

# **TRANSMISI DAN DISTRIBUSI TENAGA LISTRIK**



**DR. RAMADONI SYAHPUTRA**

**Program Studi Teknik Elektro  
Fakultas Teknik  
Universitas Muhammadiyah Yogyakarta**

## PRAKATA

### *Bismillaahirrahmaanirrahiim*

Syukur alhamdulillah penulis panjatkan ke hadirat ALLAH SWT atas segala rahmat dan karunia-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan naskah buku berjudul “Buku Ajar Transmisi dan Distribusi Tenaga Listrik”. Dengan penulisan buku ajar ini diharapkan dapat membantu para pembaca khususnya mahasiswa Jurusan Teknik Elektro untuk lebih mengenal dan memahami konsep sistem transmisi dan distribusi tenaga listrik. Buku ajar ini dapat digunakan oleh mahasiswa dan dosen khususnya Program Studi Teknik Elektro konsentrasi Sistem Tenaga Listrik sebagai acuan utama untuk mata kuliah Transmisi dan Distribusi Tenaga Listrik. Buku ajar ini dapat juga digunakan sebagai acuan tambahan untuk mata-mata kuliah yang berhubungan dengan sistem tenaga listrik seperti Pengantar Sistem Tenaga Listrik, Perlengkapan Sistem Tenaga Listrik, Proteksi Sistem Tenaga Listrik, Dinamika Sistem Tenaga Listrik, dan lain-lain.

Penyelesaian buku ajar ini tidak lepas dari beberapa pihak yang telah banyak membantu. Oleh karena itu bersama ini penulis menyampaikan terima kasih yang sedalam-dalamnya kepada:

1. Dr. Gunawan Budiyanto, sebagai Rektor Universitas Muhammadiyah Yogyakarta,
2. Jazaul Ikhsan, ST., MT., Ph.D., sebagai Dekan Fakultas Teknik UMY,
3. Seluruh dosen, karyawan, dan mahasiswa Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik UMY, yang telah banyak membantu dan memberikan masukan kepada penulis dan dalam mengemban tugas-tugas yang diamanahkan kepada penulis,
4. Isteriku tercinta Dr. Indah Soesanti, S.T., M.T., yang telah banyak membantu dan memberikan masukan yang sangat berguna dalam penyelesaian buku ajar ini,
5. Almarhumah Ibunda dan Almarhum Ayahanda, dua figur yang telah mendidik dan membesarkan penulis, doa Anda semoga husnul khatimah, aamiin ya robbal aalamiin, dan

6. Semua pihak yang telah membantu yang tidak dapat disebutkan satu per satu.

Semoga semuanya tercatat sebagai amal shalih yang mendapatkan balasan di dunia dan akhirat.

Penulis menyadari bahwa buku ajar ini masih jauh dari sempurna. Untuk itu segala kritik dan saran yang bersifat membangun akan penulis terima dengan lapang dada. Akhirnya, semoga buku ajar ini dapat bermanfaat dalam proses pembelajaran khususnya di Program Studi Teknik Elektro pada konsentrasi Sistem Tenaga Listrik.

Yogyakarta, Maret 2021

Penulis,

Dr. Ramadoni Syahputra

## DAFTAR ISI

PRAKATA .....	iii
DAFTAR ISI .....	v
1. PENGANTAR SISTEM TENAGA LISTRIK .....	1
1.1. Pendahuluan .....	1
1.2. Komponen Sistem Tenaga Listrik .....	8
2. PENGANTAR SISTEM TRANSMISI TENAGA LISTRIK .....	13
2.1. Pendahuluan .....	13
2.2. Klasifikasi Saluran Transmisi .....	15
2.3. Tegangan Saluran Transmisi .....	16
2.4. Komponen Utama Saluran Transmisi .....	18
2.4.1. Menara Transmisi .....	18
2.4.2. Isolator .....	18
2.4.3. Kawat Penghantar .....	19
2.4.4. Kawat Tanah .....	20
3. KARAKTERISTIK ELEKTRIK SALURAN TRANSMISI .....	21
3.1. Resistansi .....	22
3.2. Induktansi Dan Reaktansi Induktif Rangkaian Fase Tunggal .....	26
3.2.1. Fluks Magnetik pada Suatu Kawat Penghantar Panjang .....	26
3.2.2. Fluks Lingkup pada Posisi Kawat Balik Berdekatan .....	28
3.2.3.1 Induktansi Diri .....	31
3.2.3.2 Penggunaan Tabel untuk Konstanta Saluran .....	34
3.3. Geometric Mean Radius (GMR) dan Geometric Mean Distance (GMD) .....	35
3.3.1. Geometric Mean Radius (GMR) .....	35

3.3.2. Geometric Mean Distance (GMD) .....	36
3.4. Kapasitansi Dan Reaktansi Kapasitif Rangkaian	
Fase Tunggal .....	37
3.4.1. Kapasitansi .....	38
3.4.2. Reaktansi Kapasitif .....	40
4. REPRESENTASI SALURAN TRANSMISI .....	43
4.1. Pendahuluan.....	43
4.2. Klasifikasi Saluran Transmisi.....	46
4.2.1. Klasifikasi Saluran Transmisi untuk Keperluan Diagram Pengganti .....	46
4.2.2. Klasifikasi Saluran Transmisi Menurut Tegangan Kerja .....	47
4.2.3. Klasifikasi Saluran Transmisi Berdasarkan Fungsinya dalam Operasi.....	48
4.3. Diagram Pengganti Saluran Transmisi .....	48
4.3.1. Saluran Transmisi Jarak Pendek.....	48
4.3.2. Saluran Transmisi Jarak Menengah.....	50
4.3.2.1. Nominal T.....	50
4.3.2.2. Nominal $\pi$ .....	51
4.3.3 Saluran Transmisi Jarak Panjang.....	56
5. KONSTANTA-KONSTANTA UMUM SALURAN TRANSMISI .....	61
5.1. Rangkaian Kutub Empat .....	61
5.2. Saluran Transmisi Sebagai Kutub Empat .....	63
5.2.1. Saluran Transmisi Jarak Pendek.....	63
5.2.2. Saluran Transmisi Jarak Menengah.....	64
5.2.2.1 Nominal T.....	64
5.2.2.2 Nominal $\pi$ .....	65
5.2.3. Saluran Transmisi Jarak Panjang.....	67
6. KOMPENSASI PADA SALURAN TRANSMISI.....	69
6.1. Pendahuluan.....	69

6.2. Kompensasi Dengan Reaktor Shunt .....	73
6.3. Kompensasi Dengan Kapasitor Seri .....	80
<b>7. SISTEM DISTRIBUSI DAYA LISTRIK .....</b>	<b>83</b>
7.1. Pendahuluan .....	83
7.2. Subtransmisi .....	86
7.3. Gardu Induk Distribusi .....	89
<b>8. SISTEM DISTRIBUSI PRIMER DAN SEKUNDER .....</b>	<b>95</b>
8.1. Sistem Distribusi Primer .....	95
8.2. Sistem Distribusi Sekunder .....	100
8.3. Transformator Distribusi .....	103
8.3.1. Konstruksi Transformator Distribusi.....	103
8.3.2. Jenis Transformator.....	107
<b>9. RUGI-RUGI DALAM SISTEM DISTRIBUSI DAN USAHA MEMINIMALKANNYA .....</b>	<b>111</b>
9.1. Pendahuluan .....	111
9.2. Rekonfigurasi Jaringan Distribusi .....	112
9.3. Rekonfigurasi Jaringan Distribusi Menggunakan Metode Fuzzy-Multiobjective .....	115
<b>10. TOPOLOGI JARINGAN DISTRIBUSI .....</b>	<b>129</b>
10.1. Sistem Jaringan Distribusi Radial.....	130
10.2. Sistem Jaringan Distribusi Loop.....	132
10.3. Sistem Jaringan Distribusi Spindel.....	132
10.4. Hubung Singkat .....	135
10.5. Dampak Gangguan Hubung Singkat pada Jaringan Distribusi .....	137
<b>DAFTAR PUSTAKA .....</b>	<b>141</b>
<b>GLOSARIUM .....</b>	<b>143</b>

*« halaman ini sengaja dikosongkan »*

## NOMENKLATUR

$Q_{DG}$	Daya reaktif DG
$P_{loss}$	Fungsi objektif kerugian daya aktif
$i$	Jumlah cabang jaring distribusi
$j$	Jumlah bus jaring distribusi
$P_j$	Daya aktif yang melalui bus ke- $j$
$Q_j$	Daya aktif yang melalui bus ke- $j$
$n_b$	Jumlah cabang
$R_j$	Resistansi pada bus ke- $j$
$V_j$	Magnitudo tegangan pada bus ke- $j$
$V_{j,min}$	Magnitudo tegangan terendah pada bus ke- $j$
$V_{j,max}$	Magnitudo tegangan tertinggi pada bus ke- $j$
$I_{j,min}$	Batas magnitudo arus terendah pada bus ke- $j$
$I_{j,max}$	Batas magnitudo arus tertinggi pada bus ke- $j$
$P_{loss}$	Kerugian daya aktif
$P_j$	Kerugian daya aktif yang keluar dari bus $j$
$Q_j$	Kerugian daya reaktif yang keluar dari bus $j$
$R_i$	Resistansi pada bus $j$
$V_j$	Magnitudo tegangan pada bus $j$
$N_i$	Jumlah total cabang pada saat <i>switches</i> ke- $i$ ditutup
$P_{loss,i}$	Total kerugian daya aktif ketika cabang ke- $i$ dibuka
$P_{loss,B}$	Total kerugian daya aktif pra rekonfigurasi
$N_B$	Total jumlah bus dari sistem distribusi
$V_s$	Tegangan Gardu Induk, dalam p.u
$V_j$	Tegangan bus, dalam p.u.
$ I_{i,m} $	Magnitudo tegangan arus saat cabang- $m$ urutan ke- $i$ dibuka
$I_{c,m}$	Kapasitas saluran cabang - $m$ .
$V_k$	Tegangan bus pada iterasi ke- $k$
$Y_{jk}$	Admitansi bus pada iterasi ke- $k$

*« halaman ini sengaja dikosongkan »*



# **BAB I**

## **PENGANTAR PENGANTAR SISTEM TENAGA LISTRIK**

### **Tujuan Instruksional Umum:**

Memberikan wawasan dan tinjauan analitis mengenai transmisi dan distribusi tenaga listrik disertai perkembangan dan teknologinya dalam sistem tenaga listrik.

### **Tujuan Instruksional Khusus:**

1. Memberikan pengetahuan tentang pengantar sistem tenaga listrik.
2. Memberikan pengetahuan tentang kondisi kelistrikan nasional.
3. Memberikan pengetahuan tentang komponen sistem tenaga listrik.
4. Memberikan pengetahuan tentang dasar analisis sistem tenaga listrik.

## **1.1 PENDAHULUAN**

Berdasarkan data statistik PT PLN (Persero) tahun 2013, pencapaian rasio elektrifikasi seluruh Indonesia baru mencapai 78,06 % pada tahun 2013. Rasio ini Dengan pertumbuhan jumlah pelanggan rumah tangga dari 46.219.780 pelanggan pada akhir tahun 2012 menjadi 50.116.127 pelanggan pada akhir tahun 2013. Selanjutnya pada akhir Desember 2013, total kapasitas terpasang dan jumlah unit pembangkit PLN mencapai 34.206 MW dan 4.925 unit, dengan

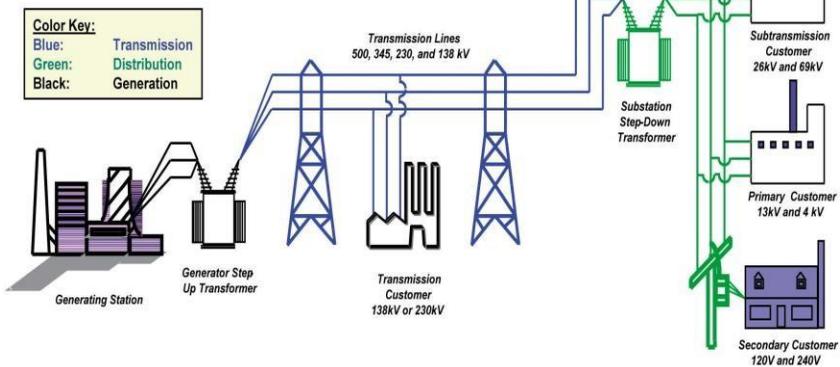
26.768 MW (78,26%) berada di Jawa. Total kapasitas terpasang meningkat 3,96% dibandingkan dengan akhir Desember 2012. Prosentase kapasitas terpasang per jenis pembangkit sebagai berikut : PLTU 15.554 MW (45,47%), PLTGU 8.814 MW (25,77%), PLTD 2.848 MW (8,33%), PLTA 3.520 MW (10,29%), PLTG 2.894 MW (8,46%), PLTP 568 MW (1,67%), PLT Surya dan PLT Bayu 8,37 MW (0,02%). Beban puncak pada tahun 2013 mencapai 30.834 MW, meningkat 6,76% dibandingkan tahun sebelumnya. Beban puncak sistem interkoneksi Jawa - Bali mencapai 22.575 MW, atau naik 6,30% dari tahun sebelumnya.

Teknologi pengembangan dan pemanfaatan energi telah memegang peranan penting dalam aspek sosial dan ekonomi baik skala kecil hingga besar, dari skala rumah tangga hingga taraf nasional dan internasional. Akan tetapi persoalan energi tidak berdiri sendiri, karena selalu terkait dengan persoalan lingkungan dan dampak ikutannya. Hingga saat ini negara-negara di dunia masih tergantung kepada bahan bakar fosil untuk menghasilkan energi listrik, terutama bahan bakar minyak dan batubara. Selain persoalan lingkungan yang diakibatkan pembangkit listrik dengan bahan bakar fosil ini, juga masalah ketersediaannya. Bahan bakar fosil merupakan jenis sumber energi yang tak-terbarukan (*non-renewable energy*), sehingga lambat laun persediaan semakin menipis dan berakibat pada kecenderungan harga yang semakin tinggi. Karena persoalan energi dengan bahan bakar fosil semakin lama menimbulkan persoalan yang menyulitkan, maka para ahli dari berbagai Negara telah melakukan terobosan-terobosan baru dengan menggiatkan pengelolaan sumber energi

terbarukan untuk membangkitkan energi listrik, di antaranya energi air, angin, surya, ombak laut, biomassa, dan lain-lain.

Pada awal perkembangannya, teknologi energi listrik dari sumber energi terbarukan masih bersifat parsial. Baik energi air, angin, surya, ombak laut, biomassa, dan lain-lain masih dirancang-bangun untuk menghasilkan listrik guna mengatasi persoalan kekurangan listrik pada daerah tertentu saja. Kapasitas pembangkitan energi listriknya juga bervariasi dari ukuran kecil berukuran beberapa puluh watt hingga berukuran sedang, yaitu hingga mega watt. Akan tetapi, perkembangan selanjutnya sejak awal abad ke-21 ini telah dilakukan berbagai upaya melalui penelitian-penelitian yang komprehensif tentang bagaimana mengintegrasikan pembangkit-pembangkit listrik energi terbarukan dengan jaringan listrik yang sudah ada (*interconnection system*). Integrasi pembangkit-pembangkit listrik energi terbarukan dengan jaringan listrik terinterkoneksi inilah yang dikenal dengan istilah pembangkitan terdistribusi (*distributed generation, DG*). Gambar 1.1 menunjukkan struktur dasar sistem tenaga listrik.

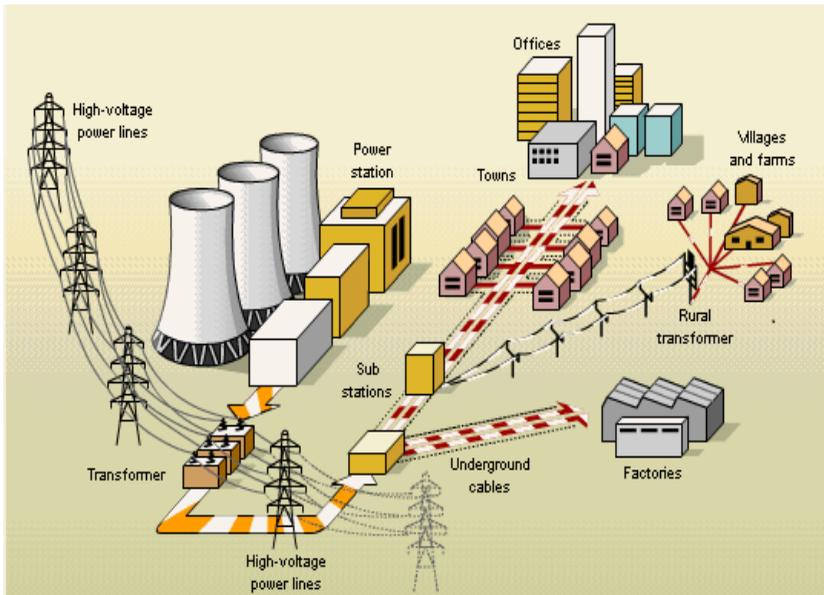
## Basic Structure of the Electric System



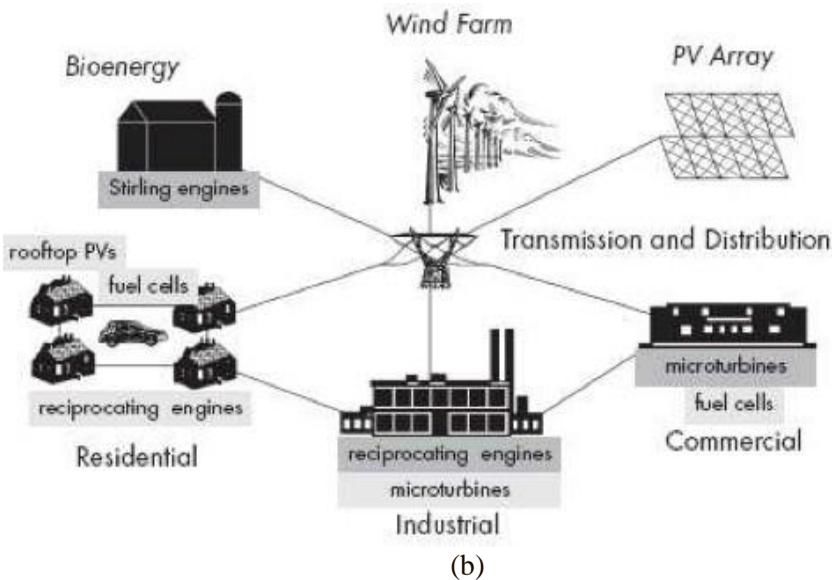
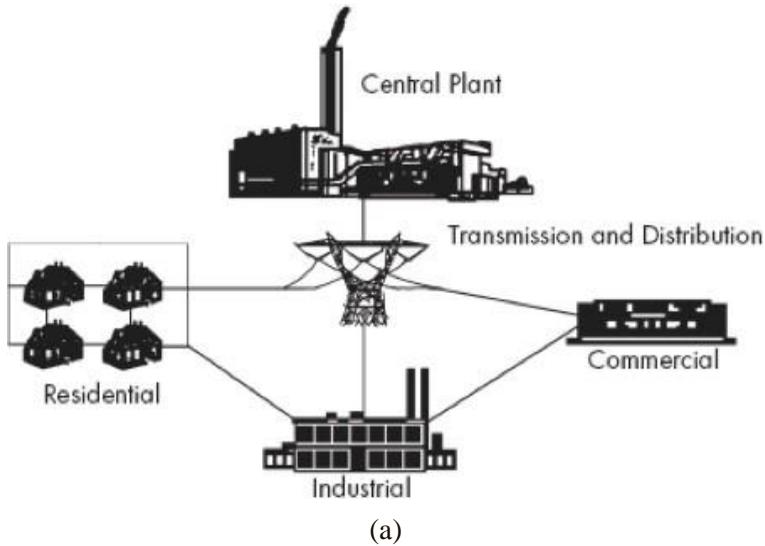
Gambar 1.1 Struktur dasar sistem tenaga listrik

Dewasa ini DG telah menjadi bagian penting dalam sistem tenaga listrik. Selama ini pembangkit-pembangkit listrik skala besar yang berasal dari pembangkit listrik tenaga uap (PLTU), pembangkit listrik tenaga nuklir (PLTN), pembangkit listrik tenaga air (PLTA), dan lain-lain, berlokasi di suatu tempat tertentu yang sering disebut dengan pembangkit listrik terpusat (*centralized generation*). Dengan demikian kehadiran DG memberikan kontribusi penting dalam rangka membantu pemerintah menyediakan energi listrik bagi masyarakat. Istilah *distributed generation* sejatinya bukan sesuatu yang baru, karena sistem interkoneksi jaringan listrik saat ini pada dasarnya adalah sistem yang merupakan *distributed generation*. Akan tetapi istilah *distributed generation* baru muncul belakangan ini karena lebih ditekankan kepada pembangkit listrik yang berkapasitas relative lebih kecil yang umumnya berasal dari sumber energi terbarukan untuk

diinterkoneksi dengan jaringan listrik yang sudah ada dimana selama ini dipasok oleh pembangkit listrik berkapasitas besar. Gambar 1.2 menunjukkan DG menjadi bagian penting dalam sistem tenaga listrik, sedangkan Gambar 1.3 menunjukkan konsep pembangkit listrik terpusat (*centralized generation*) dan pembangkit listrik tersebar (*distributed generation*).



Gambar 1.2 DG menjadi bagian penting dalam sistem tenaga listrik



Gambar 1.3 (a) Konsep pembangkit listrik terpusat (*centralized generation*) dan (b) Konsep pembangkit listrik tersebar (*distributed generation*)

Upaya mengintegrasikan berbagai pembangkit energi terbarukan ke dalam jaringan interkoneksi bukanlah persoalan yang sederhana. Sebagai contoh adalah pembangkit listrik tenaga surya (*solar cell*). Energi listrik yang dihasilkan pembangkit listrik tenaga surya adalah dalam bentuk arus searah (*direct current*, dc). Tegangan listrik dc yang dihasilkan juga bervariasi, selain tergantung kepada banyaknya sel surya yang dipasang, juga tergantung pada intensitas cahaya matahari yang menerpanya. Pertama-tama tegangan listrik dc yang dihasilkan sel surya harus dinaikkan tegangannya menggunakan konverter dc, karena aras tegangan jaringan listrik interkoneksi umumnya jauh lebih tinggi. Selanjutnya tegangan dc yang sudah ditinggikan tersebut diubah menjadi tegangan listrik bolak-balik pada frekuensi yang sama dengan frekuensi sistem (50 atau 60 Hz), menggunakan inverter. Demikian juga untuk jenis pembangkit listrik lain yang memiliki keunikan tersendiri, misalnya pembangkit listrik tenaga angin yang menghasilkan putaran turbin yang sangat bervariasi dari waktu ke waktu dalam sehari, karena kecepatan angin yang berubah-ubah. Untuk keperluan ini maka dibutuhkan sistem pengendalian yang andal agar putaran turbin angin yang rendah dan berubah-ubah dapat memutar generator dengan putaran yang tinggi dan stabil. Persoalan-persoalan seperti inilah yang penulis anggap menarik untuk diangkat dan dibahas di dalam buku ini, dan tentu saja bagaimana cara menanggulangnya berdasarkan hasil-hasil penelitian dari para pakar di dunia yang hasil-hasil penelitiannya dapat dibaca pada jurnal-jurnal internasional bereputasi tinggi.

