
| CAPAIAN PEMBELAJARAN MATA KULIAH (CPMK) | Mampu mensimulasikan sistem tenaga listrik dalam keadaan <i>steady state/transient</i> , hubung singkat dan simetri/tak simetri menggunakan <i>software</i> ETAP |
| Sub-CPMK6 | Mahasiswa akan mampu mengidentifikasi konsep dasar hubung singkat pada sistem tenaga listrik |
| Sub-CPMK7 | Mahasiswa akan mampu menganalisis aliran daya akibat hubung singkat pada sistem kelistrikan yang sederhana |

ISI

5.1 Masalah Arus Hubung Singkat (Short Circuit)

Tenaga listrik disalurkan ke masyarakat melalui jaringan distribusi. Oleh sebab itu jaringan distribusi merupakan bagian jaringan listrik yang paling dekat dengan masyarakat. Jaringan distribusi dikelompokkan menjadi dua, yaitu jaringan distribusi primer dan jaringan distribusi sekunder.

Tegangan distribusi primer yang dipakai PLN adalah 20 kV, 12 kV, 6 KV. Pada saat ini, tegangan distribusi primer yang cenderung dikembangkan oleh PLN adalah 20 kV. Tegangan pada jaringan distribusi primer, diturunkan oleh gardu distribusi menjadi tegangan rendah yang besarnya adalah 380/220 V, dan disalurkan kembali melalui jaringan tegangan rendah kepada konsumen.

Dalam operasi sistem tenaga listrik sering terjadi gangguan – gangguan yang dapat mengakibatkan terganggunya penyaluran tenaga listrik ke konsumen. Gangguan adalah penghalang dari suatu sistem yang sedang beroperasi atau suatu keadaan dari sistem penyaluran tenaga listrik yang menyimpang dari kondisi normal. Suatu gangguan di dalam peralatan listrik didefinisikan sebagai terjadinya suatu kerusakan di dalam jaringan listrik yang menyebabkan aliran arus listrik keluar dari saluran yang seharusnya.

Berdasarkan ANSI/IEEE Std. 100-1992 gangguan didefinisikan sebagai suatu kondisi fisis yang disebabkan kegagalan suatu perangkat, komponen atau

suatu elemen untuk bekerja sesuai dengan fungsinya. Gangguan hampir selalu ditimbulkan oleh hubung singkat antar fase atau hubung singkat fase ke tanah.

Hubung singkat merupakan suatu hubungan abnormal (termasuk busur api) pada impedansi yang relatif rendah terjadi secara kebetulan atau disengaja antara dua titik yang mempunyai potensial yang berbeda. Istilah gangguan atau gangguan hubung singkat digunakan untuk menjelaskan suatu hubungan singkat.

Tujuan menganalisis gangguan pada jaringan distribusi adalah :

- a. Untuk menentukan arus maksimum dan minimum hubung singkat tiga fasa.
- b. Untuk menentukan arus gangguan tak simetris bagi gangguan satu dan dua line ke tanah, gangguan line ke line, dan rangkaian terbuka.
- c. Penyelidikan operasi rele-rele proteksi.
- d. Untuk menentukan kapasitas pemutus dari circuit breaker.
- e. Untuk menentukan distribusi arus gangguan dan tingkat tegangan busbar selama gangguan. (*Weedy, 1988 : 299*)

Klasifikasi gangguan yang terjadi pada jaringan distribusi (*Hutauruk, 1987 : 4*) adalah :

- a. Dilihat dari jenis gangguannya :
 - 1) Gangguan dua fasa atau tiga fasa melalui hubungan tanah
 - 2) Gangguan fasa ke fasa
 - 3) Gangguan dua fasa ke tanah
 - 4) Gangguan satu fasa ke tanah atau gangguan tanah
- b. Dilihat dari lamanya gangguan
 - 1) Gangguan permanen
 - 2) Gangguan temporer

Gangguan yang terdiri dari gangguan temporer atau permanen, rata-rata jumlah gangguan temporer lebih tinggi dibandingkan gangguan permanen. Kebanyakan gangguan temporer di amankan dengan *circuit breaker* (CB) atau pengaman lainnya.

Gangguan permanen adalah gangguan yang menyebabkan kerusakan permanen pada sistem. Seperti kegagalan isolator, kerusakan penghantar, kerusakan pada peralatan seperti transformator atau kapasitor. Pada saluran bawah tanah

BAB 6 GANGGUAN SIMETRIS DAN ASIMETRIS

PENDAHULUAN

Dalam sistem tenaga listrik, gangguan (*fault*) merupakan kondisi abnormal yang menyebabkan perubahan mendadak pada tegangan, arus, atau daya dalam jaringan. Gangguan dapat terjadi akibat berbagai faktor seperti petir, kerusakan peralatan, kesalahan manusia, atau kegagalan isolasi. Keberadaan gangguan dapat mengganggu kontinuitas suplai listrik, merusak peralatan, bahkan membahayakan keselamatan manusia. Oleh karena itu, penting dilakukan analisis gangguan untuk mendeteksi, mengklasifikasi, dan merespons gangguan secara cepat dan tepat. Secara umum, gangguan dalam sistem tenaga listrik dibagi menjadi dua jenis, yaitu gangguan simetris dan gangguan asimetris.

- Gangguan simetris adalah gangguan yang memengaruhi semua fasa secara seimbang, contohnya gangguan tiga fasa hubung singkat. Meskipun jarang terjadi, gangguan ini memiliki dampak yang sangat besar terhadap sistem dan biasanya digunakan sebagai acuan dalam perancangan sistem proteksi.
- Gangguan asimetris terjadi ketika hanya satu atau dua fasa yang terganggu, seperti gangguan satu fasa ke tanah, dua fasa hubung singkat, atau dua fasa ke tanah. Gangguan ini lebih sering terjadi dibandingkan gangguan simetris dan memerlukan pendekatan analisis yang lebih kompleks karena sistem menjadi tidak seimbang.

Analisis gangguan baik simetris maupun asimetris bertujuan untuk menentukan arus dan tegangan selama kondisi gangguan. Informasi ini digunakan dalam perancangan sistem proteksi, penentuan kapasitas pemutus (*circuit breaker*), serta penilaian keandalan sistem tenaga.

TABEL CAPAIAN

| | |
|---|--|
| CAPAIAN PEMBELAJARAN MATA KULIAH (CPMK) | Mampu mensimulasikan sistem tenaga listrik dalam keadaan <i>steady state/transient</i> , hubung singkat dan simetri/tak simetri menggunakan <i>software</i> ETAP |
| SUB-CPMK | Mahasiswa akan mampu melakukan perhitungan dengan gangguan simetris dan gangguan tidak simetris pada sistem tenaga |
| | |

ISI

6.1 Pengertian Gangguan pada Sistem Tenaga

A. Pengertian Gangguan

Gangguan dalam sistem tenaga listrik adalah kondisi abnormal yang menyebabkan perubahan signifikan dalam tegangan, arus, atau frekuensi sistem. Gangguan bisa mengakibatkan kerusakan pada peralatan, kehilangan daya, bahkan pemadaman total (blackout) jika tidak ditangani dengan cepat dan tepat. B.

Penyebab Gangguan

Gangguan bisa disebabkan oleh faktor internal maupun eksternal, antara lain:

- Hubung singkat (short circuit)
- Petir atau sambaran kilat
- Kegagalan isolasi
- Kerusakan alat (misalnya trafo, generator, atau saluran)
- Kesalahan operasi manusia
- Gangguan mekanis atau termal
- Kondisi cuaca ekstrem (angin, badai, salju)

C. Jenis Gangguan Berdasarkan Fasa

1. Gangguan Simetris

Definisi: Gangguan yang mempengaruhi ketiga fasa secara seimbang.

Contoh: Hubung singkat tiga fasa (3-phase short circuit).

Ciri-ciri:

- Jarang terjadi.
- Analisisnya paling sederhana karena sistem tetap simetris.
- Menyebabkan arus hubung singkat yang sangat tinggi.

2. Gangguan Asimetris

Definisi: Gangguan yang hanya memengaruhi satu atau dua fasa.