## 1.2 KOMPONEN SISTEM TENAGA LISTRIK

Salah satu cara paling ekonomis, mudah dan aman untuk mengirimkan energi adalah melalui bentuk energi listrik. Energi listrik dapat secara kontinyu dikirimkan dari satu tempat ke tempat lain yang jaraknya berjauhan dalam suatu sistem tenaga listrik. Sistem tenaga listrik merupakan kumpulan dari komponen-komponen atau alat-alat listrik seperti generator, transformator, saluran transmisi, saluran distribusi, dan beban, yang dihubung-hubungkan dan membentuk suatu sistem.

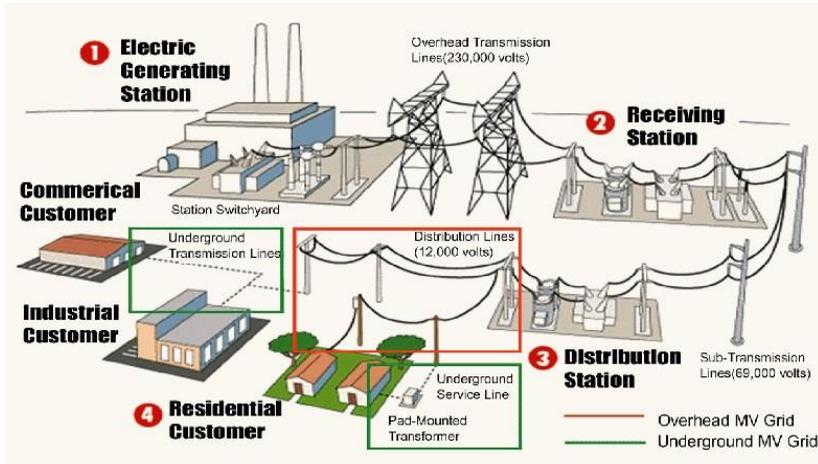
Industri tenaga listrik telah dimulai sejak tahun 1882 ketika pusat pembangkit daya listrik pertama yang bernama Pearl Street Elestric Station mulai beroperasi di kota New York, Amerika Serikat. Selanjutnya industri tenaga listrik sangat pesat perkembangannya, dan stasiun-stasiun pembangkitan dan jaringan transmisi dan distribusi telah bermunculan di berbagai negara.

Energi listrik merupakan energi yang sangat bermanfaat. Tidak dapat dipungkiri lagi bahwa manusia dewasa ini sudah demikian besar tingkat ketergantungannya terhadap energi listrik. Sehingga energi listrik bagi kebutuhan hidup manusia dewasa ini sudah hampir "setara" dengan oksigen. Bahkan ukuran kemajuan suatu negara dapat diukur dari tingkat konsumsi energi listriknya. Sebagai contoh Amerika Serikat yang merupakan negara sebagai negara yang sangat maju pada tahun 2000 mempunyai kapasitas terpasang pembangkit listrik total sekitar 1200 GW atau  $1,2 \times 10^{12}$  Watt. Dapat dibandingkan dengan negara kita tercinta, Indonesia, yang masih merupakan negara berkembang pada akhir tahun 2004

untuk sistem Jawa-Bali mempunyai kapasitas terpasang pembangkit listrik sekitar 20 GW. Konsumen listrik di Indonesia sebagian besar berada di Jawa-Bali, sehingga sebagian besar pembangkit listriknya terpusat di pulau Jawa dan Bali.

Secara umum, definisi sistem tenaga listrik meliputi sistem pembangkitan, sistem transmisi, dan sistem distribusi, yang secara garis besar ditunjukkan pada gambar 1.4. Belakangan ini sistem distribusi jika dilihat dari skala nasional, diperkirakan sama dengan biaya investasi fasilitas pembangkitan. Sistem distribusi bersama-sama dengan sistem pembangkitan berdasarkan pengalaman biasanya menelan biaya investasi hingga 80% dari total investasi yang dikeluarkan untuk sistem tenaga listrik.

Siklus aliran energi listrik pada sistem tenaga listrik dapat dijelaskan sebagai berikut. Pada pusat pembangkit, sumber daya energi primer seperti bahan bakar fosil (minyak, gas alam, dan batubara), hidro, panas bumi, dan nuklir diubah menjadi energi listrik. Generator sinkron mengubah energi mekanis yang dihasilkan pada poros turbin menjadi energi listrik tiga fasa. Melalui transformator *step-up*, energi listrik ini kemudian dikirimkan melalui saluran transmisi bertegangan tinggi menuju pusat-pusat beban.



Gambar 1.4. Komponen utama sistem tenaga listrik.

Peningkatan tegangan dimaksudkan untuk mengurangi jumlah arus yang mengalir pada saluran transmisi. Dengan demikian saluran transmisi bertegangan tinggi akan membawa aliran arus yang rendah dan berarti mengurangi rugi panas (*heat loss*)  $I^2R$  yang menyertainya. Ketika saluran transmisi mencapai pusat beban, tegangan tersebut kembali diturunkan menjadi tegangan menengah melalui transformator *step-down*. Di pusat-pusat beban yang terhubung dengan saluran distribusi, energi listrik ini diubah menjadi bentuk-bentuk energi terpakai lainnya seperti energi mekanis (motor), penerangan, pemanas, pendingin, dan sebagainya.

Energi listrik merupakan bentuk energi yang sangat bermanfaat. Kemajuan suatu negara dapat diukur berdasarkan konsumsi energi listrik pada negara tersebut. Energi listrik merupakan bentuk energi yang “menyenangkan”, karena dapat dengan mudah

disalurkan serta dikonversikan ke berbagai bentuk energi lain.

Energi listrik dibangkitkan pada pusat-pusat pembangkit tenaga listrik seperti pembangkit listrik tenaga air (PLTA), pembangkit listrik tenaga uap (PLTU), pembangkit listrik tenaga gas (PLTG), pembangkit listrik tenaga nuklir (PLTN), dan lain-lain. Pusat-pusat pembangkit listrik tersebut umumnya jauh dari daerah-daerah dimana energi listrik itu digunakan, yang disebut sebagai pusat-pusat beban (*load centres*). Oleh karena itu energi listrik yang dibangkitkan harus disalurkan melalui suatu saluran transmisi. Karena tegangan yang dihasilkan generator umumnya relatif rendah (berkisar 6 kV hingga 24 kV), maka tegangan ini biasanya dinaikkan dengan bantuan transformator daya ke tingkat tegangan yang lebih tinggi antara 30 kV sampai 500 kV ( di beberapa negara maju bahkan sudah sampai 1000 kV).

Tingkat tegangan yang lebih tinggi ini selain untuk memperbesar daya hantar saluran yang berbanding lurus dengan kuadrat tegangan, juga untuk memperkecil rugi-rugi daya dan jatuh tegangan pada saluran. Dengan mempertinggi tegangan, maka timbul suatu persoalan lain yaitu tingkat isolasi yang harus lebih tinggi, dengan demikian biaya peralatan juga semakin tinggi.

Penurunan tegangan dari tingkat tegangan transmisi pertamanya dilakukan di gardu induk (GI), dimana tegangan diturunkan ke tegangan yang lebih rendah misalnya dari 500 kV ke 150 kV, atau dari 150 kV ke 70 kV, dan sebagainya. Kemudian penurunan kedua dilakukan di gardu induk distribusi dari 150 kV ke 20 kV atau dari 70 kV ke 20 kV. Tegangan 20 kV ini disebut tegangan distribusi primer.

**Latihan:**

1. Gambarkan dan jelaskan komponen pokok sistem tenaga listrik serta jelaskan fungsinya masing-masing.
2. Jelaskan arti penting energi listrik bagi umat manusia dewasa ini.
3. Kemajuan suatu negara dapat diukur dari tingkat konsumsi energi listriknya. Analisislah apakah pernyataan tersebut dapat diterima. Buktikan dengan data-data tentang konsumsi energi listrik berbagai negara, baik negara maju maupun negara berkembang. Data-data dapat didapatkan dari berbagai sumber misalnya jurnal ilmiah, majalah, atau internet.

## **BAB II**

### **PENGANTAR SISTEM TRANSMISI TENAGA LISTRIK**

Tujuan Instruksional Umum:

Memberikan wawasan dan tinjauan analitis mengenai transmisi dan distribusi tenaga listrik disertai perkembangan dan teknologinya dalam sistem tenaga listrik.

Tujuan Instruksional Khusus:

1. Memberikan pengetahuan tentang pengantar sistem transmisi tenaga listrik.
2. Memberikan pengetahuan tentang klasifikasi saluran transmisi.
3. Memberikan pengetahuan tentang tegangan saluran transmisi.
4. Memberikan pengetahuan tentang komponen utama saluran transmisi.

#### **2.1 PENDAHULUAN**

Energi listrik merupakan bentuk energi yang sangat bermanfaat. Kemajuan suatu negara dapat diukur berdasarkan konsumsi energi listrik pada negara tersebut. Energi listrik merupakan bentuk energi yang “menyenangkan”, karena dapat dengan mudah disalurkan serta dikonversikan ke berbagai bentuk energi lain.

Energi listrik dibangkitkan pada pusat-pusat pembangkit tenaga listrik seperti pembangkit listrik tenaga air (PLTA),

pembangkit listrik tenaga uap (PLTU), pembangkit listrik tenaga gas (PLTG), pembangkit listrik tenaga nuklir (PLTN), dan lain-lain. Pusat-pusat pembangkit listrik tersebut umumnya jauh dari daerah-daerah dimana energi listrik itu digunakan, yang disebut sebagai pusat-pusat beban (*load centres*). Oleh karena itu energi listrik yang dibangkitkan harus disalurkan melalui suatu saluran transmisi. Karena tegangan yang dihasilkan generator umumnya relatif rendah (berkisar 6 kV hingga 24 kV), maka tegangan ini biasanya dinaikkan dengan bantuan transformator daya ke tingkat tegangan yang lebih tinggi antara 30 kV sampai 500 kV ( di beberapa negara maju bahkan sudah sampai 1000 kV).

Tingkat tegangan yang lebih tinggi ini selain untuk memperbesar daya hantar saluran yang berbanding lurus dengan kuadrat tegangan, juga untuk memperkecil rugi-rugi daya dan jatuh tegangan pada saluran. Dengan mempertinggi tegangan, maka timbul suatu persoalan lain yaitu tingkat isolasi yang harus lebih tinggi, dengan demikian biaya peralatan juga semakin tinggi.

Penurunan tegangan dari tingkat tegangan transmisi pertamanya dilakukan di gardu induk (GI), dimana tegangan diturunkan ke tegangan yang lebih rendah misalnya dari 500 kV ke 150 kV, atau dari 150 kV ke 70 kV, dan sebagainya. Kemudian penurunan kedua dilakukan di gardu induk distribusi dari 150 kV ke 20 kV atau dari 70 kV ke 20 kV. Tegangan 20 kV ini disebut tegangan distribusi primer.

## 2.2 KLASIFIKASI SALURAN TRANSMISI

Berdasarkan konstruksinya, saluran transmisi dibedakan atas saluran udara (*overhead lines*) dan saluran bawah tanah (*underground cable*). Saluran udara menyelurkan energi listrik melalui penghantar yang digantungkan pada menara atau tiang transmisi dengan perantaraan isolator, sedang saluran bawah tanah menyalurkan energi listrik melalui kabel-kabel yang ditanam di bawah permukaan tanah. Kedua jenis saluran transmisi itu masing-masing mempunyai kelebihan dan kekurangan. Dibandingkan dengan saluran udara, saluran bawah tanah tidak terpengaruh oleh cuaca buruk, taufan. Hujan deras, angin kencang, petir, dan gangguan alam lainnya. Selain itu saluran bawah tanah lebih estetik karena tidak mengganggu pemandangan, sehingga tampak lebih rapi. Karena alasan-alasan ini saluran bawah tanah lebih disukai terutama untuk daerah yang padat penduduknya seperti daerah perkotaan. Akan tetapi dari segi investasi saluran bawah tanah lebih besar dibandingkan dengan saluran udara. Selain itu perbaikannya juga lebih sukar jika terjadi gangguan hubung singkat, kabel putus, dan lain-lain.

Berdasarkan jenis arus yang digunakan, saluran transmisi dibedakan atas saluran transmisi arus bolak-balik (AC: alternating current) dan saluran transmisi arus searah (DC: direct current). Dalam sistem AC, penaikan dan penurunan tegangan transmisi dapat mudah dilakukan yaitu dengan menggunakan transformator. Karena alasan inilah sehingga dewasa ini saluran transmisi di dunia sebagian besar menggunakan saluran transmisi bolak-balik (AC). Dalam sistem transmisi AC ada yang menggunakan satu fase dan tiga fase. Sistem

tiga fase mempunyai beberapa keuntungan diantaranya:

1. daya yang disalurkan lebih besar,
2. nilai sesaatnya (instantaneous value) konstan, dan
3. mempunyai medan magnet putar.

Terkait dengan keuntungan-keuntungannya, dewasa ini hampir seluruh penyaluran energi listrik dilakukan dengan menggunakan arus bolak-balik. Namun, sejak beberapa tahun terakhir penyaluran menggunakan arus searah mulai dikembangkan di beberapa negara. Penyaluran dengan tegangan searah mempunyai beberapa keuntungan diantaranya:

1. isolasinya yang relatif sederhana,
2. daya guna (efisiensi) yang lebih tinggi (karena faktor dayanya 1), dan
3. tidak ada masalah stabilitas, sehingga dapat digunakan untuk jarak yang sangat jauh.

Akan tetapi persoalan ekonominya harus dihitung. Penyaluran tenaga listrik dengan sistem DC baru dapat dianggap ekonomis jika jarak saluran udara yang sangat jauh ( di atas 400 km) atau untuk saluran bawah tanah yang lebih dari 50 km. Hal ini disebabkan biaya peralatan pengubah AC ke DC atau sebaliknya (yaitu converter dan inverter equipment) sangat mahal.

## **2.3 TEGANGAN SALURAN TRANSMISI**

Untuk daya yang sama, jika tegangan transmisi ditinggikan maka rugi-rugi transmisi dapat diperkecil sehingga efisiensi transmisi akan naik. Akan tetapi peninggian tegangan transmisi berarti juga

penaikan isolasi dan biaya peralatan dan gardu induk. Oleh karena itu pemilihan tegangan dilakukan dengan memperhitungkan daya yang disalurkan, jumlah rangkaian, jenis penyaluran, keandalan (*reliability*), biaya peralatan untuk tegangan tertentu, serta tegangan-tegangan yang sekarang ada dan yang direncanakan. Kecuali itu, penentuan tegangan merupakan bagian dari perancangan sistem secara keseluruhan.

Meskipun masih belum jelas menyebutkan keperluannya sebagai tegangan transmisi di Indonesia, pemerintah telah menyeragamkan deretan tegangan tinggi seperti terlihat pada tabel 2.1.

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

Tabel 2.1. Tegangan tinggi yang berlaku di Indonesia

Tegangan Nominal (kV)	Tegangan Tertinggi untuk Peralatan (kV)
30	36
66	72,5
150	170
220	245
380	420
500	525

## 2.4 KOMPONEN UTAMA SALURAN TRANSMISI

Komponen-komponen utama saluran transmisi terdiri dari,

1. Menara transmisi atau tiang transmisi beserta fondasinya,
2. Isolator,
3. Kawat penghantar (*conductors*), dan
4. Kawat tanah (*ground wires*).

### 2.4.1 Menara Transmisi

Menara transmisi adalah suatu bangunan penopang saluran transmisi yang dapat berupa menara baja, tiang baja, tiang beton bertulang, atau tiang kayu. Tiang-tiang baja, beton, dan kayu umumnya digunakan pada saluran-saluran dengan tegangan kerja relatif rendah (di bawah 70 kV) sedang untuk saluran transmisi tegangan tinggi dan ekstra tinggi digunakan menara baja.

Menara baja diklasifikasikan berdasarkan fungsinya yaitu menara dukung, menara sudut, menara percabangan, dan menara transposisi.

### 2.4.2 Isolator

Isolator digunakan untuk mencegah hubung singkat antara kawat penghantar dengan menara. Jenis isolator yang digunakan pada saluran transmisi adalah jenis porselin atau gelas. Akhir-akhir ini telah banyak dikembangkan jenis-jenis isolator yang baru diantaranya polimer, epoksi resin, dan lain-lain.

Berdasarkan penggunaan dan konstruksinya, dikenal tiga jenis

isolator yaitu isolator jenis pasak, isolator jenis pos saluran, dan isolator gantung. Isolator jenis pasak dan pos saluran digunakan untuk saluran transmisi dengan tegangan kerja relatif rendah (kurang dari 33kV), sedang isolator gantung dapat digandeng menjadi rentengan isolator yang jumlahnya disesuaikan dengan kebutuhan.

### 2.4.3 Kawat Penghantar

Jenis-jenis kawat penghantar yang biasa digunakan pada saluran transmisi adalah tembaga dengan konduktivitas 100% (Cu 100%), tembaga dengan konduktivitas 97,5 % ( Cu 97,5%), dan aluminium dengan konduktivitas 61% (Al 61%). Kawat penghantar aluminium terdiri dari berbagai jenis dengan lambang sebagai berikut:

AAC = *All Aluminium Conductor*, yaitu kawat penghantar yang seluruhnya terbuat dari aluminium.

AAAC = *All Aluminium Alloy Conductor*, yaitu kawat penghantar yang seluruhnya terbuat dari campuran aluminium.

ACSR = *Aluminium Conductor Steel Reinforced*, yaitu kawat penghantar aluminium berinti kawat baja.

ACAR = *Aluminium Conductor Alloy Reinforced*, yaitu kawat penghantar aluminium yang diperkuat dengan campuran logam.

Kawat penghantar tembaga mempunyai beberapa kelebihan dibandingkan dengan kawat penghantar aluminium karena konduktivitas dan kuat tariknya lebih tinggi. Akan tetapi

kelemahannya ialah untuk besar hambatan yang sama, tembaga lebih berat dari aluminium dan juga lebih mahal. Oleh karena itu kawat penghantar aluminium telah menggantikan kawat tembaga.

Untuk memperbesar kuat tarik kawat aluminium digunakan campuran aluminium (*aluminium alloy*). Untuk saluran-saluran transmisi tegangan tinggi, dimana jarak antar menara sangat jauh, maka dibutuhkan kuat tarik yang lebih tinggi. Untuk itu digunakan kawat penghantar ACSR.

#### **2.4.4 Kawat Tanah**

Kawat tanah atau ground wires disebut juga kawat pelindung (*shield wires*). Kawat tanah berfungsi untuk melindungi kawat-kawat penghantar atau kawat fase terhadap sambaran petir. Dengan demikian kawat tanah dipasang di atas kawat fase. Bahan untuk kawat tanah umumnya dipakai baja (*steel wires*) yang lebih murah, tetapi sering juga digunakan kawat ACSR.

#### **Latihan:**

1. Jelaskan klasifikasi saluran transmisi berdasarkan konstruksinya dan berdasarkan jenis arus yang digunakan, seraf jelaskan kelebihan dan kekurangannya.
2. Jelaskan komponen pokok saluran transmisi udara.
3. Jelaskanlah mengapa pada sistem transmisi bahwa untuk pengiriman daya yang sama lebih menguntungkan menggunakan tegangan transmisi yang ditinggikan dibandingkan dengan arus yang ditinggikan.

## **BAB III**

### **KARAKTERISTIK ELEKTRIK SALURAN TRANSMISI**

#### Tujuan Instruksional Umum:

Memberikan wawasan dan tinjauan analitis mengenai transmisi dan distribusi tenaga listrik disertai perkembangan dan teknologinya dalam sistem tenaga listrik.

#### Tujuan Instruksional Khusus:

1. Memberikan pengetahuan tentang resistansi saluran transmisi.
2. Memberikan pengetahuan tentang induktansi dan reaktansi induktif saluran transmisi.
3. Memberikan pengetahuan tentang kapasitansi dan reaktansi kapasitif saluran transmisi.
4. Memberikan pengetahuan tentang analisis matematis karakteristik elektrik saluran transmisi tenaga listrik.

Karakteristik elektrik saluran transmisi adalah konstanta-konstanta saluran transmisi yaitu resistansi ( $R$ ), induktansi ( $L$ ), konduktansi ( $G$ ), dan kapasitansi ( $C$ ). Pada saluran udara, nilai konduktansi ( $G$ ) sangat kecil sehingga sering diabaikan. Dengan mengabaikan nilai konduktansi tersebut, maka perhitungan-perhitungan dalam saluran transmisi jauh lebih mudah.

### 3.1 RESISTANSI

Resistansi dari suatu konduktor (kawat penghantar) diberikan oleh persamaan berikut:

$$R = \rho l/A \dots \dots \dots (3.1)$$

dengan,  $\rho$  = resistivitas ( $\Omega m$ )

$l$  = panjang penghantar (m)

$A$  = luas penampang penghantar ( $mm^2$ )

Dalam tabel-tabel mengenai penghantar transmisi daya listrik, sering dijumpai penampang penghantar dalam satuan CM (Circular Mil). Circular Mil ialah penampang kawat yang mempunyai diameter 1 mil (=1/1000 inch). Jika penampang kawat diberikan dalam  $mm^2$ , maka penampang kawat dalam CM adalah:

$$CM = 1973 \times \text{Penampang dalam } mm^2$$

atau,

$$mm^2 = 5,067 \times 10^{-4} \times \text{Penampang dalam CM}$$

Dalam sistem MKS satuan untuk resistivitas  $\rho$  diberikan dalam ohm meter, panjang dalam meter, dan luas dalam meter kuadrat. Sistem yang lain (CGS), resistivitas dalam mikro ohm centimeter, panjang dalam centimeter, dan luas dalam centimeter kuadrat.

Karena umumnya kawat-kawat penghantar terdiri dari kawat pilin (stranded conductors), maka sebagai faktor koreksi untuk memperhitungkan pengaruh dari pilin itu, panjang kawat dikalikan dengan 1,02 (2% untuk faktor koreksi).

Resistansi penghantar berubah oleh temperatur. Dalam batas

temperatur 10°C hingga 100°C, maka untuk penghantar tembaga dan aluminium berlaku:

$$R_{t2} = R_{t1} [1 + \alpha_{t1} (t_2 - t_1)] \dots\dots\dots (3.2)$$

dengan,  $R_{t2}$  = resistansi pada temperatur  $t_2$

$R_{t1}$  = resistansi pada temperatur  $t_1$

$\alpha_{t1}$  = koefisien temperatur dari resistansi penghantar pada temperatur  $t_1$  °C.