Jenis-jenis:

- Satu fasa ke tanah (*Single Line-to-Ground Fault* - SLG)
- Dua fasa (*Line-to-Line Fault* - LL)
- Dua fasa ke tanah (*Double Line-to-Ground Fault* - DLG)

Ciri-ciri:

- Lebih sering terjadi daripada gangguan simetris.
- Memerlukan metode komponen simetris untuk analisis.

Dampak Gangguan adalah Kerusakan peralatan (generator, trafo, *switchgear*)

- Penurunan tegangan di area yang luas
- Arus hubung singkat tinggi
- Gangguan pada kestabilan system
- Pemutusan pasokan daya ke konsumen
- Kebakaran atau ledakan akibat busur listrik

Penanganan Gangguan Sistem tenaga dilengkapi dengan sistem proteksi otomatis, seperti: relay proteksi (*overcurrent, distance, differential*), pemutus sirkuit (*circuit breaker*), sistem grounding, proteksi petir dan *surge arrester*. Tujuan utama penanganan adalah: mengisolasi bagian yang terganggu, menjaga stabilitas sistem secara keseluruhan dan mencegah kerusakan lanjutan.

6.2 Komponen Simetri

Untuk gangguan tiga phase seimbang cenderung disederhanakan dengan pendekatan per phase. Diagram satu garis sederhana untuk menyelesaikan masalah gangguan tiga phase seimbang dengan metode komponen simetris adalah untuk memecahkan penyelesaian rangkaian tidak seimbang ke dalam sebuah rangkaian yang seimbang.

Prinsip dasar komponen simetris adalah, suatu kumpulan tiga hubungan vektor yang tidak seimbang, yang dapat diuraikan menjadi tiga set vektor yang seimbang. Ketiga set vektor yang seimbang itu biasa disebut dengan komponen urutan positif, komponen urutan negatif, dan komponen urutan nol

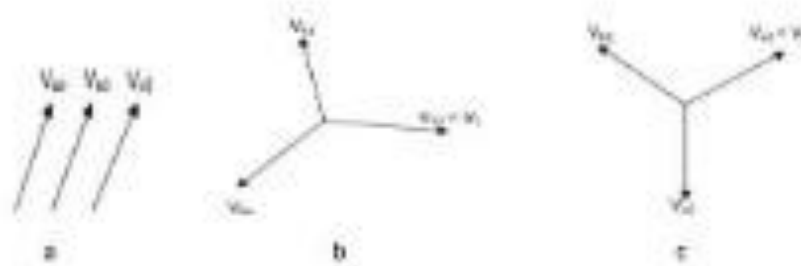
Penggunaan komponen simetris pada sistem tiga phase memerlukan suatu satuan fasor atau operator yang akan memutar rotasi fasor dengan fasor lainnya yang berbeda phase 120° .

Bila dipakai fasor operator satuan adalah a, maka:

$$a = -0.5 + j0.8666 \text{ dan } a^2 = -0.5 - j0.8666$$

Fasor tiga phase tidak seimbang dari sistem tiga phase dapat dipecahkan ke dalam fasor tiga phase seimbang sebagai berikut: [2]; [5]

1. Komponen urutan positif, terdiri dari seperangkat komponen tiga phase seimbang dan mempunyai urutan phase yang sama dengan fasor-fasor aslinya.
2. Komponen urutan negatif, terdiri dari tiga fasor yang sama besarnya, terpisah satu dengan yang lainnya dalam phase sebesar 120^0 , dan mempunyai urutan phase yang berlawanan dengan fasor aslinya.
3. Komponen urutan nol, terdiri dari tiga phasor dengan magnitude yang sama besar dan pergeseran phase nya adalah nol



Gambar 6. 1 Rangkaian (a) komponen urutan nol, (b) komponen urutan positif dan (c) komponen urutan negatif