Dari persamaan (3.2) dapat dibuat persamaan:

$$R_{t2} / R_{t1} = [1 + \alpha_{t1} (t_2 - t_1)] \dots\dots\dots (3.3)$$

$$R_{t2} / R_{t1} = (T_0 + t_2) / (T_0 + t_1)$$

dengan,

$$\alpha_{t1} = 1 / (T_0 + t_1)$$

atau,

$$T_0 = (1 / \alpha_{t1}) - t_1 \dots\dots\dots (3.4)$$

Dari persamaan di atas dapat dilihat bahwa  $-T_0$  ialah temperatur dimana resistansi penghantar akan menjadi nol, jika persamaan linier yang sama berlaku untuk daerah temperatur itu. Dan jika ini benar maka  $-T_0$  adalah sama dengan temperatur absolut - 273°C. Untuk tembaga (Cu) dengan konduktivitas 100%, koefisien temperatur dari resistansi pada 20°C adalah:

$$\alpha_{t1} = 0,00393$$

atau,

$$T_0 = (1 / 0,00393) - 20 = 234,5^\circ\text{C}$$

Untuk tembaga dengan konduktivitas 97,5%,

$$\alpha_{t1} = 0,00383$$

atau,

$$T_0 = (1/0,00383) - 20 = 241,0^\circ\text{C}$$

Untuk Aluminium dengan konduktivitas 61%,

$$\alpha_{t1} = 0,00403$$

atau,

$$T_0 = (1/0,00403) - 20 = 228,1^\circ\text{C}$$

Tabel 3.1. Koefisien temperatur dari material konduktor standar

Material	T <sub>0</sub> °C	Koefisien temperatur resistansi x 10 <sup>-3</sup>						
		α <sub>0</sub>	α <sub>20</sub>	α <sub>25</sub>	α <sub>50</sub>	α <sub>75</sub>	α <sub>80</sub>	α <sub>100</sub>
Cu 100%	234,5	4,27	3,93	3,85	3,52	3,25	3,18	2,99
Cu 97,5%	241,0	4,15	3,83	3,76	3,44	3,16	3,12	2,93
Al 61%	228,1	4,38	4,03	3,95	3,60	3,30	3,25	3,05

Tabel 3.2. Resistivitas bahan penghantar standar

Material	Resistivitas (mikro-Ohm-meter)						
	ρ <sub>0</sub>	ρ <sub>20</sub>	ρ <sub>25</sub>	ρ <sub>50</sub>	ρ <sub>75</sub>	ρ <sub>80</sub>	ρ <sub>100</sub>
Cu 100%	1,58	1,72	1,75	1,92	2,09	2,12	2,26
Cu 97,5%	1,63	1,77	1,80	1,97	2,14	2,18	2,31
Al 61%	2,60	2,83	2,89	3,17	3,46	3,51	3,74

Resistansi DC untuk perhitungan-perhitungan berdasarkan tabel di atas harus dikalikan dengan faktor:

- 1,0 untuk konduktor padat (*solid wire*)
- 1,01 untuk konduktor pilin (berkas) yang terdiri dari 2 lapis (*strand*)
- 1,02 untuk konduktor pilin lebih dari dua lapis.

**Contoh 3.1** Tentukan besar resistansi DC untuk konduktor  $253 \text{ mm}^2$  dalam Ohm/km pada suhu  $25^\circ\text{C}$ . Misalkan penghantar yang digunakan adalah CU 97,5%.

Jawab: Berdasarkan tabel 3.2 diperoleh:

$$\rho_{25} = 1,8 \text{ mikro ohm cm}$$

$$l = 1 \text{ km} = 10^5 \text{ cm}$$

$$A = 253 \text{ mm}^2 = 253 \times 10^{-2} \text{ cm}^2$$

Maka,

$$\begin{aligned} R_{25} &= \rho_{25} l / A \\ &= 1,8 \times 10^{-6} \times 10^5 / (253 \times 10^{-2}) \\ &= 0,0711 \text{ ohm/km} \end{aligned}$$

Dengan memperhitungkan pengaruh lapisan (umumnya konduktor-konduktor terdiri ndari 3 lapis),

$$\begin{aligned} R_{25} &= 1,02 \times 0,0711 \text{ ohm/km} \\ &= 0,0726 \text{ ohm/km.} \end{aligned}$$

### 3.2 INDUKTANSI DAN REAKTANSI INDUKTIF RANGKAIAN FASE TUNGGAL

Dalam penurunan rumus-rumus untuk induksi dan reaktansi induktif dari suatu konduktor biasanya diabaikan dua faktor, yaitu:

- a. efek kulit (skin effect), dan
- b. efek sekitar (proximity effect).

Efek kulit adalah gejala pada arus bolak-balik bahwa kerapatan arus dalam penampang konduktor tersebut makin besar ke arah permukaan kawat. Tetapi jika kita hanya meninjau frekuensi kerja (50 Hz atau 60 Hz) maka pengaruh efek kulit itu sangat kecil dan dapat diabaikan.

Efek sekitar adalah pengaruh dari kawat lain yang berada di samping kawat yang ditinjau sehingga distribusi fluks tidak simetris lagi. Tetapi jika radius konduktor relatif kecil terhadap jarak antara kedua kawat maka efek sekitar ini sangat kecil dan dapat diabaikan.

#### 3.2.1 Fluks Magnetik pada Suatu Kawat Penghantar Panjang

Pandanglah suatu kawat penghantar yang panjang, lurus, bulat, uniform, dengan kawat balik berada di tempat yang sangat jauh, seperti terlihat pada gambar 3.1. Maka gaya gerak magnetiknya (magneto motive force):

$$i_l = \int_c |H_e| ds \dots\dots\dots (3.5)$$

dengan,

$\int_c$  = integral tertutup

$H_e$  = intensitas medan magnetik, Ampere-lilit per meter.

$ds$  = panjang elemen sepanjang konduktor, meter.

$i_1$  = gaya gerak magnetik, ampere-lilit.

Oleh karena hanya satu kawat penghantar yang dikelilingi oleh medan magnetik, jadi hanya ada satu lilitan (turn). Maka ggm dalam ampere-lilit saam dengan besar arus pada kawat penghantar tersebut. Karena kawat balik sangat jauh, maka intensitas medan magnetik sepanjang jalan yang dipilih konstan (tidak ada proximity effect).

Jadi,

$$i_1 = |H_e| \int_c ds \dots\dots\dots (3.6)$$

Jika jalan yang dipilihnya itu berjejari  $y_1$ , maka:

$$\int_c ds = 2\pi y_1 \dots\dots\dots (3.7)$$

dan,

$$i_1 = 2\pi y_1 |H_e| \dots\dots\dots (3.8)$$

atau,

$$|H_e| = i_1 / (2\pi y_1) \dots\dots\dots (3.9)$$

Misalkan kita berikan notasi baru,  $|B_e|$  = kerapatan fluks magnetik, maka:

$$|B_e| = \mu_a |H_e| = \mu_a i_1 / (2\pi y_1) \quad \text{weber/m}^2 \dots\dots\dots (3.10)$$

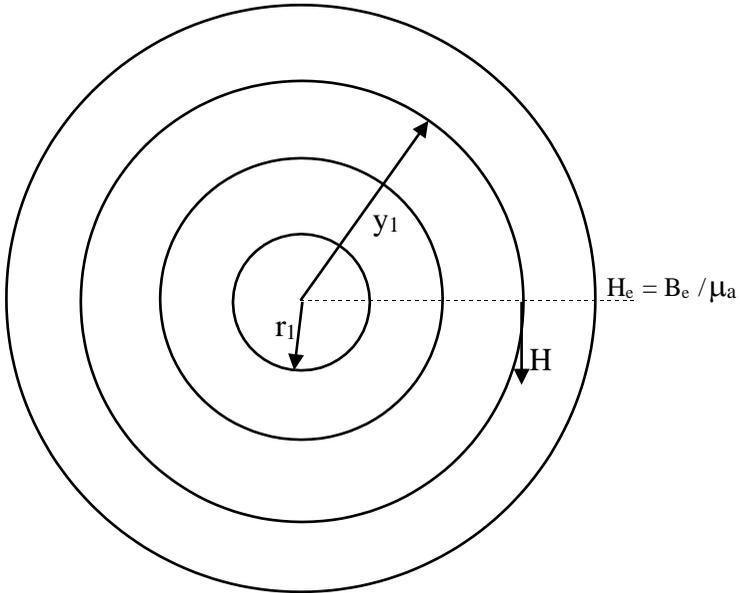
dengan,

$\mu_a$  = permeabilitas absolut dari media di sekeliling kawat penghantar.

$\mu_v$  = permeabilitas ruang hampa

$$= 4\pi \times 10^{-7} \text{ henry/meter}$$

$$= 1 \text{ (sistem CGS).}$$



Gambar 3.1. Penampang kawat penghantar dengan kawat balik yang sangat jauh, dengan jejari kawat  $r_1$

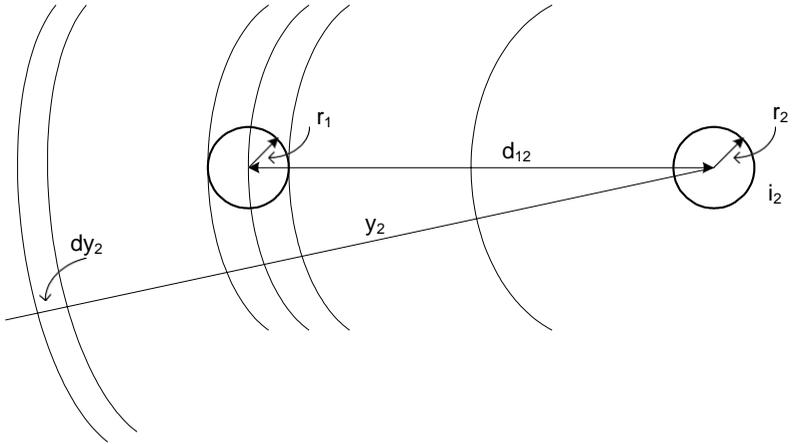
Untuk menghindarkan keperluan untuk mengubah harga-harga permeabilitas dari tiap-tiap material (bahan), permeabilitas dari material-material itu dinyatakan sebagai perkalian 2 faktor, yaitu:

$$\mu_a = \mu_e \times \mu_v \dots \dots \dots (3.11)$$

dengan,  $\mu_e$  = permeabilitas relatif dari media sekeliling.

### 3.2.2 Fluks Lingkup pada Posisi Kawat Balik Berdekatan

Pandanglah jika terdapat kawat kedua berada dekat dan paralel dengan pertama seperti terlihat pada gambar 3.2.



Gambar 3.2. Kawat penghantar balik berdekatan dengan kawat pertama

Misalkan bahwa kedua kawat penghantar tersebut mempunyai kawat balik yang sangat jauh. Jika kawat 2 nonmagnet dan  $i_2 = 0$ , dan  $i_1$  mantap, maka gambaran fluks (flux pattern) yang dihasilkan oleh arus  $i_1$  tidak berubah.

Sekarang misalkan  $i_1 = 0$ , dan arus pada kawat 2 =  $i_2$ .

Kerapatan fluks pada jejari  $y_2$  ialah:

$$|B_e| = \frac{\mu_e \mu_v i_2}{2\pi y_2}$$

dan

$$d\phi_e = |B_e| h dy_2$$

$$d\phi = \frac{\mu_e \mu_v h i_2}{2\pi y_2} dy_2$$

Jika dimisalkan  $\lambda_{12}$  adalah fluks lingkup pada kawat 1 yang ditimbulkan oleh arus  $i_2$  pada kawat 2, maka:

$$\lambda_{12} = \int_{d_{12}}^{D_2} d\phi_2 = \frac{e v_2}{2\pi} \int_{d_{12}}^{D_2} \frac{2}{y_2} dy$$

$$\lambda_{12} = \frac{\mu_e \mu_v h i_2}{2\pi} \ln \frac{D_2}{d_{12}} \text{ lilitan-weber ..... (3.12)}$$

Jika kawat 1 dan kawat 2 sama-sama mengandung arus, masing-masing  $i_1$  dan  $i_2$ , maka jumlah fluks lingkup kawat 1 adalah:

$$\lambda_1 = \lambda_{11} + \lambda_{12}$$

$$\lambda_1 = \frac{\mu_v h}{2\pi} \left[ i_1 \left( \mu_e \ln \frac{D_1}{r^1} \pm \frac{\mu_i}{4} \right) + i_2 \mu_e \ln \frac{D_2}{d_{12}} \right] \dots \dots \dots (3.13)$$

Tinjaulah keadaan khusus jika kawat 2 merupakan kawat balik bagi kawat 1. Dalam hal ini,

$$i_2 = -i_1$$

Kita juga membatasi permasalahan pada saluran transmisi udara, jadi,

$$\mu_e = 1$$

$$\mu_v = 4\pi \times 10^{-7} \text{ henry/meter}$$

Maka persamaan (3.13) menjadi:

$$\lambda_1 = 2\pi \times 10^{-7} \left[ i_1 \left( \ln \frac{D_1}{r^1} + \frac{\mu_i}{4} + \ln \frac{D_1}{D_2} \right) \right] \dots \dots \dots (3.14)$$

$D_1$  dan  $D_2$  adalah jarak-jarak yang harganya dapat diatur mencapai tak terhingga, sehingga:

$$\lim_{D \rightarrow \infty} \left( \ln \frac{D_1}{D_2} \right) = 0$$

Maka persamaan (3.14) menjadi:

$$\lambda_1 = 2\pi \times 10^{-7} \left[ \frac{1}{r_1} + \frac{\mu_i}{4} + \ln d_{12} \right] \text{ lilitan-weber. (3.14)}$$

### 3.2.2.1 Induktansi Diri

Induktansi diri (L) dari suatu rangkaian dapat didefinisikan sesuai dengan persamaan berikut ini:

$$L = \frac{\text{jatuh tegangan yang ditimbulkan oleh perubahan arus}}{\text{perubahan arus}}$$

Jika permeabilitas dari medan magnet konstan, maka definisi di atas sama dengan pernyataan berikut ini:

$$L = \frac{\text{fluks lingkup yang ditimbulkan oleh arus}}{\text{arus}}$$

atau,

$$L = \frac{\lambda}{i} \dots\dots\dots(3.15)$$

Jadi, untuk kawat 1:

$$L = \lambda_1 = 2\pi \times 10^{-7} \left[ \frac{1}{r_1} + \frac{\mu_i}{4} + \ln d_{12} \right] \text{ henry } \dots\dots(3.16)$$

Untuk kawat nonmagnet seperti tembaga dan aluminium,

harga  $\mu_i = 1$ , sehingga diperoleh:

$$L = \lambda_1 = 2\pi \times 10^{-7} \left[ \frac{1}{r_1} + \frac{1}{4} + \ln d_{12} \right] \text{ henry } \dots\dots(3.17)$$

Dalam persamaan (3.17) terdapat 3 suku. Suku pertama dan

kedua tergantung dari sifat-sifat kawat, sedang suku ketiga tergantung dari jarak kawat-kawat. Hal ini mengusulkan kepada kita untuk membagi persamaan (3.17) menjadi dua bagian persamaan, yaitu bagian pertama disebut komponen kawat, dan bagian kedua disebut komponen jarak.

Jika panjang kawat 1 km (= 1000 m), jejari kawat dan jarak antara kawat dalam meter, dan ln diganti dengan log, maka:

$$ln = 2,3026 \log$$

dan jika harga-harga tersebut kita substitusikan ke dalam persamaan (3.17) kita peroleh persamaan berikut:

$$L = 0,4605 \times 10^{-3} \left[ \frac{1}{r^2} + 0,10857 + \log d \right] \text{ henry/km ..(3.18)}$$

$$= L_a + L_d$$

dengan,

$$L = 0,4605 \times 10^{-3} \left[ \frac{1}{r_1} + 0,10857 \right] \text{ henry/km .....(3.19)}$$

pada jarak 1 m, dan

$$L_d = 0,4605 \times 10^{-3} \log d_{12} \text{ henry/km .....(3.20)}$$

Dalam persamaan (3.18) dan (3.20) satuan panjang dari jejari  $r_1$  dan jarak  $d_{12}$  diberikan dalam meter.

Jika bentuk gelombang arus dan tegangan adalah sinus, maka lebih berguna mengubah induktansi menjadi reaktansi sesuai dengan relasi:

$$X = 2\pi f L$$

Jadi,

$$X_1 = 2,8934 \times 10^{-3} \left[ \frac{1}{r_1} + 0,10857 + \log d_{12} \right] \text{ ohm/km} \quad (3.21)$$

$$X_a = 2,8934 \times 10^{-3} \left[ \frac{1}{r_1} + 0,10857 \right] \text{ ohm/km} \dots\dots (3.22)$$

$$X_d = 2,8934 \times 10^{-3} f \log d_{12} \text{ ohm/km} \dots\dots\dots (3.23)$$

Jika  $f = 50$  Hz, maka persamaan-persamaan (3.21), (3.22), dan persamaan (3.23) menjadi:

$$X_1 = \left[ \frac{1}{0,14467} \log \frac{1}{r_1} + 0,10857 + \log d_{12} \right] \text{ ohm/km} \dots\dots (3.24)$$

$$X_a = \left[ \frac{1}{0,14467} \log \frac{1}{r_1} + 0,10857 \right] \text{ ohm/km} \dots\dots\dots (3.25)$$

$$X_d = 0,14467 \times 10^{-3} f \log d_{12} \text{ ohm/km} \dots\dots\dots (3.26)$$

Persamaan (3.24) sampai (3.26) berlaku juga untuk 2 kawat dengan mengganti  $r_1$  menjadi  $r_2$ .

**Contoh 3.2** Suatu saluran udara fase tunggal dengan konduktor tembaga dengan konduktivitas 97,3%; 107,2 mm<sup>2</sup> (4/10 atau 211.600 CM), 19 kawat elemen, dengan jejari efektif 0,6706 cm. Jarak antara kedua kawat 1,5 m. Tentukanlah reaktansi induktif saluran transmisi tersebut dalam ohm per km per kawat. Frekuensi kerja adalah 50 Hz.

Jawab:

Berdasarkan persamaan (3.24) sampai (3.26) diperoleh:

$$X_1 = \left[ \frac{1}{0,14467 \left[ \log \frac{1}{r_1} + 0,10857 + \log d_{12} \right]} \right]$$

ohm/km

dengan,

$r_1$  = jejari konduktor dalam meter

$$= 0,006706$$

$d_{12}$  = jarak antar kawat

$$= 1,5 \text{ meter}$$

maka,

$$X_1 = 0,14467 \left[ \log \frac{1}{0,006706} + 0,10857 + \log 1,5 \right]$$

$$X_1 = 0,14467 \left[ 2,17354 + 0,10857 + 0,17609 \right]$$

$$= 0,3556 \text{ ohm/km untuk satu kawat}$$

### 3.2.2.2 Penggunaan Tabel untuk Konstanta Saluran

Pabrik pembuat kawat-kawat penghantar sudah menyediakan tabel-tabel yang memberikan besaran-besaran elektrik dan mekanik dari setiap jenis dan ukuran kawat, antara lain penampang kawat, diameter luar kawat, GMR, kapasitas hantar arus, hambatan DC, dan hambatan AC, reaktansi induktif, dan reaktansi kapasitif. Dengan bantuan tabel-tabel ini perhitungan-perhitungan dapat dilakukan dengan lebih cepat, karena perhitungan untuk mendapatkan parameter saluran menggunakan rumus-rumus dapat dihindarkan.

### 3.2.3 Geometric Mean Radius (GMR) dan Geometric Mean Distance (GMD)

#### 3.2.3.1 Geometric Mean Radius (GMR)

Geometric Mean Radius (GMR) atau jejari rata-rata geometris dari suatu luas (area) adalah limit dari jarak rata-rata geometris (GMD) antara pasangan-pasangan elemen dalam luas itu sendiri jika jumlah elemen itu diperbesar sampai tak berhingga. Khusus untuk kawat bundar, GMR untuk satu kawat ialah jejari dari suatu silinder berdinding yang sangat tipis mendekati nol sehingga induktansi dari silinder itu sama dengan induktansi kawat asli.

Berdasarkan persamaan (3.17) diperoleh:

$$L = 2\pi \times 10^{-7} \left[ \frac{1}{r_1} + \frac{1}{4} + \ln d_{12} \right] \text{ henry}$$

$$L_1 = 2\pi \times 10^{-7} \left[ \ln \frac{1}{r_1} + \ln e^{\frac{1}{4}} + \ln d_{12} \right] \text{ henry}$$

$$L_1 = 2\pi \times 10^{-7} \left[ \ln \frac{1}{r_1 e^{-\frac{1}{4}}} + \ln d_{12} \right] \text{ henry}$$

atau,

$$L_1 = L_a + L_d$$

Karena  $L_a$  adalah komponen kawat dan tergantung dari

$$\frac{1}{r_1 e^{-\frac{1}{4}}} \text{ maka } r_1 e^{\frac{1}{4}} = r_1', \text{ disebut jejari rata-rata geometris atau}$$

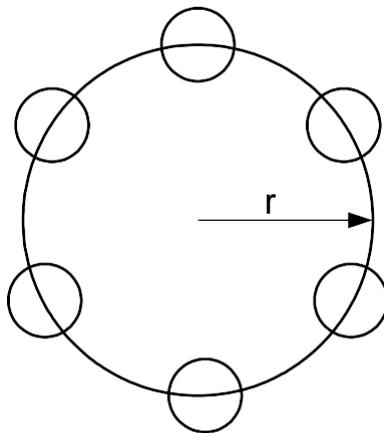
GMR dari kawat bundar dengan jejari  $r_1$ .

Pemakaian GMR ini membutuhkan distribusi arus yang uniform dan tidak ada bahan-bahan magnetik. Jika yang dibahas adalah penghantar ACSR dimana berinti baja yang merupakan bahan magnetik, maka dalam hal ini biasanya diasumsikan arus mengalir dalam kawat-kawat penghantar, dan arus yang sangat kecil pada inti baja diabaikan. Dengan demikian pengertian GMR pada ACSR dapat dipergunakan.

### 3.2.3.2 Geometric Mean Distance (GMD)

Jika suatu lingkaran pada jejari  $r$  terdapat  $n$  titik yang jaraknya satu sama lain sama besar maka GMD antara titik-titik itu adalah:

$$GMD = r^{n-1} \sqrt{n} \dots\dots\dots(3.27)$$



Gambar 3.3. Penampang kawat penghantar untuk mendapatkan perhitungan GMD.

Jarak-jarak bersama antara pasangan-pasangan titik itu adalah sama dengan  $n \times (n - 1)$  jarak-jarak, dan hasil perkalian dari semua jarak-jarak itu adalah sama dengan pangkat  $n(n - 1)$  dari GMD-nya.