Dalam menyelesaikan permasalahan gangguan hubung singkat dengan menggunakan aturan komponen simetris bahwa ketiga phase dari sistem dinyatakan sebagai a,b,c. Dengan cara demikian sehingga urutan phase tegangan dan arus dalam sistem adalah abc. Jadi, untuk urutan phase dari komponen urutan positif dari fasor tak seimbang adalah abc, sedangkan urutan phase dari komponen urutan negatif adalah acb. Jika fasor aslinya adalah tegangan, maka tegangan tersebut dapat dinyatakan dengan V_a, V_b , dan V_c . Ketiga himpunan komponen simetris dinyatakan dengan subskrip tambahan 1 untuk komponen urutan positif, 2 untuk komponen urutan negatif, dan 0 untuk komponen urutan nol. Komponen urutan positif dari V_a, V_b , dan V_c adalah V_{a1}, V_{b1} , dan V_{c1} . Demikian pula, komponen urutan negatif adalah V_{a2}, V_{b2} , dan V_{c2} , sedangkan komponen urutan nol adalah V_{a0}, V_{b0} , dan V_{c0} [6]. Gambar 2.2 menunjukkan tiga himpunan komponen simetris.

Komponen simetris arus tak seimbang:

$$I_{a0} = 1/3 (I_a + I_b + I_c)$$

$$I_{a1} = 1/3 (I_a + aI_b + a^2I_c)$$

$$I_{a2} = 1/3 (I_a + a^2I_b + aI_c)$$

Komponen simetris tegangan tak seimbang adalah:

$$V_{a0} = 1/3 (V_a + V_b + V_c)$$

$$V_{a1} = 1/3 (V_a + aV_b + a^2V_c)$$

$$V_{a2} = 1/3 (V_a + a^2V_b + aV_c)$$

Gangguan yang sering terjadi pada sistem tenaga listrik merupakan gangguan tidak simetris sehingga memerlukan metode komponen simetris untuk menganalisa tegangan dan arus pada saat terjadinya gangguan. Gangguan yang terjadi dapat dianalisis dengan menghubungkan singkatakan semua sumber tegangan yang ada pada sistem dan mengganti titik (node) gangguan dengan sebuah sumber tegangan yang besarnya sama dengan tegangan sesaat sebelum terjadinya gangguan di titik gangguan tersebut. Dengan menggunakan metode ini sistem 3 phase tidak seimbang dapat direpresentasikan dengan menggunakan teori komponen simetris yaitu berdasarkan komponen urutan positif, komponen urutan negatif dan komponen urutan nol.

6.3 Gangguan Asimetris pada Sistem Tenaga Listrik

Gangguan pada sistem tenaga listrik adalah segala macam kejadian yang menyebabkan kondisi pada sistem tenaga listrik menjadi abnormal. Salah satu yang menyebabkan kondisi ini adalah gangguan hubung singkat. Gangguan hubung singkat dibagi menjadi dua yaitu:

- a. Gangguan simetris, misalnya 3 fasa ke tanah
- b. Gangguan tidak simetris, misalnya : satu fasa ke tanah, hubung singkat dua fasa dan hubung singkat dua fasa ke tanah.

1. Gangguan Asimetris Pada Sistem Tenaga Listrik

Secara umum besarnya arus gangguan dihitung menggunakan rumus:

$$I_{fault} = \frac{V_{source}}{Z_s + Z_L + Z_f}$$

Dimana,

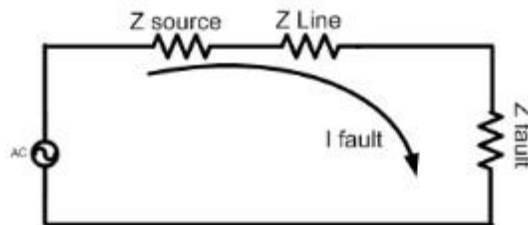
I fault : Arus gangguan

Vsource : tegangan sistem.

Zs : impedansi peralatan sistem.

- ZL : impedansi saluran sistem.
 Zf : impedansi gangguan misalnya : busur, tahanan tanah.

Titik di mana konduktor menyentuh tanah selama gangguan biasanya disertai dengan sebuah busur (arc). Busur ini bersifat resistif, namun resistansi busur besarnya sangat beragam. Resistansi gangguan besarnya tergantung resistansi busur serta tahanan tanah ketika terjadi gangguan ke tanah.



Gambar 6. 2 Gambar rangkaian pada keadaan gangguan

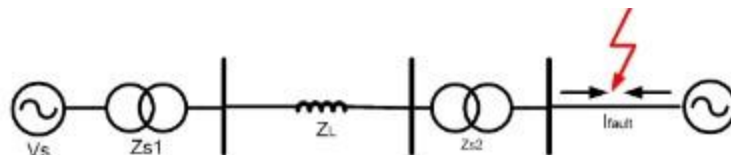
2. Gangguan Simetris

Gangguan simetris merupakan gangguan dimana besar magnitude dari arus gangguan sama pada setiap fasa. Gangguan ini terjadi pada gangguan hubung singkat tiga fasa. Perhitungan arus gangguan dari dihitung menggunakan persamaan (1), hanya saja ketika gangguan simetris terjadi, tidak terjadi busur dikarenakan konduktor tidak menyentuh tanah. Sehingga persamaannya menjadi :

$$I_{fault} = \frac{V_{source}}{Z_s + Z_L}$$

Dimana

- I fault : Arus gangguan
 Vsource : tegangan sistem.
 Zs : impedansi peralatan sistem.
 ZL : impedansi saluran sistem.



Gambar 6. 3 Diagram garis tunggal sederhana

Pada gambar 2.3 di atas jika kita ingin mencari besarnya gangguan pada Ifault , maka sesuai dengan persamaan besarnya arus gangguan hubung singkat tiga fasa adalah :

BAB 7 KONSEP DASAR STABILITAS DAYA

PENDAHULUAN

Stabilitas daya (*power system stability*) merupakan salah satu aspek krusial dalam pengoperasian sistem tenaga listrik. Stabilitas daya mengacu pada kemampuan sistem tenaga untuk tetap berada dalam kondisi seimbang dan mempertahankan sinkronisasi antar komponen (khususnya antar generator) setelah mengalami gangguan, baik besar maupun kecil. Gangguan tersebut dapat berupa gangguan petir, gangguan hubung singkat, perubahan beban mendadak, atau pemutusan elemen sistem seperti saluran transmisi dan transformator.

Sistem tenaga listrik yang stabil akan mampu kembali ke kondisi operasi normal setelah terganggu, tanpa menyebabkan kehilangan sinkronisasi, tegangan jatuh drastis, atau pemadaman menyeluruh (blackout). Sebaliknya, kegagalan dalam menjaga stabilitas dapat berakibat fatal, termasuk gangguan meluas, kerusakan peralatan, dan kerugian ekonomi yang besar.

Stabilitas daya diklasifikasikan ke dalam beberapa jenis, antara lain:

- Stabilitas sudut: kemampuan generator untuk mempertahankan sinkronisasi setelah gangguan.
- Stabilitas tegangan: kemampuan sistem menjaga tegangan dalam batas normal saat beban berubah.
- Stabilitas frekuensi: kemampuan sistem menjaga frekuensi tetap mendekati nilai nominal saat terjadi ketidakseimbangan daya.

Dalam sistem tenaga modern yang semakin kompleks dan terintegrasi dengan sumber energi terbarukan yang bersifat fluktuatif, analisis dan pengendalian stabilitas daya menjadi semakin penting. Pendekatan analisis dapat dilakukan melalui simulasi dinamis dan studi transien dengan bantuan perangkat lunak. Melalui pemahaman dan analisis stabilitas daya, sistem tenaga dapat dirancang dan dioperasikan secara lebih andal, efisien, dan tahan terhadap gangguan, demi menjamin kontinuitas dan kualitas suplai energi listrik kepada konsumen.

TABEL CAPAIAN

| | |
|---|--|
| CAPAIAN PEMBELAJARAN MATA KULIAH (CPMK) | Mampu mensimulasikan sistem tenaga listrik dalam keadaan <i>steady state/transient</i> , hubung singkat dan simetri/tak simetri menggunakan <i>software</i> ETAP |
| Sub-CPMK9 | Mahasiswa akan mampu menganalisis hubung singkat dan gangguan pada sistem tenaga listrik yang mengalami gangguan-gangguan dengan memperhatikan stabilitas sistem |

ISI

7.1 Faktor-faktor Utama dalam Masalah Kestabilan

Dalam keadaan operasi yang stabil dari sistem tenaga listrik terdapat keseimbangan antara daya *input* mekanis pada *prime mover* dengan daya *output* listrik (beban listrik) pada sistem.