## 2.2 KAPASITANSI DAN REAKTANSI KAPASITIF RANGKAIAN FASE TUNGGAL

Jika ada dua kawat paralel dipisahkan oleh media isolasi akan terbentuk kapasitor, jadi mempunyai sifat untuk menyimpan muatan listrik. Jika suatu perbedaan tegangan dipertahankan antara kedua kawat maka muatan-muatan listrik pada kawat-kawat tersebut mempunyai tanda-tanda yang berlawanan. Sebaliknya jika kita mempertahankan muatan listrik pada kedua kawat dengan tanda yang berlawanan, perbedaan tegangan akan timbul antara kedua kawat tersebut.

Jika kita memandang dua kawat penghantar, yaitu kawat 1 dan kawat 2, masing-masing memiliki potensial  $e_1$  dan  $e_2$ . Perbedaan potensial antara kawat 1 dan kawat 2 diberikan oleh persamaan berikut.

$$e_{12} = e_1 - e_2 = \frac{q_1}{2\pi\epsilon_v h} \left[ \ln \frac{1}{r_1} + \ln \frac{1}{r_2} + 2 \ln d \right] \dots (3.27)$$

dengan,

$$\begin{aligned} \epsilon_v &= \text{konstanta dielektrik ruang hampa} \\ &= 8,854 \times 10^{-12} \text{ farad per meter} \end{aligned}$$

### 3.3.1 Kapasitansi

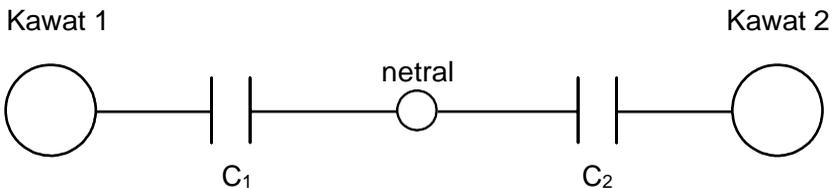
Kapasitansi (C) diberikan menurut persamaan berikut:

$$C = \frac{q}{e} \text{ farad}$$

maka,

$$C_{12} = \frac{q_1}{e} = \frac{2\pi\epsilon_v h}{\ln \frac{d_{12}}{r_1} + \ln \frac{d_{12}}{r_2} + 2\ln d_{12}} \dots\dots\dots(3.28)$$

Prosedur lain yang berguna bagi keperluan kita adalah memandang titik yang jauh itu (potensial nol) sebagai suatu elektroda kapasitor dan kemudian menghitung kapasitansi antara tiap kawat dengan titik tersebut. Maka akan diperoleh dua kapasitor antara tiap kawat dan titik yang mempunyai potensial nol. Tetapi antara kedua kawat, kedua kapasitor itu terhubung seri.



Gambar 3.4. Kapasitansi antara dua kawat penghantar

Titik dengan potensial nol kita sebut titik netral kapasitansi. Jika suatu sistem tersebut simetris, titik netral berada tepat di tengah-tengah kedua kawat tersebut. Maka diperoleh persamaan:

$$C_1 = \frac{q_1}{e_1} = \frac{2\pi\epsilon_v h}{\ln \frac{1}{r_1} + \ln d_{12}} \quad \dots\dots\dots(3.29)$$

dan,

$$C_2 = -\frac{q_1}{e_2} = \frac{2\pi\epsilon_v h}{\ln \frac{1}{r_2} + \ln d_{12}} \quad \dots\dots\dots(3.30)$$

dengan,

$C_1$  = kapasitansi kawat 1 terhadap netral.

$C_2$  = kapasitansi kawat 2 terhadap netral.

Jumlah kapasitansi antara kawat 1 dan kawat 2 terhubung seri,

$$C_{12} = \frac{1}{\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2}}$$

dan,

$$C_{12} = \frac{2\pi\epsilon_v h}{\ln \frac{1}{r_1} + \ln \frac{1}{r_2} + \ln d_{12}} \quad \text{farad} \dots\dots\dots (3.31)$$

Jika  $r_1 = r_2$ , sebagaimana biasanya dalam saluran-saluran tenaga listrik, maka:

$$C_1 = C_2 = \frac{2\pi\epsilon_v h}{\ln \frac{1}{r_1} + \ln d_{12}} \quad \text{farad} \dots\dots\dots (3.32)$$

Di dalam satuan praktis, lebih berguna untuk menghitung kapasitansi per km, atau  $h = 1000$  meter dan  $\ln$  diganti menjadi  $\log$ .

Untuk kawat udara:

$$\epsilon_v = 8,854 \times 10^{-12} \text{ farad per meter}$$

Substitusi harga-harga di atas ke dalam persamaan (3.32) akan diperoleh persamaan:

$$C_1 = \frac{2,417 \times 10^{-8}}{\ln \frac{1}{r_1} + \ln d_{12}} \quad \text{farad ..... (3.33)}$$

Dalam persamaan (3.33),  $r_1$  dan  $d_{12}$  dapat dalam semua unit asal keduanya sama. Tetapi untuk praktisnya, dalam diktat ini  $r_1$  dan  $d_{12}$  diberikan dalam meter.

### 3.3.2 Reaktansi Kapasitif

Jika gelombang berbentuk sinus, maka reaktansi kapasitif kawat penghantar 1 dapat diperoleh:

$$X_1' = \frac{-1}{2\pi f C_1} \quad \text{ohm}$$

atau,

$$X_1' = \frac{-6,5856 \times 10^6}{f} \left( \log \frac{1}{r_1} + \log d_{12} \right) \quad \text{ohm km ..... (3.34)}$$

atau,

$$X_1' = X_a' + X_d' \text{ ..... (3.35)}$$

dengan,

$$X_a' = \frac{-6,5856 \times 10^6}{f} \log \frac{1}{r_1} \quad \text{ohm km (pada jarak 1 m) ..... (3.36)}$$

$$X_d' = \frac{-6,5856 \times 10^6}{f} \log d_{12} \quad \text{ohm km} \dots\dots\dots (3.37)$$

(r dan d dalam meter)

Jika  $f = 50$  Hz, maka

$$X_a' = -0,1317 \times 10^6 \log \frac{1}{r_1} \text{ohm km (pada jarak 1 m)..(3.38)}$$

$$X_d' = -0,1317 \times 10^6 \log d_{12} \quad \text{ohm km} \dots\dots\dots (3.39)$$

**Latihan:**

1. Tentukan besar resistansi DC untuk konduktor ACSR 403 mm<sup>2</sup> dalam Ohm/km pada suhu 25°C. Penampang konduktor itu (403 mm<sup>2</sup>) tidak termasuk penampang baja, jadi hanya penampang Al saja. Misalkan penghantar yang digunakan adalah Al 61%.
2. Reaktansi induktif per fase suatu saluran transmisi tiga fase simetris yang menggunakan kawat penghantar 157 mm<sup>2</sup> (300.000 CM), 12 strands, ialah 0,402 ohm per km pada frekuensi 50 Hz. Tentukanlah jarak dari kawat-kawat penghantar tersebut.
3. Suatu saluran udara fase tunggal dengan konduktor tembaga dengan konduktivitas 100%; 107,2 mm<sup>2</sup> (4/10 atau 211.600 CM), 19 kawat elemen, dengan jejari efektif 0,6706 cm. Jarak

antara kedua kawat 1 m. Tentukanlah reaktansi induktif saluran transmisi tersebut dalam ohm per km per kawat. Frekuensi kerja adalah 50 Hz.

## **BAB IV**

### **REPRESENTASI SALURAN TRANSMISI**

Tujuan Instruksional Umum:

Memberikan wawasan dan tinjauan analitis mengenai transmisi dan distribusi tenaga listrik disertai perkembangan dan teknologinya dalam sistem tenaga listrik.

Tujuan Instruksional Khusus:

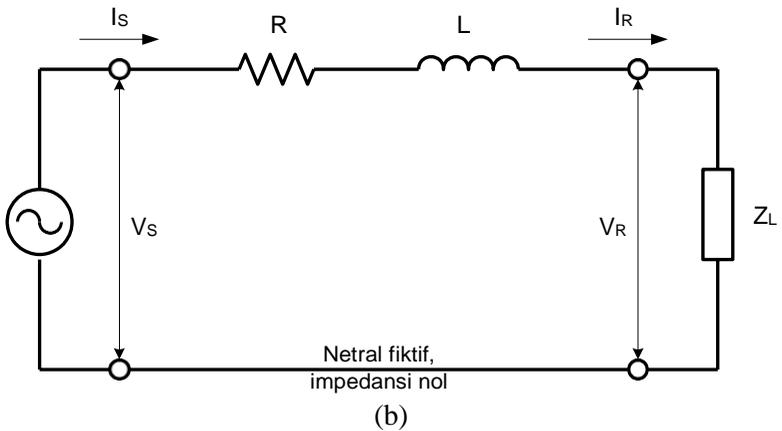
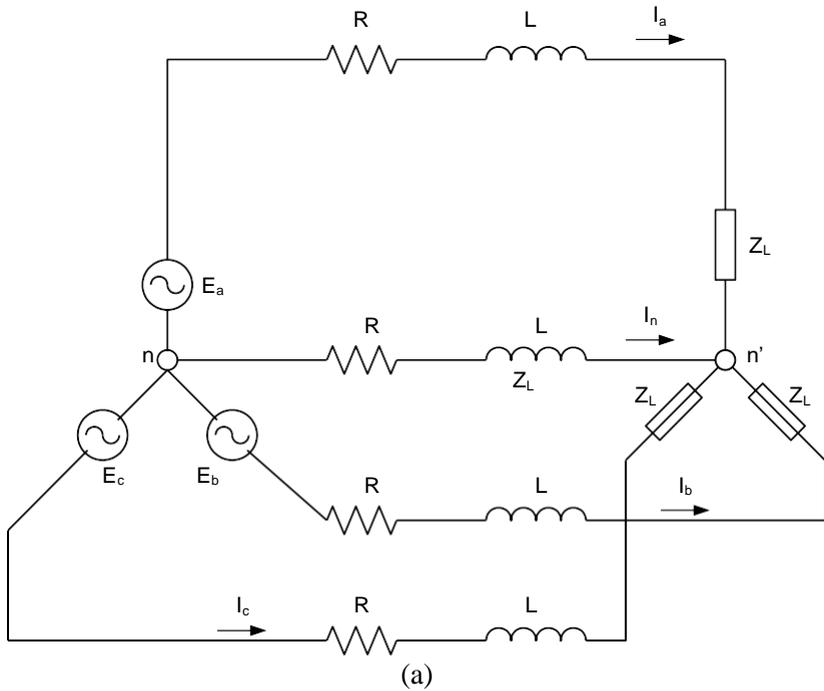
1. Memberikan pengetahuan tentang pengantar representasi saluran transmisi tenaga listrik.
2. Memberikan pengetahuan tentang klasifikasi saluran transmisi.
3. Memberikan pengetahuan tentang diagram pengganti saluran transmisi.
4. Memberikan pengetahuan tentang analisis matematis representasi saluran transmisi tenaga listrik.

#### **4.1 PENDAHULUAN**

Pada bab ini dibahas mengenai representasi saluran transmisi tenaga listrik. Persoalan tegangan dalam saluran transmisi sangatlah penting. Baik dalam keadaan operasi maupun dalam perancangan harus selalu diperhatikan tegangan pada setiap titik dalam saluran transmisi. Besar perubahan tegangan yang diperbolehkan biasanya berkisar antara  $-10\%$  sampai dengan  $5\%$ .

Saluran transmisi tenaga listrik yang dibahas dalam buku ajar ini ditekankan pada saluran udara, dimana sebagian besar menggunakan saluran tiga fase, seperti terlihat pada gambar 4.1. representasi saluran transmisi udara ini sangat penting untuk keperluan pereancangan dan analisis sistem transmisi dan untuk analisis sistem tenaga listrik secara keseluruhan.

Dalam gambar 4.1(a) diperlihatkan saluran transmisi tiga fase dengan kawat netral  $n$ . dalam keadaan tegangan dan arus yang simetris tidak ada arus yang mengalir pada kawat netral  $n - n'$ . oleh karena ketiga fasenya simetris, artinya ketiga fasenya tergeser  $-120^\circ$  dan  $-120^\circ$  terhadap fase referensi, maka analisisnya cukup dilakukan berdasarkan satu fase, dan biasanya dipilih fase a sebagai fase referensi, dengan jalan balik arus yang fiktif tanpa impedansi seperti terlihat pada gambar 4.1(b). Besaran-besaran untuk fase b dan fase c diperoleh dengan memutar besaran fase a dengan sudut  $-120^\circ$  dan  $+120^\circ$ .



Gambar 4.1 Representasi saluran transmisi 3 fase

## 4.2 KLASIFIKASI SALURAN TRANSMISI

### 4.2.1 Klasifikasi Saluran Transmisi untuk Keperluan Diagram Pengganti

Untuk keperluan analisis dan perhitungan maka diagram pengganti biasanya diklasifikasikan dalam 3 kelas, yaitu:

- a. saluran transmisi jarak pendek ( $< 80$  km)
- b. saluran transmisi jarak menengah (80 s.d. 250 km)
- c. saluran transmisi jarak panjang ( $> 250$  km)

Sebenarnya klasifikasi di atas sangat relatif. Klasifikasi saluran transmisi harus didasarkan atas besar kecilnya kapasitansi ke tanah. Jadi jika kapasitansi kecil, dengan demikian arus bocor ke tanah kecil terhadap arus beban, maka dalam hal ini kapasitansi ke tanah dapat diabaikan, dan dinamakan saluran transmisi jarak pendek. Tetapi jika kapasitansi sudah mulai besar sehingga tidak dapat diabaikan, tetapi belum begitu besar sekali sehingga masih dapat dianggap sebagai kapasitansi terpusat (lumped capacitance) dinamakan saluran transmisi jarak menengah. Jika kapasitansi ini besar sekalisehingga tidak mungkin lagi dianggap sebagai kapasitansi terpusat, dan harus dianggap terbagi rata sepanjang saluran, maka dalam hal ini dinamakan saluran transmisi jarak panjang.

Seperti disebutkan di atas bahwa klasifikasi saluran transmisi berdasarkan jarak sangatlah relatif. Semakin tinggi tegangan operasi saluran transmisi maka kemungkinan timbulnya korona sangat besar. Korona ini akan memperbesar kapasitansi saluran, dengan demikian memperbesar arus bocor. Jadi ada kalanya walaupun panjang saluran

transmisi hanya 50 km tetapi jika tegangan kerjanya sangat tinggi (Tegangan Ekstra Tinggi, EHV, apalagi Tegangan Ultra Tinggi, UHV) maka kapasitansi saluran relatif besar sehingga tidak mungkin lagi diabaikan walaupun panjang salurannya hanya 50 km.

Jadi untuk mendapatkan hasil yang teliti, sebelum kita dapat menggambarkan iagram pengganti saluran transmisi, sebaiknya dihitung terlebih dahulu kapasitansi saluran transmisi dan juga pengaruh korona terhadap saluran transmisi. Akan tetapi dalam prakteknya klasifikasi saluran transmisi berdasarkan panjang saluran seperti disebutkan di atas sudah dapat memadai dan diterapkan.

#### **4.2.2 Klasifikasi Saluran Transmisi Menurut Tegangan Kerja**

Standar tegangan transmisi di Indonesia adalah 66 kV, 150 kV, 380 kV, dan 500 kV, dan klasifikasi saluran transmisi menurut tegangan kerja ini masih belum nyata. Akan tetapi di negara-negara maju dalam bidang transmisi daya listrik seperti Amerika Serikat, Rusia, Kanada, dan lain-lain, dimana tegangan transmisi telah mencapai 1000 kV, maka klasifikasi tegangan transmisi pada negara-negara tersebut adalah:

- a. Tegangan Tinggi (High Voltage): sampai 138 kV.
- b. Tegangan Ekstra Tinggi (Extra High Voltage): 220 kV sampai 765 kV.

- c. Tegangan Ultra Tinggi (Ultra High Voltage): di atas 765 kV.

### **4.2.3 Klasifikasi Saluran Transmisi Berdasarkan Fungsinya dalam Operasi**

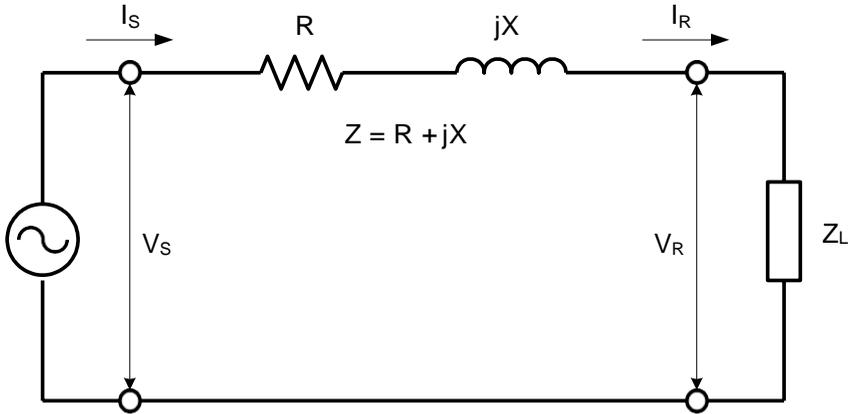
Berdasarkan fungsinya dalam operasi, saluran transmisi sering diberi nama sebagai berikut:

- a. Transmisi: yang menyalurkan daya yang besar dari pusat-pusat pembangkit ke daerah-daerah beban, atau antara dua atau lebih sistem. Untuk penyaluran antara dua atau lebih sistem disebut juga sebagai saluran interkoneksi atau *tie line*.
- b. Sub transmisi: saluran sub transmisi ini biasanya adalah transmisi percabangan dari saluran yang tinggi ke saluran yang lebih rendah.
- c. Distribusi: di Indonesia telah ditetapkan bahwa tegangan distribusi adalah 20 kV.

## **4.3 DIAGRAM PENGGANTI SALURAN TRANSMISI**

### **4.3.1 Saluran Transmisi Jarak Pendek**

Dalam Gambar 4.2 diberikan diagram pengganti dari saluran transmisi jarak pendek. Di sini kapasitansi saluran diabaikan.



Gambar 4.2 Diagram pengganti saluran transmisi jarak pendek

Dalam gambar 4.2, notasi-notasi yang diberikan adalah:

$V_S$  = tegangan pada ujung pengirim atau ujung generator

$I_S$  = arus pada ujung pengirim atau ujung generator

$V_R$  = tegangan pada ujung penerima atau ujung beban

$I_R$  = arus pada ujung penerima atau ujung beban

$Z = R + jX$

= impedansi saluran

Maka relasi tegangan dan arusnya adalah:

$$V_S = V_R + Z I_R \dots\dots\dots (4.1)$$

$$I_S = I_R \dots\dots\dots (4.2)$$

Pengaturan tegangan atau "Voltage Regulation (VR)" didefinisikan sebagai berikut:

$$VR(\%) = \frac{|V_{R(NL)}| - |V_{R(FL)}|}{|V_{R(FL)}|} \times 100\% \dots\dots\dots (4.3)$$

dengan,

$|V_{R(NL)}|$  = tegangan saklar ujung beban pada beban nol (No Load)

$|V_{R(FL)}|$  = tegangan saklar ujung beban pada beban penuh (Full Load)

Untuk saluran transmisi jarak pendek, berlaku:

$$|V_{R(NL)}| = |V_S|$$

$$|V_{R(FL)}| = |V_R|$$

maka,

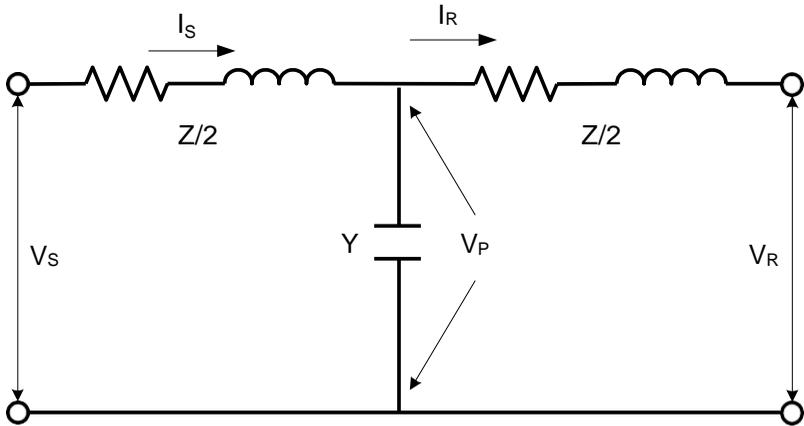
$$VR(\%) = \frac{|V_S| - |V_R|}{|V_R|} \times 100\% \dots\dots\dots(4.4)$$

### 4.3.2 Saluran Transmisi Jarak Menengah

Pada saluran transmisi jarak menengah, kapasitansi saluran dapat dipusatkan pada satu titik (nominal T) atau pada dua titik (nominal  $\pi$ ).

#### 4.3.2.1 Nominal T

Diagram pengganti saluran transmisi jarak menengah dengan pendekatan nominal T diperlihatkan pada gambar 4.3.



Gambar 4.3 Diagram pengganti saluran transmisi jarak menengah dengan pendekatan nominal T

Relasi tegangan dan arus diberikan oleh:

$$V_S = V_R + I_R Z/2 + I_S Z/2$$

Tetapi,

$$I_S = I_R + V_P Y$$

$$= I_R + (V_R + I_R Z/2) Y$$

$$I_S = Y V_R + (1 + ZY/2) I_R$$

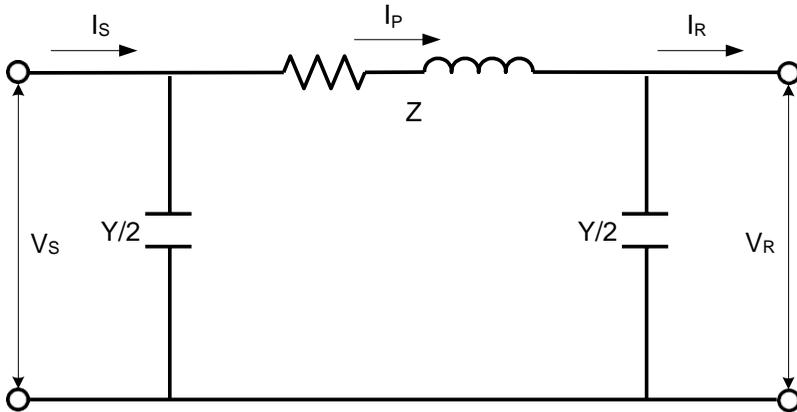
maka,

$$V_S = (1 + ZY/2) V_R + (Z + Z^2 Y/4) I_R$$

$$I_S = Y V_R + \left( 1 + \frac{ZY}{2} \right) I_R \quad \dots\dots\dots(4.5)$$

#### 4.3.2.2 Nominal $\pi$

Diagram pengganti saluran transmisi jarak menengah dengan pendekatan nominal  $\pi$  diperlihatkan pada gambar 4.4.



Gambar 4.4 Diagram pengganti saluran transmisi jarak menengah dengan pendekatan nominal  $\pi$

Relasi tegangan dan arus diberikan oleh:

$$V_S = V_R + I_P Z$$

Tetapi,

$$I_P = I_R + V_R Y/2$$

Jadi,

$$V_S = V_R + (I_R + V_R Y/2) Z$$

$$V_S = \left( 1 + \frac{ZY}{2} \right) V_R + Z I_R$$

Arus,

$$I_S = I_P + V_S Y/2$$

$$I_S = I_R + V_R Y/2 + (1 + ZY/2) V_R + Z I_R Y/2$$

$$I_S = (Y + ZY^2/4) V_R + (1 + ZY/2) I_R \quad \dots\dots\dots(4.6)$$

Pengaturan tegangan untuk nominal T atau nominal  $\pi$  diberikan oleh persamaan berikut:

$$V_{R(NL)} = \frac{V_S}{1 + \frac{ZY}{2}}, \text{ dan}$$

$$V_{R(FL)} = V_R$$

maka,

$$VR(\%) = \frac{|V_{R(NL)}| - |V_{R(FL)}|}{|V_{R(FL)}|} \times 100\%$$

$$VR(\%) = \frac{\left| \frac{V_S}{1 + \frac{ZY}{2}} \right| - |V_R|}{|V_R|} \times 100\% \dots\dots\dots(4.7)$$

**Contoh 4.1** Suatu saluran transmisi udara tiga fase, 50 km, 70 kV, mempunyai konstanta: R = 0,20 ohm per km, X = 0,608 ohm per km, Y = j 4,0 x 10<sup>-6</sup> mho per km. Saluran transmisi tersebut menyuplai beban 30 MW dan faktor daya pf = 0,9 terbelakang. Tegangan pada ujung beban 70 kV.

Hitunglah: (a) tegangan pada ujung pengirim. (b) daya pada ujung pengirim.

(c) efisiensi transmisi. (d) pengaturan tegangan.

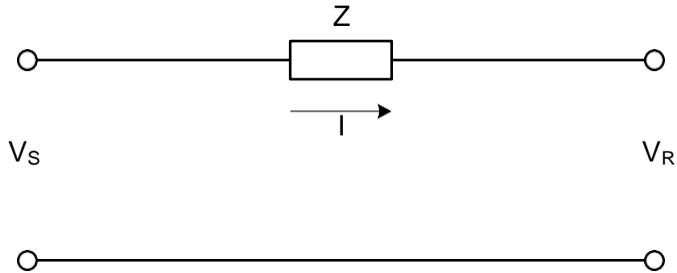
Jawab:

(a) Karena panjang saluran adalah 50 km, jadi saluran ini adalah saluran transmisi jarak pendek.

Jadi,

$$I_S = I_R = I$$

$$V_S = V_R + I Z$$



$$P_R = 30 \text{ MW}$$

pf = 0,9 terbelakang (*lagging*)

$$V_R = 70 \text{ kV (L-L)}$$

$$= 70 / \sqrt{3} \text{ kV (L-N)}$$

$$= 40,416 \text{ volt (L-N)}$$

$$|I_R| = \frac{P_R}{\sqrt{3} V_{R(L-L)} \text{ pf}}$$

Jadi,

$$I_R = \frac{30000 \text{ kW} \angle -25,84^\circ}{\sqrt{3} \times 70 \text{ kV} \times 0,9} \text{ A}$$

$$= 274,94 \angle -25,84^\circ \text{ A}$$

$$Z = (0,2 + j0,608) 50 \text{ ohm}$$

$$= 10 + j30,4 \text{ ohm}$$

$$= 32 \angle 71,8^\circ \text{ ohm}$$

$$V_S = V_R + IZ$$

$$= 40,416 + 274,94 \angle -25,84^\circ \times 32 \angle 71,8^\circ$$

$$= 40,416 + 8,798 \angle 45,96^\circ$$

$$= 40,416 + 6,116 + j6,324$$

$$= 46,532 + j6,324 \text{ volt}$$

$$= 46,93 \angle 7,49^\circ \text{ kV (L-N)}$$

atau,

$$|V_S| = 46,93 \text{ kV (L-N)}$$

$$= 81,28 \text{ kV (L-L)}$$

(b) Daya pada ujung pengirim

$$P_S = \sqrt{3} |V_S| |I| \cos \varphi_S$$

$$\varphi_S = 7,49 - (-25,84)$$

$$= 33,33^\circ$$

$$P_S = \sqrt{3} \times 81,28 \times 274,94 \times \cos 33,33^\circ$$

$$= 32,339 \text{ kW}$$

$$= 32,34 \text{ MW}$$

(c) Efisiensi transmisi

$$\eta = \frac{P_R}{P_S} = \frac{30}{32,24} \times 100\%$$

$$= 92,6 \%$$

(d) Pengaturan tegangan:

$$VR(\%) = \frac{|V_{R(NL)}| - |V_{R(FL)}|}{|V_{R(FL)}|} \times 100\%$$

$$V_{R(NL)} = |V_S| = 81,28 \text{ kV}$$

$$V_{R(FL)} = |V_R| = 70 \text{ kV}$$

$$VR(\%) = \frac{81,28 - 70}{70} \times 100\% \\ = 16,11 \%$$

### 4.3.3 Saluran Transmisi Jarak Panjang

Diagram pengganti saluran transmisi jarak panjang diperlihatkan seperti pada gambar 4.5.

Misalkan  $Z$  = impedansi per satuan panjang.

$Y$  = admitansi shunt per satuan panjang.

Pandanglah bagian kecil,  $\Delta x$ , dari kawat transmisi itu yang jaraknya  $x$  dari ujung penerima.

$$V(x + \Delta x) = \left[ 1 + \frac{ZY(\Delta x)^2}{2} \right] V(x) + Z\Delta x \left[ 1 + \frac{ZY(\Delta x)^2}{4} \right] I(x) \quad \dots\dots(4.8)$$

$$I(x + \Delta x) = Y\Delta x V(x) + \left[ 1 + \frac{ZY(\Delta x)^2}{2} \right] I(x) \quad \dots\dots(4.9)$$

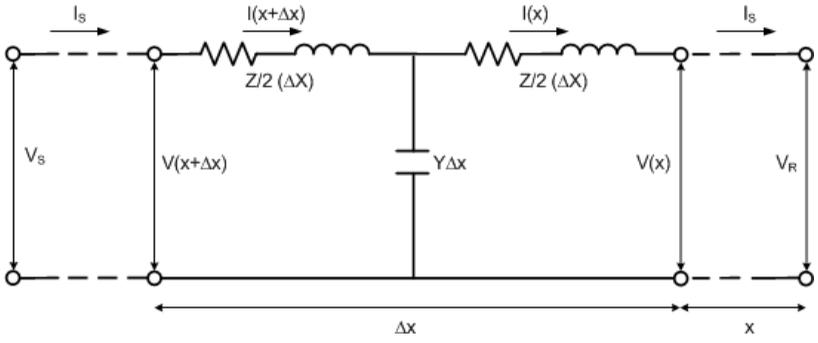
atau,

$$V(x + \Delta x) - V(x) = \Delta V(x) \\ = \frac{ZY(\Delta x)^2}{2} V(x) + Z\Delta x \left[ 1 + \frac{ZY(\Delta x)^2}{4} \right] I(x) \quad \dots\dots(4.10)$$

$$I(x + \Delta x) - I(x) = \Delta I(x)$$

$$= Y\Delta x V(x) + \frac{ZY}{2} (\Delta x)^2 I(x) \dots(4.11)$$

$$\frac{\Delta V(x)}{\Delta x} = \frac{ZY}{2} V(x)\Delta x + \frac{ZY}{4} (\Delta x)^2 I(x) \dots\dots(4.12)$$



Gambar 4.5 Diagram pengganti saluran transmisi jarak panjang.

$$\frac{\Delta I(x)}{\Delta x} = YV(x) + \frac{ZY}{2} I(x)\Delta x \dots\dots(4.13)$$

$\Delta V(x)$  dan  $\Delta I(x)$  adalah kenaikan tegangan dan arus jika bergerak dari titik  $x$  ke titik  $(x + \Delta x)$ , yaitu sejauh  $\Delta x$ .

Jika  $\Delta x$  dibiarkan menjadi kecil sekali sehingga mendekati nol, maka:

$$\frac{\Delta V(x)}{\Delta x} \text{ mendekati } \frac{dV(x)}{dx}$$

dan,

$$\frac{\Delta I(x)}{\Delta x} \text{ mendekati } \frac{dI(x)}{dx}$$

Juga, suku-suku yang mengandung  $\Delta x$  akan hilang. Jadi, persamaan (4.12) dan (4.13) menjadi sebagai berikut:

$$\frac{dV}{dx} = ZI \dots\dots\dots(4.14)$$

$$\frac{dI}{dx} = YV \dots\dots\dots(4.15)$$

Subskrip  $x$  tidak diperlukan lagi untuk  $V$  dan  $I$  karena relasi di atas berlaku untuk setiap titik. Oleh karena semua suku-suku yang berbeda pada representasi  $T$  dan  $\pi$  mengandung  $\Delta x$ , maka hasil yang sama akan diperoleh juga seandainya kita memulai dengan representasi  $\pi$ .

Jika persamaan (4.14) dan (4.15) dideferiansiasi sekali lagi, maka akan diperoleh persamaan berikut:

$$\frac{d^2V}{dx^2} = Z \frac{dI}{dx}$$

$$\frac{d^2V}{dx^2} = ZYV \dots\dots\dots(4.16)$$

$$\frac{d^2I}{dx^2} = Y \frac{dV}{dx}$$

$$\frac{d^2I}{dx^2} = ZYI \dots\dots\dots(4.17)$$

Bentuk umum persamaan tegangan dan arus untuk saluran

transmisi jarak panjang adalah:

$$V = V_R \cosh \sqrt{ZY} x + \sqrt{\frac{Z}{Y}} I_R \sinh \sqrt{ZY} x \quad \dots\dots(4.18)$$

$$I = I_R \cosh \sqrt{ZY} x + \sqrt{\frac{Z}{Y}} V_R \sinh \sqrt{ZY} x \quad \dots\dots(4.19)$$

**Latihan:**

1. Suatu saluran transmisi udara tiga fase, 70 km, 70 kV, mempunyai konstanta:  $R = 0,20$  ohm per km,  $X = 0,608$  ohm per km,  $Y = j 4,0 \times 10^{-6}$  mho per km. Saluran transmisi tersebut menyuplai beban 30 MW dan faktor daya  $pf = 0,9$  terbelakang. Tegangan pada ujung beban 70 kV.

Hitunglah: (a) tegangan pada ujung pengirim. (b) daya pada ujung pengirim. (c) efisiensi transmisi. (d) pengaturan tegangan.

2. Suatu saluran tunggal tiga fase, 275 kV, 400 km, 50 Hz, mempunyai konstanta-konstanta sebagai berikut:

$$R_a = 0,035 \text{ ohm/km}$$

$$L_l = 1,0 \text{ mH/km}$$

$$C = 0,01 \text{ mikrofarad/km}$$

Jika tegangan kerja adalah 275 kV, tentukanlah rating MVA dari reaktor shunt yang diperlukan untuk mempertahankan tegangan 275 kV pada ujung beban pada keadaan tanpa beban.

Pergunakanlah representasi nominal  $\pi$ .

*« halaman ini sengaja dikosongkan »*

## **BAB V**

### **KONSTANTA-KONSTANTA UMUM SALURAN TRANSMISI**

Tujuan Instruksional Umum:

Memberikan wawasan dan tinjauan analitis mengenai transmisi dan distribusi tenaga listrik disertai perkembangan dan teknologinya dalam sistem tenaga listrik.

Tujuan Instruksional Khusus:

1. Memberikan pengetahuan tentang pengantar konstanta-konstanta umum saluran transmisi tenaga listrik.
2. Memberikan pengetahuan tentang rangkaian kutub empat saluran transmisi.
3. Memberikan pengetahuan tentang analisis saluran transmisi sebagai kutub empat.
4. Memberikan pengetahuan tentang analisis matematis konstanta-konstanta umum saluran transmisi tenaga listrik.

#### **5.1 RANGKAIAN KUTUB EMPAT**

Dalam banyak keperluan di dalam teknik transmisi daya listrik, misalnya diagram-diagram lingkaran saluran transmisi, perencanaan saluran transmisi, dan lain-lain, sering perlu menyatakan konstanta-konstanta saluran transmisi ke dalam konstanta-konstanta umum saluran transmisi.

Karena saluran transmisi tersebut selalu dapat digambarkan sebagai kotak dengan dua jepitan masuk dan dua jepitan keluar, dan

karena memenuhi persyaratan dari kutub empat, maka saluran transmisi dapat dinyatakan sebagai kutub empat.

Suatu rangkain listrik yang pasif, linier, dan bilateral, selalu dapat direpresentasikan sebagai kutub empat. Pasif berarti tidak ada sumber (internal voltage). Linier berarti impedansinya tidak tergantung dari besar arus. Dan bilateral berarti impedansi akan sama jika dilihat dari kedua sisi atau tidak tergantung dari arah arus.

Pada dasarnya saluran transmisi tidaklah linier karena bagaimanapun juga impedansinya tergantung dari temperatur, jadi tergantung dari arus. Tetapi karena di dalam perhitungan kita selalu menentukan temperatur kerja tertentu, maka pada temperatur itu konstanta kawat penghantar adalah konstan.

Jadi karena saluran transmisi (termasuk transformator) memenuhi ketiga syarat-syarat di atas, maka saluran transmisi (dan transformator) dapat direpresentasikan sebagai kutub empat, seperti terlihat pada gambar 5.1.

Dalam gambar 5.1 terlihat bahwa A, B, C, dan D adalah konstanta-konstanta umum dari rangkaian itu yang merepresentasikan saluran transmisi. Relasi tegangan dan arus untuk suatu kutub empat adalah:

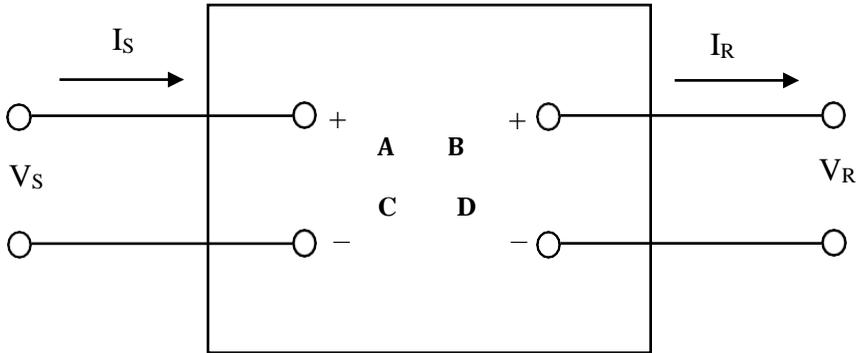
$$V_S = A V_R + B I_R \dots\dots\dots (5.1)$$

$$I_S = C V_R + D I_R \dots\dots\dots (5.2)$$

dan,

$$V_R = D V_S - B I_S \dots\dots\dots (5.3)$$

$$I_R = -C V_S + A I_S \dots\dots\dots (5.4)$$

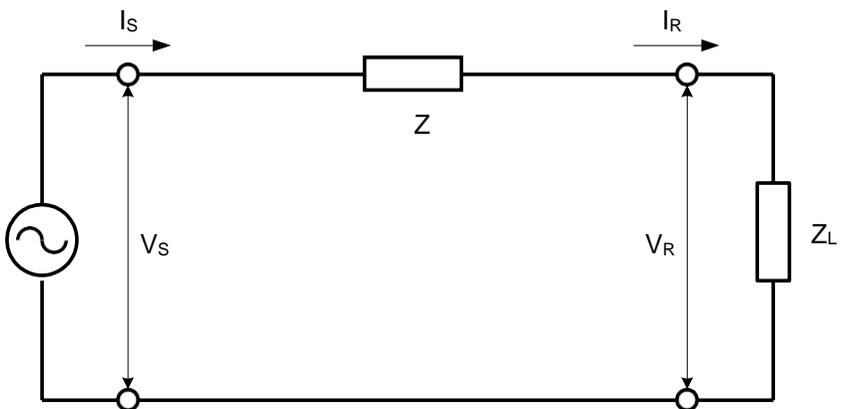


Gambar 5.1 Rangkaian kutub empat saluran transmisi.

## 5.2 SALURAN TRANSMISI SEBAGAI KUTUB EMPAT

### 5.2.1 Saluran Transmisi Jarak Pendek

Gambar 5.2 menunjukkan saluran transmisi jarak pendek berdasarkan rangkaian kutub empat.



Gambar 5.2 Rangkaian saluran transmisi jarak pendek

Relasi tegangan dan arus untuk saluran jarak pendek adalah:

$$V_S = V_R + Z I_R \dots\dots\dots (5.5)$$

$$I_S = 0 + I_R \dots\dots\dots (5.6)$$

Dengan membandingkan persamaan (5.1) sampai persamaan (5.6), maka didapatkan relasi-relasi sebagai berikut:

$$A = 1 \dots\dots\dots (5.7a)$$

$$B = Z \dots\dots\dots (5.7b)$$

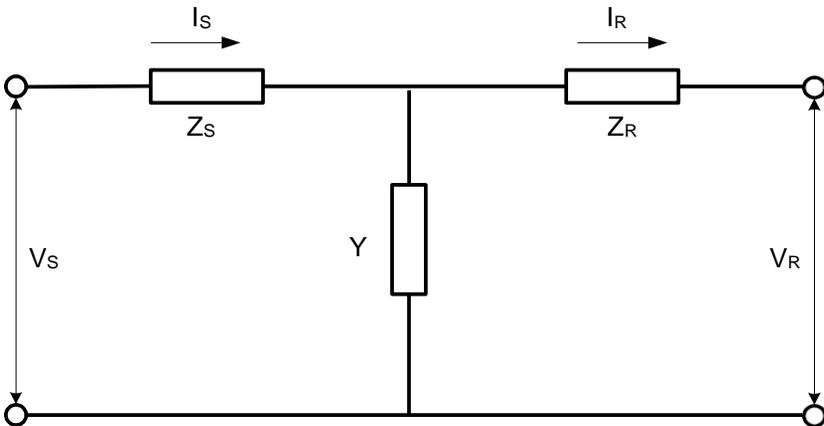
$$C = 0 \dots\dots\dots (5.7c)$$

$$D = 1 \dots\dots\dots (5.7d)$$

### 5.2.2 Saluran Transmisi Jarak Menengah

#### 5.2.2.1 Nominal T

Saluran transmisi jarak menengah dengan representasi nominal T ditunjukkan pada gambar 5.3.



Gambar 5.3 Rangkaian saluran transmisi jarak menengah dengan representasi nominal T

Untuk representasi nominal T, berdasarkan gambar 5.3 diperoleh relasi tegangan dan arus sebagai berikut:

$$V_S = (1 + YZ_S/2) V_R + (Z_S + Z_R + Z_S Y Z_R) I_R$$

$$I_S = YV_R + (1 + YZ_R) I_R$$

Jadi,

$$A = 1 + Y Z_S \dots\dots\dots (5.8a)$$

$$B = Z_S + Z_R + Z_S Y Z_R \dots\dots\dots (5.8b)$$

$$C = Y \dots\dots\dots (5.8c)$$

$$D = 1 + Y Z_R \dots\dots\dots (5.8d)$$

dan jika  $Z_S = Z_R = Z/2$

maka:

$$A = 1 + ZY/2 \dots\dots\dots (5.9a)$$

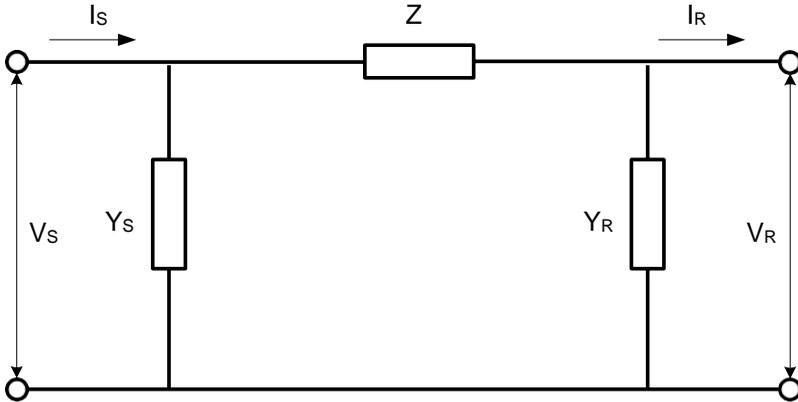
$$B = Z + Z^2Y/4 \dots\dots\dots (5.9b)$$

$$C = Y \dots\dots\dots (5.9c)$$

$$D = A \dots\dots\dots (5.9d)$$

### 5.2.2.2 Nominal $\pi$

Untuk saluran transmisi jarak menengah dengan representasi nominal  $\pi$  ditunjukkan pada gambar 5.4.



Gambar 5.4 Rangkaian saluran transmisi jarak menengah dengan representasi nominal  $\pi$

Relasi tegangan dan arusnya diperoleh sebagai berikut:

$$V_S = (1 + Y_R Z) V_R + Z I_R$$

$$I_S = (Y_S + Y_R + Y_S Z Y_R) V_R + (1 + Y_S Z) I_R$$

Jadi,

$$A = 1 + Y_R Z \dots\dots\dots (5.11a)$$

$$B = Z \dots\dots\dots (5.11b)$$

$$C = Y_S + Y_R + Y_S Z Y_R \dots\dots\dots (5.11c)$$

$$D = 1 + Y_S Z \dots\dots\dots (5.11d)$$

dan jika  $Y_S = Y_R = Y/2$

maka:

$$A = 1 + ZY/2 \dots\dots\dots (5.12a)$$

$$B = Z \dots\dots\dots (5.12b)$$

$$C = Y + Y^2 Z/4 \dots\dots\dots (5.12c)$$

$$D = A \dots\dots\dots (5.12d)$$

### 5.2.3 Saluran Transmisi Jarak Panjang

Berdasarkan uraian tentang saluran transmisi jarak panjang pada bab 3, maka didapatkan relasi arus dan tegangan untuk mendapatkan konstanta-konstanta umumnya sebagai berikut:

$$V_S = (\cosh \gamma l) V_R + (Z_k \sinh \gamma l) I_R$$

$$V_R = \left( \frac{\sinh \gamma l}{Z_k} \right) V_S + (\cosh \gamma l) I_R$$

Jadi,

$$A = \cosh \gamma l \quad \dots\dots\dots(5.13a)$$

$$B = Z_k \sinh \gamma l \quad \dots\dots\dots(5.13b)$$

$$C = \frac{\sinh \gamma l}{Z_k} \quad \dots\dots\dots(5.13c)$$

$$D = A \dots\dots\dots(5.13d)$$

#### Latihan:

1. Suatu saluran transmisi mempunyai konstanta umum saluran sebagai berikut:

$$A = D = 0,8940 + j 0,0202 \text{ ohm}$$

$$B = 32,2 + j 172,1 \text{ ohm}$$

$$C = (-0,008 + j 1,168) \times 10^{-3} \text{ mho}$$

- (a) Periksalah apakah konstanta umum di atas memenuhi  $AD - BC = 1$ .