Dalam keadaan ini semua generator berputar pada kecepatan sinkron. Hal ini terjadi bila setiap kenaikan dan penurunan beban harus diikuti dengan perubahan daya *input* mekanis pada *prime mover* dari generator-generator.

Bila daya *input* mekanis tidak cepat mengikuti dengan perubahan beban dan rugi-rugi sistem maka kecepatan rotor generator (frekuensi sistem) dan tegangan akan menyimpang dari keadaan normal terutama jika terjadi gangguan, maka sesaat terjadi perbedaan yang besar antara daya *input* mekanis dan daya *output* listrik dari generator. Kelebihan daya mekanis terhadap daya listrik mengakibatkan percepatan pada putaran rotor generator atau sebaliknya bila gangguan tersebut tidak dihilangkan segera maka percepatan (*acceleration*) dan perlambatan (*deceleration*) putaran rotor generator akan mengakibatkan hilangnya sinkronisasi dalam sistem.

Stabilitas sistem tenaga listrik adalah suatu kemampuan sistem tenaga listrik atau bagian komponennya untuk mempertahankan sinkronisasi dan keseimbangan dalam sistem. Batas stabilitas sistem adalah daya-daya maksimum yang mengalir melalui suatu titik dalam sistem tanpa menyebabkan hilangnya stabilitas.

Berdasarkan sifat gangguan masalah stabilitas sistem tenaga listrik dibedakan atas:

1. Stabilitas tetap (*steady state*).
2. Stabilitas peralihan (*transient*).
3. Stabilitas sub peralihan (dinamis).

Stabilitas *steady state* adalah kemampuan suatu sistem tenaga listrik mempertahankan sinkronisasi antara mesin-mesin dalam sistem setelah mengalami gangguan kecil (fluktuasi beban).

Stabilitas *transient* adalah kemampuan suatu sistem tenaga listrik mempertahankan sinkronisasi setelah mengalami gangguan besar yang bersifat mendadak sekitar satu ayunan (*swing*) pertama dengan asumsi bahwa pengatur tegangan otomatis belum bekerja.

Stabilitas dinamis adalah bila setelah ayunan pertama (periode stabilitas *transient*) sistem mampu mempertahankan sinkronisasi sampai sistem dalam keadaan seimbang yang baru (stabilitas *transient* bila AVR dan *governor* bekerja cepat dan diperhitungkan dalam analisis).

Pengertian hilangnya sinkronisasi adalah ketidakseimbangan antara daya pembangkit dengan beban menimbulkan suatu keadaan *transient* yang menyebabkan rotor dari mesin sinkron berayun karena adanya torsi yang mengakibatkan percepatan atau perlambatan pada rotor tersebut. Ini terjadi bila torsi tersebut cukup besar maka salah satu atau lebih dari mesin sinkron tersebut akan kehilangan sinkronisasinya, misalnya terjadi ketidakseimbangan yang disebabkan adanya daya pembangkit yang berlebihan, maka sebagian besar dari energi yang berlebihan akan diubah menjadi energi kinetik yang mengakibatkan percepatan sudut rotor bertambah besar walaupun kecepatan rotor bertambah besar, tidak besar bahwa sinkronisasi dari mesin tersebut akan hilang, faktor yang menentukan adalah perbedaan sudut rotor atau daya tersebut diukur terhadap referensi putaran sinkronisasi.

DAFTAR PUSTAKA

Utama:

- [1] John J. Grainger, William D. Stevenson, Jr., "Power System Analysis", McGraw-Hill Inc, 1994
- [2] Hadi Saadat, "Power System Analysis", McGraw-Hill Inc, 1999
- [3] M.E. El-Hawary, "Electric Power Systems : Design and Analysis", Reston Publishing Company, 1
- [4] C.A. Gross, " Power System Analysis", 2nd Edition, John Wiley & Sons,1983 [5] Turan Gonen,
"Modern Power System Analysis", John Wiley & Sons, 1988

Pendukung:

- [1] P. Kundur, Power System Stability and Control, Indian Edi. Palo Alto, California: McGrawHill,Inc, 1993.