- (b) Tegangan pada ujung penerima adalah 220 kV jala-jala dan arus pada ujung penerima adalah 325 ampere. Vektor arus mendahului vektor tegangan dengan sudut  $5,75^\circ$ , tentukanlah tegangan dan arus pada ujung pengirim.
- (c) Jika tegangan dan arus pada ujung pengirim 230 kV jala-jala dan 340 ampere, sedang arus mendahului tegangan dengan sudut  $5,75^\circ$ , tentukanlah tegangan dan arus pada ujung penerima.
2. Untuk soal nomor 1 di atas, apabila sebuah impedansi sebesar  $Z = 3,185 + j 39,82$  terhubung seri, tentukanlah konstanta umum dari gabungan itu. Periksa juga apakah memenuhi  $AD - BC = 1$ .

## **BAB VI**

### **KOMPENSASI PADA SALURAN TRANSMISI**

#### **Tujuan Instruksional Umum:**

Memberikan wawasan dan tinjauan analitis mengenai transmisi dan distribusi tenaga listrik disertai perkembangan dan teknologinya dalam sistem tenaga listrik.

#### **Tujuan Instruksional Khusus:**

1. Memberikan pengetahuan tentang pengantar kompensasi pada saluran transmisi tenaga listrik.
2. Memberikan pengetahuan tentang kompensasi dengan reaktor shunt saluran transmisi.
3. Memberikan pengetahuan tentang kompensasi dengan kapasitor seri pada saluran transmisi udara.
4. Memberikan pengetahuan tentang analisis matematis tentang kompensasi pada saluran transmisi tenaga listrik.

### **6.1 PENDAHULUAN**

Dalam pembahasan pada bab 4 telah disebutkan bahwa saluran transmisi jarak jauh dengan tegangan ekstra tingi atau ultra tinggi membutuhkan peralatan kompensasi. Hal ini terutama dimaksudkan untuk mengontrol tegangan kerja di setiap titik sepanjang saluran, memperkecil panjang elektrik  $\phi$  dari saluran, sehingga menaikkan batas stabilitas statis saluran dan untuk

menaikkan kapasitas penyaluran.

Alat-alat kompensasi pada saluran-saluran transmisi adalah reaktor shunt, kapasitor seri atau kombinasi dari keduanya. Kompensasi dengan reaktor shunt biasanya digunakan pada saluran transmisi jarak menengah dan kompensasi dengan kapasitor seri atau kombinasi reaktor shunt dan kapasitor seri digunakan pada saluran yang lebih panjang.

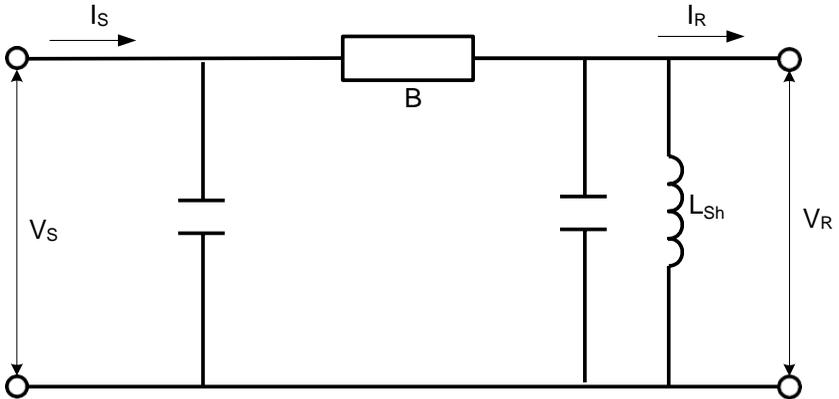
Pada kompensasi dengan kapasitor seri, jika yang dipentingkan hanya keadaan saluran pada ujung-ujungnya, saluran transmisi dan kapasitor seri itu cukup direpresentasikan dengan rangkaian nominal  $\pi$  tanpa menimbulkan kesalahan yang berarti. Dalam hal ini penempatan fisik dari kapasitor seri sepanjang saluran tidak termasuk dalam perhitungan. Tetapi jika kondisi kerja sepanjang saluran perlu diperhatikan, letak fisik kapasitor harus diperhatikan. Hal ini dapat diperoleh dengan menentukan konstanta umum ABCD dari bagian saluran di masing-masing sisi dari kapasitor dan merepresentasikan kapasitor itu dengan konstanta ABCD-nya.

Pada kompensasi dengan reaktor shunt, saluran transmisi dan reaktor shunt terhubung seri, demikian juga dengan kompensasi kapasitor seri, maka saluran transmisi dan kapasitor seri terhubung seri.

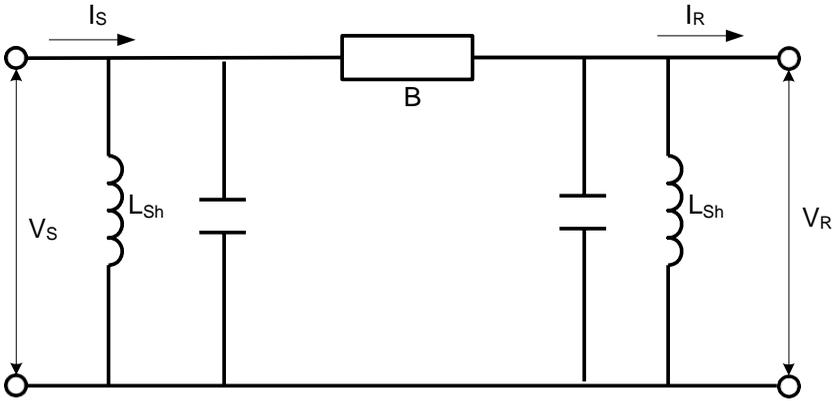
Berdasarkan pembahasan mengenai konstanta umum saluran transmisi, jika dua atau lebih kutub empat terhubung seri, maka konstanta umum dari gabungan seri tersebut adalah:

$$\begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_1 & B_1 \\ C_1 & D_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_2 & B_2 \\ C_2 & D_2 \end{bmatrix} \cdots \begin{bmatrix} A_n & B_n \\ C_n & D_n \end{bmatrix} \quad \dots\dots\dots(6.1)$$

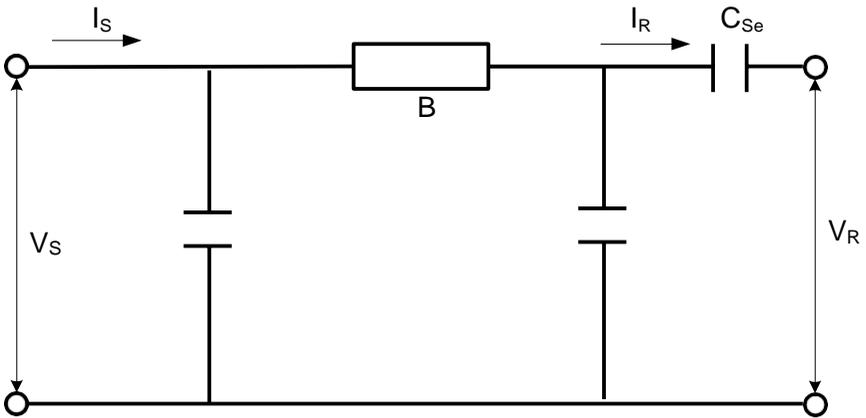
Dengan menggunakan contoh-contoh berikut ini akan terlihat jelas bagaimana pengaruh-pengaruh dari reaktor shunt atau kapasitor seri terhadap pengaturan tegangan, kapasitas penyaluran dan panjang elektrik saluran.



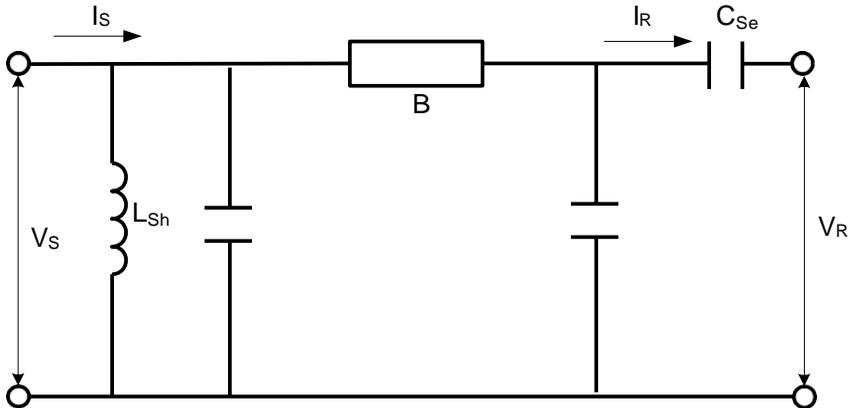
Gambar 6.1 Saluran transmisi yang dikompensasi menggunakan reaktor shunt pada ujung beban



Gambar 6.2 Saluran transmisi yang dikompensasi menggunakan reaktor shunt pada kedua ujung



Gambar 6.3 Saluran transmisi yang dikompensasi menggunakan kapasitor seri pada ujung beban



Gambar 6.4 Saluran transmisi yang dikompensasi menggunakan kombinasi reaktor shunt dan kapasitor seri

Derajat kompensasi pada kompensasi dengan reaktor shunt adalah  $B_L/B_C$ , dimana  $B_L$  adalah suseptansi induktif dari reaktor shunt, dan  $B_C$  adalah suseptansi kapasitif total dari saluran.

Derajat kompensasi pada kompensasi dengan reaktor shunt adalah  $X_C/X_L$ , dimana  $X_C$  adalah reaktansi kapasitif dari kapasitor seri, dan  $X_L$  adalah reaktansi induktif total dari saluran per fase.

## 6.2 KOMPENSASI DENGAN REAKTOR SHUNT

Kompensasi dengan reaktor shunt pada saluran transmisi dilakukan dengan memasang reaktor shunt pada salah satu ujung atau pada kedua ujung saluran. Jika saluran itu panjang sekali, maka saluran dibagi dalam beberapa bagian dan setiap bagian dikompensasi.

Sebagaimana disebutkan sebelumnya bahwa tujuan kompensasi adalah untuk mengontrol tegangan kerja di setiap titik

sepanjang saluran dan untuk memperkecil panjang elektrik saluran.

Guna memperoleh operasi praktis dan berguna bagi saluran transmisi udara di daerah seperempat sampai setengah panjang gelombang, perlu dipasang reaktor shunt untuk mengontrol karakteristik dari saluran tersebut. Untuk saluran transmisi tanpa rugi-rugi (*lossless line*) yang panjangnya kurang dari setengah panjang gelombang, elemen kompensasinya adalah reaktansi induktif.

Pengaruh kompensasi shunt terhadap tegangan dan dayanya, diberikan dalam contoh berikut ini.

**Contoh 6.1** Suatu saluran transmisi tunggal, tiga fase, 50 km, 500 kV, 250 km mempunyai konstanta saluran sebagai berikut:

$$Z = j0,65 \text{ ohm/km}$$

$$Y = j5,1 \times 10^{-6} \text{ mho/km}$$

hambatan diabaikan.

Untuk mengurangi panjang elektrik dan memperbaiki pengaturan tegangan dari saluran maka dipasang reaktor shunt yang sama besarnya pada kedua ujung saluran.

Misalkan  $|V_S| = |V_R| = 500 \text{ kV}$ .

- (a) Tentukanlah panjang elektrik saluran sebelum pemasangan reaktor shunt.
- (b) Tentukanlah induktansi dari reaktor shunt dalam henry agar panjang elektrik saluran berkurang menjadi  $20^\circ$ .

- (c) Tentukanlah daya natural sebelum dan setelah pemasangan reaktor shunt.
- (d) Jika  $V_R = 500$  kV dan beban  $P_R = 200$  MW pada faktor daya 0,9 terbelakang, tentukanlah pengaturan tegangan sebelum dan sesudah pemasangan kompensasi reaktor shunt tersebut.

Jawab:

- (a) Panjang elektrik saluran:

$$\varphi = \beta l$$

$$\beta = \sqrt{(0,65 \times 5,1 \times 10^{-6})} \text{ radian per km}$$

$$= 1,8207 \times 10^{-3} \text{ radian per km}$$

$$\varphi = 1,8207 \times 10^{-3} \times 250$$

$$= 0,4552 \text{ radian}$$

$$\varphi' = 0,4552 \times 57,3^\circ$$

$$= 26,1^\circ$$

- (b) Kita misalkan saluran itu direpresentasikan dengan rangkaian nominal  $\pi$ . Setelah pemasangan reaktor shunt, maka konstanta umum ekivalen A dan B dari ketiga rangkaian terhubung seri.

$$A = 1 + \left( \frac{Y}{Z} = \frac{j}{\omega L} \right) Z, \text{ dan}$$

$$B = Z$$

Misalkan kombinasi saluran dan reaktor shunt itu merupakan saluran baru dengan admitansi shunt yang baru:

$$\frac{Y'}{2} = \frac{Y}{2} + \frac{j}{j\omega L_{Sh}}$$

$$\frac{Y'}{2} = \frac{Y}{2} - \frac{j}{X_{Sh}}$$

dan B tidak mengalami perubahan.

Jika:

$\phi$  = panjang elektrik sebelum pemasangan reaktor

shunt =  $26,1^\circ$

$\phi'$  = panjang elektrik setelah pemasangan reaktor

shunt =  $20^\circ$

maka:

$$\frac{\phi}{\phi'} = \frac{\beta' l}{\beta l} = \frac{\sqrt{ZY'}}{\sqrt{ZY}} = \frac{20}{26,1}$$

$$= 0,7663$$

Jadi,  $Y' = (0,7663)^2 \times Y$

$$Y = j5,1 \times 10^{-6} \times 250$$

$$= j1,275 \times 10^{-3} \text{ mho}$$

$$Y' = j0,000749 \text{ mho}$$

Maka,

$$Y/2 - j/X_{Sh} = j0,3745 \times 10^{-3}$$

$$1/X_{Sh} = 0,6375 \times 10^{-3} - 0,3745 \times 10^{-3}$$

$$= 0,263 \times 10^{-3} \text{ mho}$$

$$X_{Sh} = 3,802 \times 10^3 \text{ ohm}$$

Jadi,

$$L_{Sh} = \frac{3,802 \times 10^3}{314}$$

$$= 12,11 \text{ henry/fase}$$

(c) Daya natural sebelum dan sesudah pemasangan reaktor shunt.

Misalkan:

$P_0, Z_0$  = daya natural dan impedansi surja sebelum pemasangan reaktor shunt.

$P'_0, Z'_0$  = daya natural dan impedansi surja setelah pemasangan reaktor shunt.

Untuk panjang saluran 250 km:

$$Z = j162,5 \text{ ohm}$$

$$Y = j1,275 \times 10^{-3} \text{ mho}$$

$$Z_0 = \sqrt{\frac{Z}{Y}} = \sqrt{\frac{162,5}{1,275 \times 10^{-3}}} = 357 \text{ ohm}$$

$$Z'_0 = \sqrt{\frac{Z}{Y'}} = \sqrt{\frac{162,5}{0,749 \times 10^{-3}}} = 466 \text{ ohm}$$

Maka:

$$P_0 = \frac{500 \times 500}{357} = 700 \text{ MW}$$

$$P'_0 = \frac{500 \times 500}{466} = 536 \text{ MW}$$

Jadi dengan pemasangan reaktor shunt tersebut daya natural berkurang dari 700 MW menjadi 536 MW. Ini

berarti bahwa kemampuan menyalurkan daya setelah kompensasi dengan reaktor shunt tersebut berkurang.

(d)  $V_R = 500 \text{ kV (L-L)}$  atau  $288,68 \text{ kV (L-N)}$

$P_R = 200 \text{ MW}$ , faktor daya = 0,90 terbelakang.

maka:

$$I_R = \frac{200 \times 1000}{\sqrt{3} \times 500 \times 0,9} \angle -25,84^\circ \text{ A}$$

$$I_R = 256,6 \angle -25,84^\circ \text{ A}$$

$$V_S = A V_R + B I_R$$

Sebelum kompensasi:

$$A = 1 + ZY/2$$

$$Z = j162,5 \text{ ohm}$$

$$Y = j1,275 \times 10^{-3} \text{ mho}$$

$$A = 1 + \frac{j162,5 \times j1,275 \times 10^{-3}}{2} = 0,8964$$

$$B = Z$$

$$B = j162,5 \text{ ohm}$$

$$V_S = 0,8964 \times 288,68 + 162,5 \angle 90^\circ \times 256,6 \angle -25,84^\circ \times 10^{-3}$$

$$= 258,8 + 41,7 \angle 64,16^\circ$$

$$= 277 + j37,5 \text{ kV (L-N)}$$

$$|V_S| = 279,5 \text{ kV (L-N)}$$

$$= 484,1 \text{ kV (L-L)}$$

$$\frac{|V_S|}{|A|} = \frac{484,1}{0,8964} = 540 \text{ kV} (L - L)$$

$$VR(\%) = \frac{540 - 500}{500} \times 100\% = 8\%$$

Setelah kompensasi:

$$A = 1 + ZY'/2$$

$$Z = j162,5 \text{ ohm}$$

$$Y = j0,749 \times 10^{-3} \text{ mho}$$

$$A = 1 + \frac{j162,5 \times j0,749 \times 10^{-3}}{2} = 0,9391$$

$$B = Z = j162,5 \text{ ohm}$$

$$V_S = 0,9391 \times 288,68 + 41,7 \angle 64,16$$

$$= 271,1 + 18,2 + j37,5$$

$$= 289,3 + j37,5 \text{ kV (L-N)}$$

$$|V_S| = 291,7 \text{ kV (L-N)}$$

$$= 505 \text{ kV (L-L)}$$

$$\frac{|V_S|}{|A|} = \frac{505}{0,9391}$$

$$= 538 \text{ kV} (L - L)$$

$$VR(\%) = \frac{538 - 500}{500} \times 100\%$$

$$= 7,6\%$$

Jadi, dari hasil-hasil di atas dapat dilihat bahwa dengan kompensasi reaktor shunt, pengaturan tegangan diperbaiki dari 8% menjadi 7,6%. Tetapi jika reaktor

shunt dipasang hanya selama keadaan tanpa beban,  
maka:

$$\begin{aligned}VR(\%) &= \frac{484,1 - 500}{0,9391} \times 100\% \\ &= 3,1\%\end{aligned}$$

### 6.3 KOMPENSASI DENGAN KAPASITOR SERI

Kompensasi seri dilakukan dengan memasang kapasitor seri. Kapasitor seri dipasang pada salah satu ujung saluran dan jika saluran lebih panjang maka dipasang pada kedua ujung saluran. Pemasangan kapasitor seri ditengah-tengah saluran adalah lebih baik tetapi lebih mahal karena harus menambah gardu khusus untuk instalasi kapasitor tersebut.

Kapasitor seri lebih efektif untuk mengkompensasi reaktansi seri, dengan demikian menaikkan limit daya statis atau menaikkan stabilitas saluran.

Kompensasi seri ini dilengkapi dengan spark gap untuk melindungi kapasitor terhadap arus hubung singkat.

Salah satu faktor yang perlu diperhatikan dalam kompensasi seri adalah derajat kompensasi. Derajat kompensasi tidak boleh terlalu besar. Kompensasi 100% jelas tidak diperbolehkan karena akan menimbulkan resonansi seri. Derajat kompensasi yang dekat dengan kompensasi 100% juga berbahaya, karena jika frekuensi turun, misalnya jika pembangkitan kurang, maka derajat kompensasi akan

mendekati 100%, sehingga akan terjadi resonansi. Resonansi ini disebut juga dengan resonansi sub sinkron.

Misalkanlah:

$X = \omega L$  = reaktansi seri total saluran

$C$  = kapasitansi dari kapasitor seri

Misalkan juga derajat kompensasi 90%, maka:

$$1/\omega C = 0,9 \omega L$$

atau, 
$$\frac{1}{\omega C \cdot \omega L} = 0,9$$

Sekarang jika frekuensi turun dari 50 Hz menjadi 48,5 Hz, maka pengurangannya 3%. Sehingga derajat kompensasinya menjadi:

$$\frac{1}{0,97 \omega C \cdot 0,97 \omega L} = \frac{90\%}{(0,97)^2} = 95,65\%$$

Dan jika frekuensi turun menjadi 47,5 Hz, maka pengurangan frekuensi 5%. Sehingga derajat kompensasinya menjadi:

$$\frac{1}{0,95 \omega C \cdot 0,95 \omega L} = \frac{90\%}{(0,95)^2} = 99,72\%$$

dan ini sudah hampir mencapai resonansi dan berbahaya.

Besar derajat kompensasi dalam praktek biasanya berkisar antara 40% sampai dengan 60%.

Dengan pemasangan kapasitor seri, maka reaktansi ekivalen berkurang, dengan demikian jatuh tegangan menjadi berkurang. Dan, dengan pemasangan kapasitor seri ini juga reaktansi seri menjadi berkurang, sehingga limit daya statis menjadi bertambah besar. Dengan demikian kapasitas saluran transmisi udara dalam melakukan transfer daya menjadi lebih besar.

### Latihan:

1. Suatu saluran transmisi tunggal, tiga fase, 50 km, 750 kV, 400 km mempunyai konstanta saluran sebagai berikut:

$$Z = j0,85 \text{ ohm/km}$$

$$Y = j7,1 \times 10^{-6} \text{ mho/km}$$

hambatan diabaikan.

Untuk mengurangi panjang elektrik dan memperbaiki pengaturan tegangan dari saluran maka dipasang reaktor shunt yang sama besarnya pada kedua ujung saluran. Misalkan  $|V_S| = |V_R| = 750$  kV.

- (a) Tentukanlah panjang elektrik saluran sebelum pemasangan reaktor shunt.
  - (b) Tentukanlah induktansi dari reaktor shunt dalam henry agar panjang elektrik saluran berkurang menjadi  $20^\circ$ .
  - (c) Tentukanlah daya natural sebelum dan setelah pemasangan reaktor shunt.
  - (d) Jika  $V_R = 750$  kV dan beban  $P_R = 300$  MW pada faktor daya 0,9 terbelakang, tentukanlah pengaturan tegangan sebelum dan sesudah pemasangan kompensasi reaktor shunt tersebut.
2. Selesaikanlah soal nomor 1 di atas apabila saluran transmisi tersebut akan dikompensasi seri.

## **BAB VII**

### **SISTEM DISTRIBUSI TENAGA LISTRIK**

#### **Tujuan Instruksional Umum:**

Memberikan wawasan dan tinjauan analitis mengenai transmisi dan distribusi tenaga listrik disertai perkembangan dan teknologinya dalam sistem tenaga listrik.

#### **Tujuan Instruksional Khusus:**

1. Memberikan pengetahuan tentang pengantar sistem distribusi tenaga listrik.
2. Memberikan pengetahuan tentang sistem subtransmisi pada sistem tenaga listrik.
3. Memberikan pengetahuan tentang gardu induk pada sistem distribusi.
4. Memberikan pengetahuan tentang analisis keandalan jaringan distribusi tenaga listrik.

### **7.1 PENDAHULUAN**

Dalam definisi secara umum, sistem distribusi adalah bagian dari sistem perlengkapan elektrik antara sumber daya besar (*bulk power source, BPS*) dan peralatan hubung pelanggan (*customers service switches*). Berdasarkan definisi ini maka sistem distribusi meliputi komponen-komponen berikut:

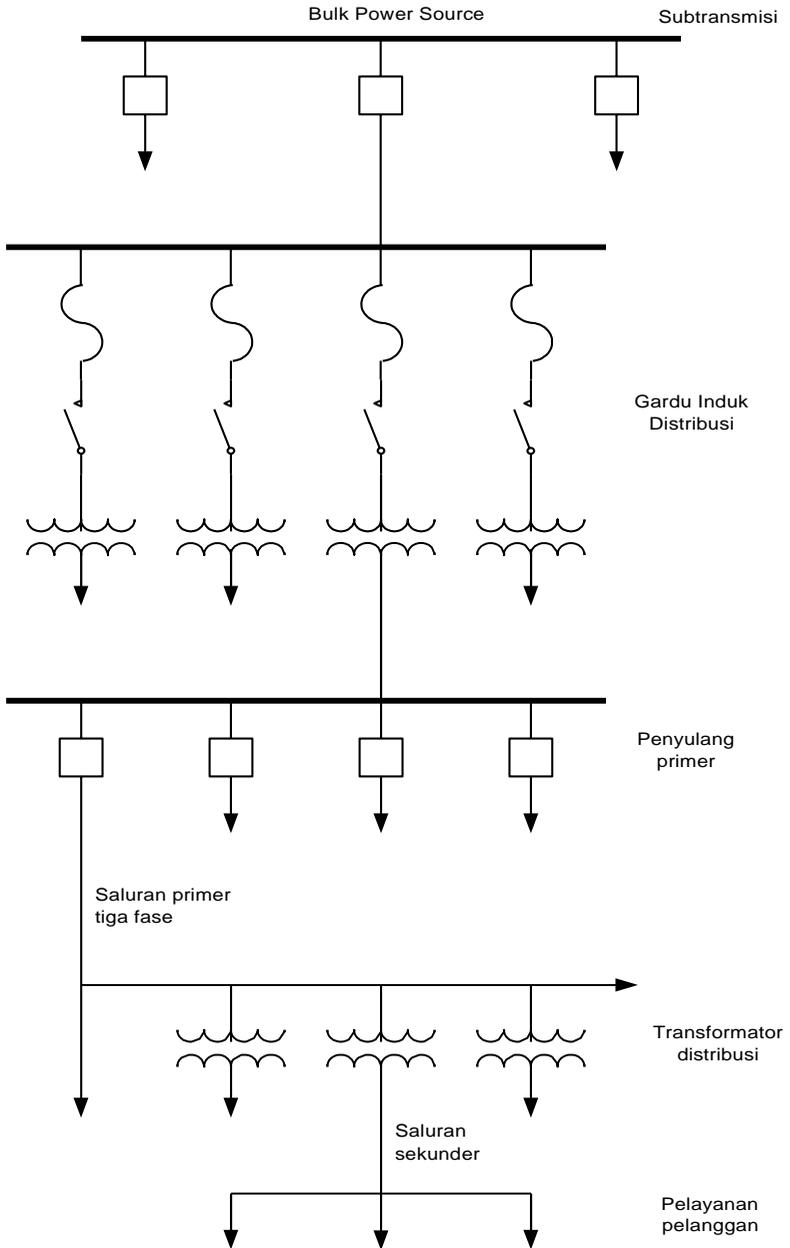
1. Sistem subtransmisi
2. Gardu induk distribusi

3. Penyulang distribusi atau penyulang primer
4. Transformator distribusi
5. Untai sekunder
6. Pelayanan pelanggan (*service drops*)

Akan tetapi, beberapa engineer sistem distribusi lebih suka mendefinisikan sistem distribusi sebagai bagian dari sistem perlengkapan elektrik antara gardu induk dan pelanggan.

Gambar 7.1 menunjukkan diagram satu garis dari sistem distribusi yang khas. Rangkaian subtransmisi mengirimkan energi dari BPS ke gardu induk distribusi. Tegangan subtransmisi berkisar antara 12,47 kV dan 245 kV. Gardu induk distribusi, dimana menjadikan transformator daya bersama-sama dengan peralatan pengatur tegangan, bus-bus, dan peralatan hubung (*switchgear*), menurunkan tegangan subtransmisi ke tegangan sistem primer yang lebih rendah untuk distribusi lokal. Penyulang primer tiga fase, yang biasanya beroperasi pada rentang tegangan 4,16 kV hingga 34,5 kV, mendistribusikan energi listrik dari bus tegangan rendah pada gardu induk ke pusat-pusat beban. Pada pusat-pusat beban tersebut kemudian dibagi-bagikan ke menuju sub-penyulang dan cabang tunggal tiga fase.

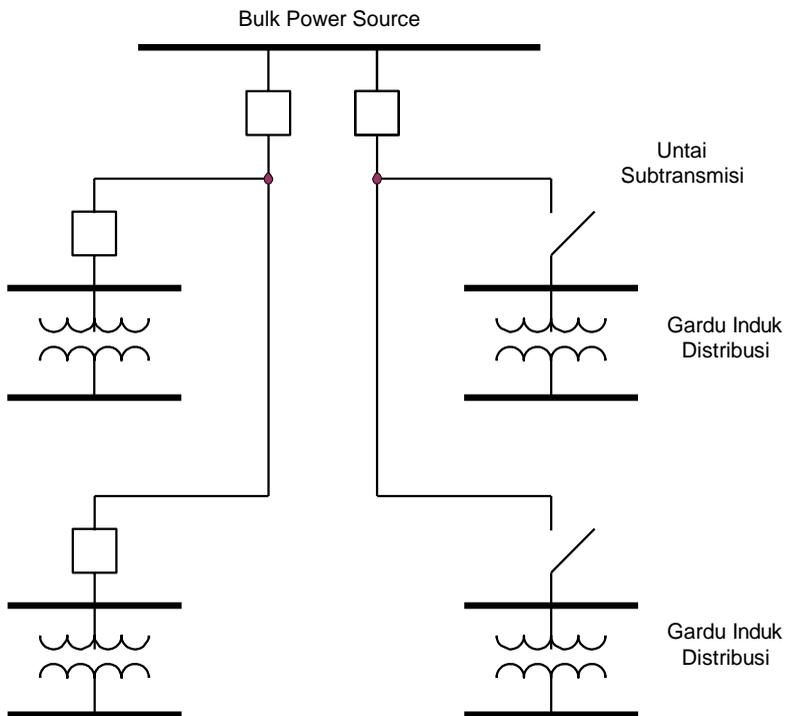
Transformator distribusi yang mempunyai rating dari 10 kVA hingga 500 kVA biasanya terhubung ke penyulang utama, sub-penyulang, dan cabang (*lateral*). Transformator distribusi menurunkan tegangan distribusi ke tegangan pelayanan. Sistem sekunder ini memfasilitasi jalur untuk mendistribusikan energi dari transformator distribusi ke pelanggan melalui pelayanan pelanggan (*service drops*).



Gambar 7.1 Diagram satu garis sistem distribusi.

## 7.2 SUBTRANSMISI

Sistem subtransmisi adalah bagian dari sistem perlengkapan elektrik yang mengirimkan daya dari bulk power sources, sebagaimana halnya gardu induk transmisi yang besar. Untai subtransmisi konstruksinya dapat berupa saluran udara terbuka (*overhead open-wire construction*) atau kabel bawah tanah. Tegangan untai tersebut bervariasi dari 12,47 kV hingga 245 kV. Sebagian besar sistem subtransmisi menggunakan tingkat tegangan 69 kV, 115 kV, dan 138 kV.



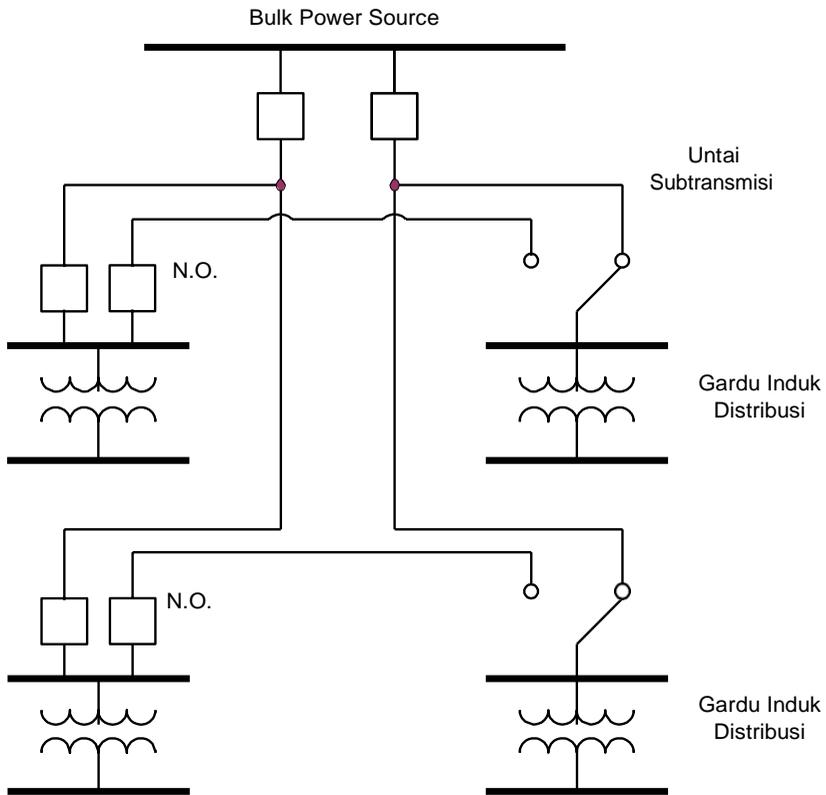
Gambar 7.2 Diagram satu garis subtransmisi tipe radial.

Desain sistem subtransmisi bervariasi dari sistem radial sederhana hingga jaringan subtransmisi yang luas. Pertimbangan utama yang mempengaruhi desain sistem subtransmisi adalah faktor biaya dan keandalannya.

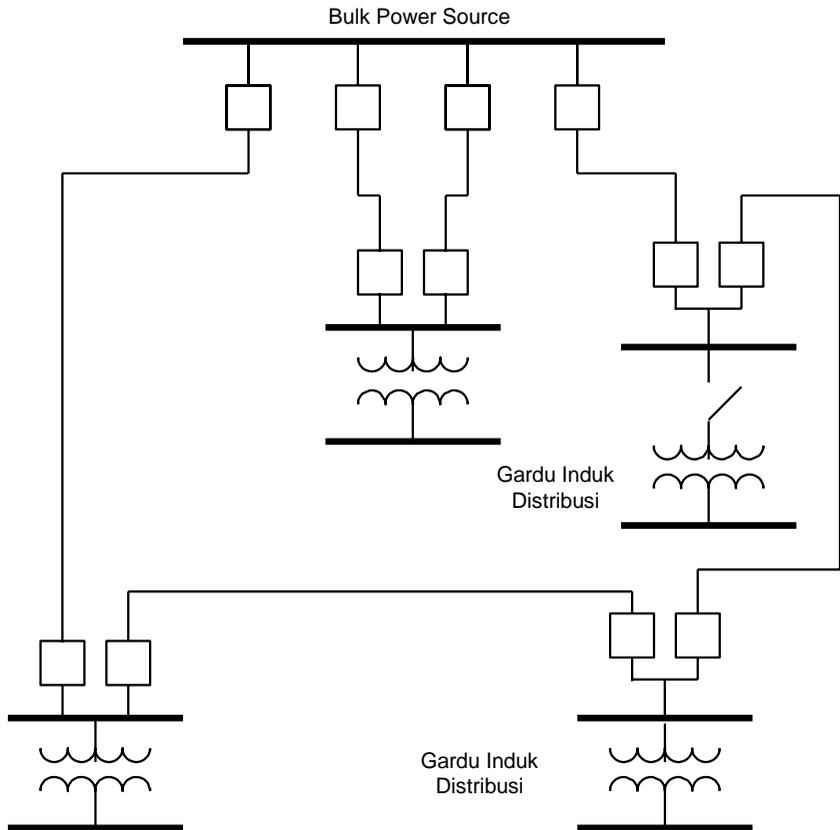
Gambar 7.2 menunjukkan sistem subtransmisi radial. Dalam sistem radial, sebagaimana namanya, untai tersebut menyebar dari bulk power sources ke gardu induk distribusi. Sistem radial adalah sistem sederhana dan biayanya paling murah dibanding sistem lain, tetapi mempunyai tingkat kontinuitas yang rendah. Karena pertimbangan ini, umumnya sistem subtransmisi radial sudah tidak digunakan lagi dalam sistem tenaga listrik modern.

Bentuk yang dimodifikasi dari subtransmisi tipe radial, yang merupakan usaha peningkatan unjuk kerjanya, telah diperkenalkan seperti ditunjukkan dalam gambar 7.3. Dengan bentuk jaringan seperti itu maka jika ada gangguan pada untai subtransmisi, pemulihan pelayanannya relatif lebih cepat.

Secara umum, disebabkan kebutuhan akan keandalan pelayanan yang lebih tinggi, maka sistem subtransmisi didesain berupa untai loop seperti terlihat pada gambar 7.4. Dalam desain ini sebuah untai tunggal yang bermula dari bulk power source langsung menuju sejumlah gardu induk dan kembali ke bus yang sama.



Gambar 7.3 Diagram satu garis subtransmisi tipe radial yang dimodifikasi.



Gambar 7.4 Diagram satu garis subtransmisi tipe loop.

### 7.3 GARDU INDUK DISTRIBUSI

Gardu induk distribusi sering disebutkan hanya "gardu induk" saja. Desain gardu induk distribusi telah distandarisasi oleh industri perlengkapan elektrik berdasarkan pengalaman terdahulu. Akan tetapi proses standarisasi terus berlangsung dari waktu ke waktu, menyesuaikan dengan keadaan terkini.

Perlengkapan yang terdapat dalam gardu induk diantaranya:

1. Transformator tenaga
2. Pemutus tenaga (*circuit breakers*)
3. Saklar pemisah (*disconnecting switch*)
4. Bus-bus stasiun dan isolator
5. Reaktor pembatas arus (*current-limiting reactors*)
6. Reaktor shunt (shunt reactors)
7. Transformator arus
8. Transformator tegangan
9. Transformator tegangan kapasitor
10. Kapasitor kopling
11. Kapasitor seri
12. Kapasitor shunt
13. Sistem pembumian (*grounding system*)
14. Lightning arrester dan/atau celah (*gaps*)
15. Line traps
16. Rele proteksi
17. Baterai
18. dan peralatan pendukung lainnya.

Transformator tenaga merupakan peralatan utama dan terpenting dalam gardu induk distribusi. Kapasitas suatu gardu induk terletak pada kapasitas daya terpasang pada transformator tenaga yang digunakan.

Selain transformator tenaga, pada gardu induk juga terdapat peralatan penting lainnya diantaranya transformator arus,

transformator tegangan, pemutus tenaga (CB), saklar pemisah (DS), dan lain-lain. Transformator arus dan transformator tegangan digunakan untuk keperluan proteksi dan alat-alat ukur.



Gambar 7.5 Transformator tenaga



Gambar 7.6 Transformator arus bertegangan tinggi (72,5 – 550kV) yang menggunakan media isolasi gas.



Gambar 7.7 Transformator tenaga berisolasi gas (300 MVA, 275 kV) untuk gardu induk bawah tanah.

**Latihan:**

1. Gambarkan diagram satu garis sistem distribusi secara umum.
2. Jelaskan fungsi masing-masing komponen dalam sistem distribusi.
3. Sebutkan dan gambarkan diagram satu garis jenis-jenis untai subtransmisi serta jelaskan keuntungan dan kerugiannya.

*« halaman ini sengaja dikosongkan »*

## **BAB VIII**

### **SISTEM DISTRIBUSI PRIMER DAN SEKUNDER**

Tujuan Instruksional Umum:

Memberikan wawasan dan tinjauan analitis mengenai transmisi dan distribusi tenaga listrik disertai perkembangan dan teknologinya dalam sistem tenaga listrik.

Tujuan Instruksional Khusus:

1. Memberikan pengetahuan tentang pengantar sistem distribusi primer dan sekunder.
2. Memberikan pengetahuan tentang sistem distribusi primer pada sistem tenaga listrik.
3. Memberikan pengetahuan tentang sistem distribusi sekunder pada sistem tenaga listrik .
4. Memberikan pengetahuan tentang transformator distribusi tenaga listrik.

#### **8.1 SISTEM DISTRIBUSI PRIMER**

Bagian dari sistem perlengkapan elektrik antara gardu induk distribusi dan transformator distribusi disebut sistem distribusi primer, atau kadang-kadang disebut "sistem primer" saja. Dalam rangkaiannya, pada sistem primer dikenal sebagai penyulang primer atau penyulang distribusi primer.

Sebuah penyulang (*feeder*) terdiri dari penyulang utama, yang biasanya untai tiga fase empat kawat, dan percabangan atau *lateral*,

yang biasanya berupa untai fase tunggal atau tiga fase yang ditambatkan pada penyulang utama. Selain itu juga terdapat sublateral yang ditambatkan ke lateral. Umumnya lateral dan sublateral berlokasi dalam daerah perumahan perkotaan dan pedesaan adalah berfase tunggal dan terdiri dari satu konduktor fase dan konduktor netral. Sebagian besar transformator distribusi merupakan fase tunggal dan terhubung antara fase dan netral melalui pemutus sekring.

Penyulang dalam sistem distribusi primer dipisahkan oleh piranti *reclosing* pada berbagai lokasi yang berguna untuk memutuskan rangkaian secepat mungkin apabila terjadi gangguan. Hal ini dapat dicapai melalui koordinasi operasi dari seluruh sekring dan recloser.

Disebabkan tuntutan akan peningkatan dalam hal keandalan pelayanan, skema proteksi untuk masa mendatang harus lebih canggih dan kompleks, mulaidari piranti yang beroperasi secara manual hingga piranti yang dapat secara otomatis terkendali dari jarak jauh berbasis kendali terbimbing (*supervisory controlled*) atau sistem terkendali komputer (*computer-controlled systems*).

Daerah di kota-kota besar yang tingkat kemacetan jalan-jalannya sangat tinggi dan merupakan beban-beban listrik yang besar biasanya dilayani menggunakan penyulang utama sistem bawah tanah. Sistem ini biasanya menggunakan kabel tiga konduktor tipe radial. Keuntungan dari sistem ini adalah kerapian dan keindahan kota menjadi terjaga dan kerusakan yang jarang terjadi disebabkan instalasinya berada di bawah tanah yang jauh dari gangguan-gangguan terutama gangguan yang sifatnya mekanis. Akan tetapi sistem ini

relatif lebih mahal, dan jika terjadi gangguan maka waktu yang dibutuhkan untuk memperbaikinya relatif lebih lama dibanding penyulang yang menggunakan saluran udara.

Ada beberapa faktor yang mempengaruhi pemilihan rating penyulang utama, diantaranya adalah:

1. Sifat beban yang tersambung,
2. Kerapatan/kepadatan beban pada daerah yang dilayani,
3. Pesat pertumbuhan beban,
4. Kebutuhan akan kapasitas cadangan untuk operasi keadaan darurat,
5. Tipe dan biaya dari konstruksi rangkaian,
6. Desain dan kapasitas gardu induk,
7. Tipe perlengkapan regulasi yang digunakan,
8. Kualitas pelayanan yang dibutuhkan, dan
9. Tingkat kontinuitas pelayanan yang dibutuhkan.

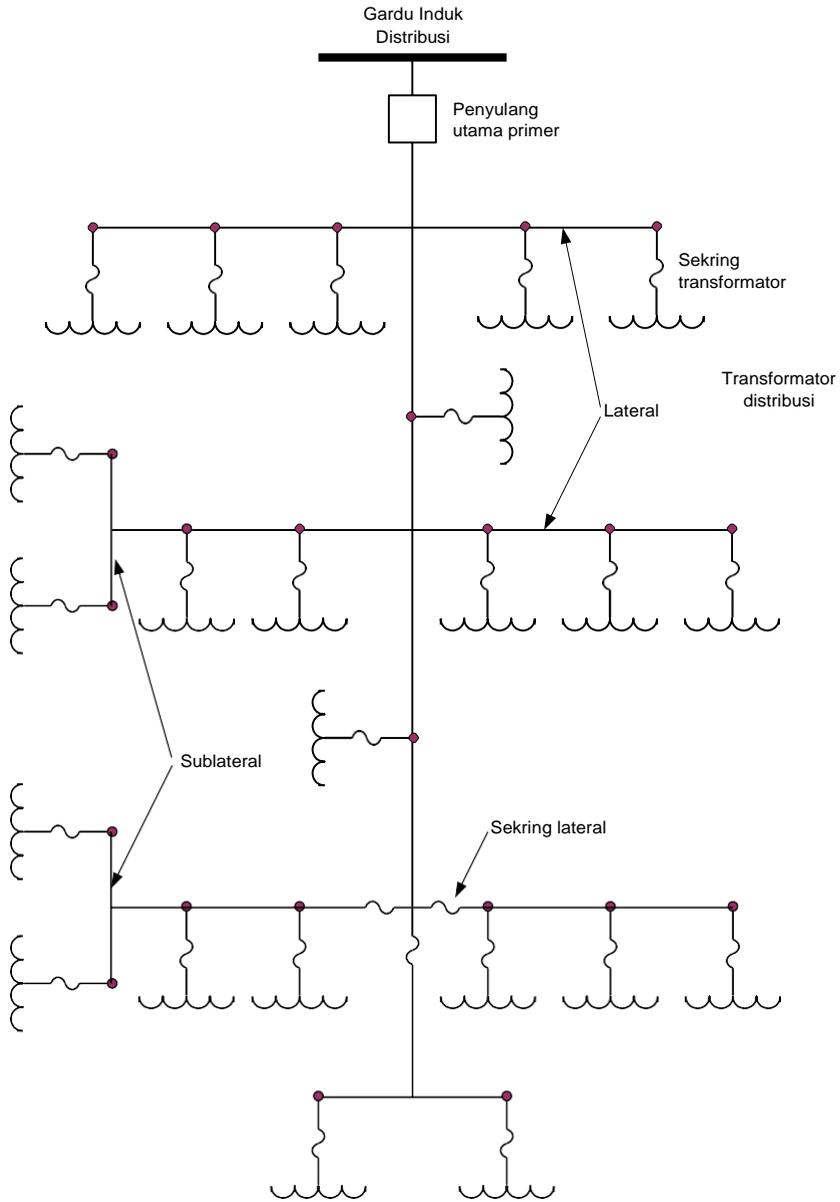
Kondisi tegangan pada sistem distribusi dapat diperbaiki dengan menggunakan kapasitor shunt yang terhubung sedekat mungkin dengan beban untuk memberikan perbaikan tegangan pelayanan yang baik. Penggunaan kapasitor shunt selain untuk memperbaiki tegangan, juga berfungsi untuk memperbaiki faktor daya. Dengan diperbaikinya faktor daya pada sistem distribusi, maka rugi-rugi sistem distribusi dapat diperkecil. Rating kapasitor harus ditentukan dengan hati-hati untuk mencegah terjadinya tegangan lebih ada saat beban yang dilayani sedikit karena peningkatan tegangan yang dihasilkan dari arus kapasitor.

Kondisi tegangan pada sistem distribusi dapat juga diperbaiki menggunakan kapasitor seri. Akan tetapi penerapan kapasitor seri tidak dapat mengurangi arus dan rugi-rugi dalam sistem, sehingga jarang digunakan.

Sebagaimana halnya dalam sistem distribusi secara umum, maka dalam sistem primer juga terdapat tipe-tipe konfigurasi, diantaranya tipe radial, tipe loop, dan jaringan (*network*).

Penyulang primer tipe radial merupakan bentuk yang paling sederhana dan berbiaya paling murah. Penyulang primer tipe radial secara skematis diperlihatkan pada gambar 8.1.

Dalam gambar 8.1 tersebut terlihat bahwa penyulang primer utama kemudian bercabang-cabang menuju berbagai lateral primer, selanjutnya menuju beberapa sublateral untuk melayani transformator distribusi. Umumnya penyulang utama dan subpenyulang merupakan untai tiga fase dengan tiga atau empat kawat, dan lateral menggunakan untai tiga fase atau satu fase.



Gambar 8.1 Diagram satu garis sistem distribusi primer tipe radial

## 8.2 SISTEM DISTRIBUSI SEKUNDER

Sistem distribusi sekunder adalah bagian dari sistem perlengkapan elektrik antara sistem distribusi primer dan beban. Sistem distribusi sekunder sering disebut dengan sistem sekunder saja. Sistem distribusi sekunder meliputi transformator distribusi yang bersifat penurun tegangan (*step-down*), untai sekunder (*secondary main*) pelayanan pelanggan (*service drops*), dan peralatan kWh meter yang mengukur konsumsi energi listrik pada pelanggan.

Umumnya sistem distribusi sekunder dirancang menggunakan fase tunggal untuk daerah pelanggan perumahan dan tiga fase untuk pelanggan daerah industri atau komersial yang mempunyai kerapatan beban tinggi.

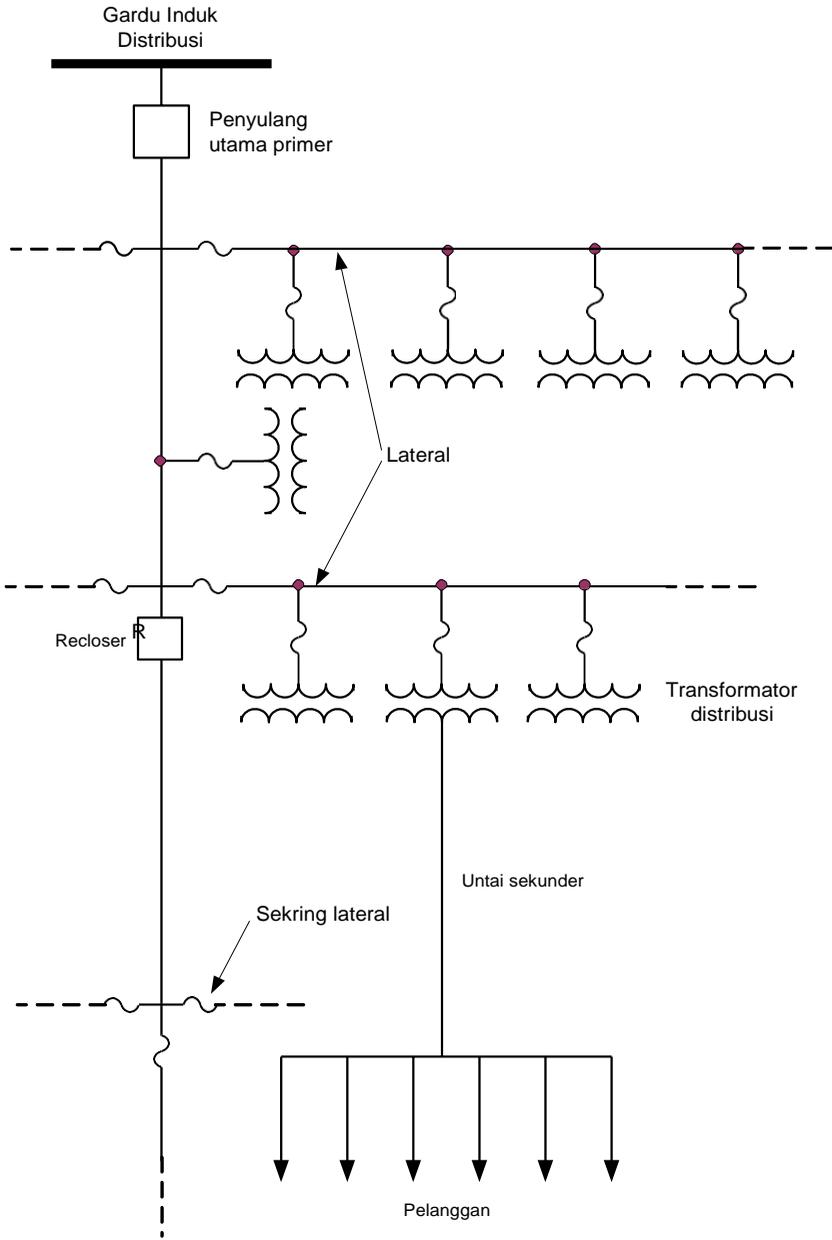
Jenis-jenis sistem distribusi sekunder diantaranya:

1. Sistem pelayanan terpisah untuk masing-masing pelanggan dengan transformator distribusi yang terpisah dan hubungan sekunder.
2. Sistem radial dengan penyulang sekunder yang disuplai oleh transformator distribusi dan mencatu sekelompok pelanggan.
3. Sistem bank sekunder dengan penyulang sekunder yang disuplai oleh beberapa transformator distribusi yang seluruhnya dicatu oleh penyulang primer yang sama.
4. Sistem jaringan sekunder dengan penyulang utama tipe grid yang disuplai oleh banyak transformator distribusi

yang terhubung ke berbagai penyulang untuk mendapatkan catu daya listriknya.

Sistem pelayanan terpisah kadang-kadang digunakan dan melayani area pelayanan industrial atau daerah pedesaan. Umumnya sebagian besar sistem sekunder untuk melayani beban perumahan perkotaan, pedesaan, dan beban komersial yang kecil digunakan sistem distribusi sekunder tipe radial.

Gambar 8.2 menunjukkan diagram satu garis sistem distribusi sekunder tipe radial. Sistem distribusi sekunder tipe radial relatif murah dan sederhana dalam pengoperasiannya.



Gambar 8.2 Diagram satu garis sistem distribusi sekunder tipe radial

### 8.3 TRANSFORMATOR DISTRIBUSI

Umumnya transformator distribusi digunakan untuk menurunkan tegangan sistem primer (2,4 s.d. 34,5 kV) menjadi tegangan pelayanan (120 s.d. 600 V). Transformator distribusi yang digunakan pada saluran distribusi udara dapat diklasifikasikan ke dalam tiga golongan yaitu transformator konvensional, transformator swa-proteksi lengkap (*Completely Self-Protecting*, CSP), dan transformator banking sekunder swa-proteksi lengkap (*Completely Self-Protecting Banking*, CSPB).

Transformator distribusi merupakan ujung tombak sebuah sistem distribusi, karena transformator inilah yang menyediakan daya dari saluran distribusi kepada konsumen. Di Indonesia, untuk sistem distribusi 20 kV, transformator distribusi digunakan untuk menurunkan tegangan 20 kV menjadi tegangan 380 V (fase ke fase) atau 220 V (fase ke netral). Pada umumnya transformator distribusi dilengkapi dengan peralatan-peralatan pendukung seperti arester, pemutus tenaga (CB), jalur pengaman (*protective link*), dan *tap changer*. Transformator distribusi biasanya ditempatkan di tiang distribusi (*over head*), sehingga disebut trafo tipe *pole*.

#### 8.3.1 Konstruksi Transformator Distribusi

Secara umum transformator dapat didefinisikan sebagai suatu peralatan listrik yang digunakan untuk mentransfer energi listrik dari satu rangkaian ke rangkaian listrik yang lain tanpa mengubah frekuensi, dan berdasar atas prinsip induksi elektromagnetik. Dari pengertian tersebut maka transformator tidak memunculkan energi

listrik, namun hanya mentransfer energi listrik dari satu rangkaian AC ke rangkaian AC yang lain melalui kopling magnetik (*magnetic coupling*). Secara umum bagian-bagian transformator adalah:

1. Bagian masukan. yang disebut juga sebagai bagian primer trafo.

Bagian inilah yang dihubungkan dengan sumber energi listrik yang akan dirubah.

2. Bagian keluaran, yang disebut juga sebagai sekunder trafo.  
Bagian inilah yang dihubungkan dengan beban.

3. Bagian belitan atau koil.

Transformator memiliki dua macam belitan, yaitu belitan primer dan belitan sekunder. Belitan primer menarik energi listrik dari sumber untuk kemudian ditransformasikan (diubah tegangannya) ke beban.

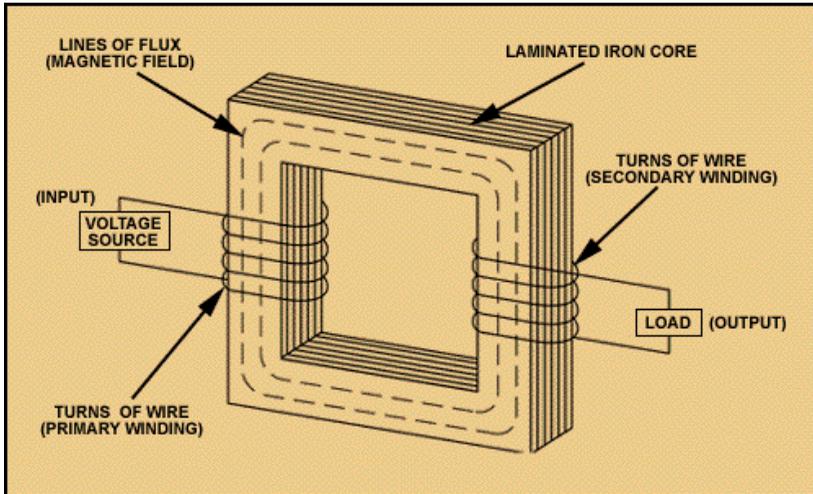
Pada umumnya bagian primer dan sekunder transformator dipisah-pisahkan menjadi beberapa koil (belitan). Hal ini dimaksudkan untuk mengurangi pembentukan fluks yang tidak menghubungkan bagian primer dan sekunder. Pentransformasian hanya akan terjadi saat fluks (*mutual flux*) menghubungkan bagian primer dan sekunder transformator, sementara untuk fluks yang tidak menghubungkan bagian primer dan sekunder disebut fluks bocor (*leakage flux*).

Belitannya pun biasanya dibagi-bagi untuk menurunkan besar tegangan per koil. Hal ini sangat penting pada penggunaan untuk transformator tegangan tinggi, karena ketebalan isolasi antar belitan akan mempengaruhi konstruksi transformator.

Secara umum pembagi-bagian belitan ini dilakukan agar supaya tegangan antar belitan tidak melampaui tegangan 5 kV.



Gambar 8.3 Transformator distribusi.



Gambar 8.4 Konstruksi transformator distribusi

4. Bagian inti (*core*).

Bagian ini digunakan agar fluks magnetisasi yang terbentuk lebih terarah. Inti transformator tidak berupa suatu besi yang padat, namun berupa lapisan-lapisan besi tipis yang ditumpuk. Hal ini dimaksudkan untuk mengurangi panas yang terbentuk sehingga mengurangi rugi-rugi daya trafo. Karena rangkaian primer dengan rangkaian sekunder tidak terhubung secara elektronis, maka inti besi ini memiliki peranan penting dalam pengiriman tenaga listrik dari primer ke sekunder melalui induksi magnetik. Bentuk inti biasanya kotak atau lingkaran (cincin).

### 8.3.2 Jenis Transformator

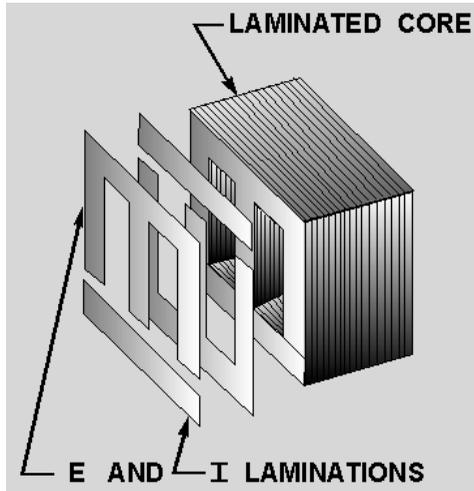
Secara umum terdapat dua jenis tipe inti trafo, yaitu tipe inti (*core*) dan tipe *shell*. Hal ini didasarkan pada cara belitan primer dan belitan sekunder dililitkan di inti.

#### 1. Transformator Tipe Inti

Pada tipe ini belitan primer dan sekunder mengitari bagian samping inti (“kaki”). Tipe ini biasa digunakan pada trafo distribusi.

#### 2. Transformator Tipe *Shell*

Pada jenis ini inti mengitari belitan primer maupun sekunder. Tipe ini biasa digunakan pada transformator- transformator ukuran besar dengan tegangan yang tinggi. Apabila inti transformator digunakan untuk aplikasi tegangan yang sangat tinggi, maka jumlah fluks bocor akan meningkat.



Gambar 8.5 Inti transformator



Gambar 8.6 Transformator tipe inti



Gambar 8.7 Transformator tipe shell

**Latihan:**

1. Gambarkan diagram satu garis sistem distribusi primer dan sekunder secara umum.
2. Jelaskan jenis-jenis konfigurasi sistem distribusi primer dan sekunder.
3. Analisislah mengapa konfigurasi sistem distribusi baik primer maupun sekunder digunakan berbagai jenis konfigurasi.

*« halaman ini sengaja dikosongkan »*

## **BAB IX**

### **RUGI-RUGI DALAM SISTEM DISTRIBUSI DAN USAHA MEMINIMALKANNYA**

#### **Tujuan Instruksional Umum:**

Memberikan wawasan dan tinjauan analitis mengenai transmisi dan distribusi tenaga listrik disertai perkembangan dan teknologinya dalam sistem tenaga listrik.

#### **Tujuan Instruksional Khusus:**

1. Memberikan pengetahuan tentang pengantar rugi-rugi dalam sistem distribusi.
2. Memberikan pengetahuan tentang rekonfigurasi jaringan distribusi tenaga listrik.
3. Memberikan pengetahuan tentang metode-metode rekonfigurasi jaringan distribusi tenaga listrik.
4. Memberikan pengetahuan tentang analisis rugi-rugi dalam sistem distribusi tenaga listrik.

## **9.1 PENDAHULUAN**

Usaha meminimalkan rugi-rugi (*losses*) daya sistem distribusi tenaga listrik telah menjadi persoalan penting dalam dekade terakhir. Dari seluruh komponen sistem tenaga listrik, sistem distribusi merupakan komponen yang mempunyai kerugian terbesar. Sebagai contoh, berdasarkan audit energi hingga tahun 2004, angka kerugian energi total PLN se-Indonesia adalah 16,84% [6]. Dari total kerugian

energi listrik tersebut, kerugian sistem distribusi tercatat memiliki kerugian terbesar yaitu 14,47%, sedangkan kerugian sistem transmisi hanya 2,37%. Oleh karena itu dalam penelitian ini dibahas upaya menekan kerugian energi listrik yang terdapat pada sistem distribusi, karena memiliki kerugian jaring paling besar dalam sistem tenaga listrik.

Pada dasarnya selain rekonfigurasi jaring terdapat beberapa cara untuk meminimalkan kerugian sistem distribusi daya listrik yaitu pemasangan kapasitor, penyeimbangan beban, dan meningkatkan aras tegangan listrik [7-12]. Cara pemasangan kapasitor pada jaring distribusi dan penyeimbangan beban biasanya mengalami kesulitan karena beban sistem distribusi yang sangat dinamis. Dengan demikian nilai kapasitansi kapasitor harus selalu berubah dari waktu ke waktu, dan beban harus selalu diseimbangkan. Sedangkan cara meminimalkan kerugian dengan meningkatkan aras tegangan listrik memerlukan biaya yang besar karena seluruh peralatan yang terhubung dengan sistem ini harus mampu bekerja pada tegangan yang baru, sementara hasilnya belum tentu memuaskan. Oleh karenanya dalam penelitian ini difokuskan pada cara rekonfigurasi jaring distribusi daya listrik dengan integrasi pembangkitan tersebar, sehingga didapatkan konfigurasi jaringan distribusi yang optimal.

## **9.2 REKONFIGURASI JARINGAN DISTRIBUSI**

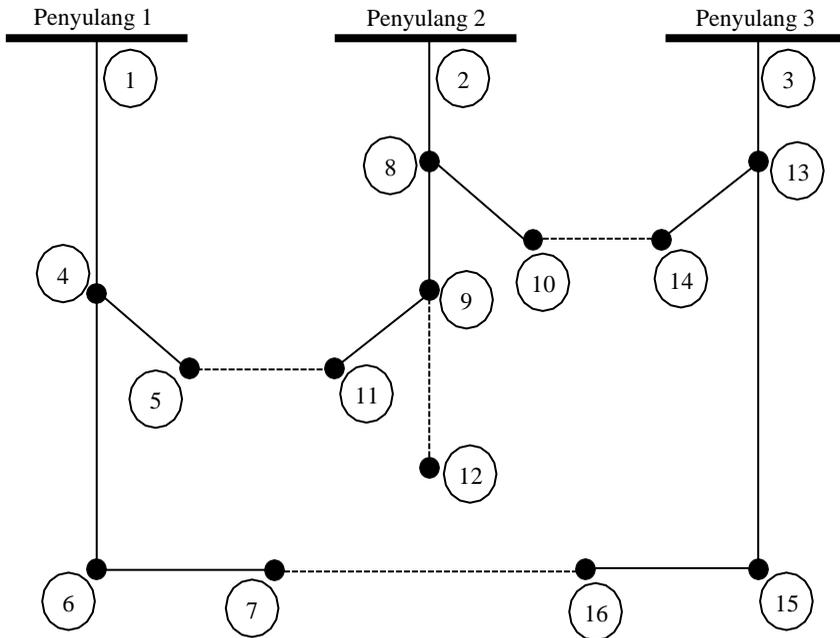
Otomasi distribusi merupakan salah satu isu penting dalam sistem tenaga listrik. Otomasi sistem distribusi berguna untuk meningkatkan keandalan, efisiensi, dan kualitas layanan.

Perkembangan pesat dalam teknologi komputer dan telekomunikasi telah mendorong aplikasinya dalam pengendalian sistem tenaga listrik, khususnya otomasi sistem distribusi. Operasi sistem distribusi dapat dimonitor dan dikendalikan dari jarak jauh pada pusat operasi. Salah satu keuntungan dari otomasi sistem distribusi adalah kemudahan dalam melakukan rekonfigurasi jaringan guna meningkatkan unjukkerja sistem distribusi.

Dalam suatu sistem distribusi, setiap penyulang melayani beban yang terdiri dari jenis beban residensial, industrial, dan komersial. Jenis-jenis beban tersebut mempunyai pola beban harian yang bervariasi sehingga beban puncak setiap penyulang dapat terjadi pada waktu yang berbeda. Dalam kondisi operasi normal, sebagian beban distribusi dapat dipindahkan dari beban yang tinggi ke beban yang relatif rendah melalui rekonfigurasi jaringan.

Penyulang distribusi terdiri dari sejumlah *switch* yang dalam keadaan normalnya tertutup (*sectionalized switches*) dan *switch* yang dalam keadaan normalnya terbuka (*tie switches*). Rekonfigurasi jaringan distribusi merupakan proses pengubahan struktur topologi jaringan distribusi dengan membuka atau menutup *sectionalized switches* dan *tie switch*. Pada saat perubahan kondisi operasi, rekonfigurasi jaringan dilakukan dengan membuka atau menutup *switch-switch* jaringan sesuai dengan kapasitas transformator, kapasitas termal penyulang, jatuh tegangan, dan kondisi jaringan. Tujuan rekonfigurasi jaringan distribusi di antaranya: menurunkan rugi-rugi daya, menyeimbangkan beban, mengurangi deviasi tegangan, dan memulihkan sistem. Rekonfigurasi jaringan distribusi

mencakup permasalahan optimisasi yang kompleks. Hal ini disebabkan adanya batasan-batasan pada saat menemukan solusi optimal atau solusi yang mendekati optimal dari permasalahan yang ditangani.



Gambar 9.1. Sistem distribusi 16 simpul (Abdelaziz dkk, 2009).

Pada Gambar 9.1 ditunjukkan model sistem distribusi 16 simpul (Abdelaziz dkk, 2009). *Switch-switch* pada saluran dengan garis putus-putus yang menghubungkan simpul-simpul (10-14), (5-11), dan (7-16) adalah *tie switches*, sedangkan *switch-switch* lain pada saluran dengan garis tegas adalah *sectionalized switches*. Pada saat kondisi operasi, rekonfigurasi penyulang distribusi dilakukan dengan

cara membuka/menutup kedua jenis *switch* untuk mengurangi rugi-rugi saluran distribusi. *Tie switch* dapat ditutup untuk tujuan transfer daya ke penyulang lain, dan dalam waktu yang sama *sectionalized switch* harus dibuka untuk menjaga struktur jaringan distribusi agar tetap radial.

### **9.3 REKONFIGURASI JARINGAN DISTRIBUSI MENGGUNAKAN METODE *FUZZY MULTI-OBJECTIVE***

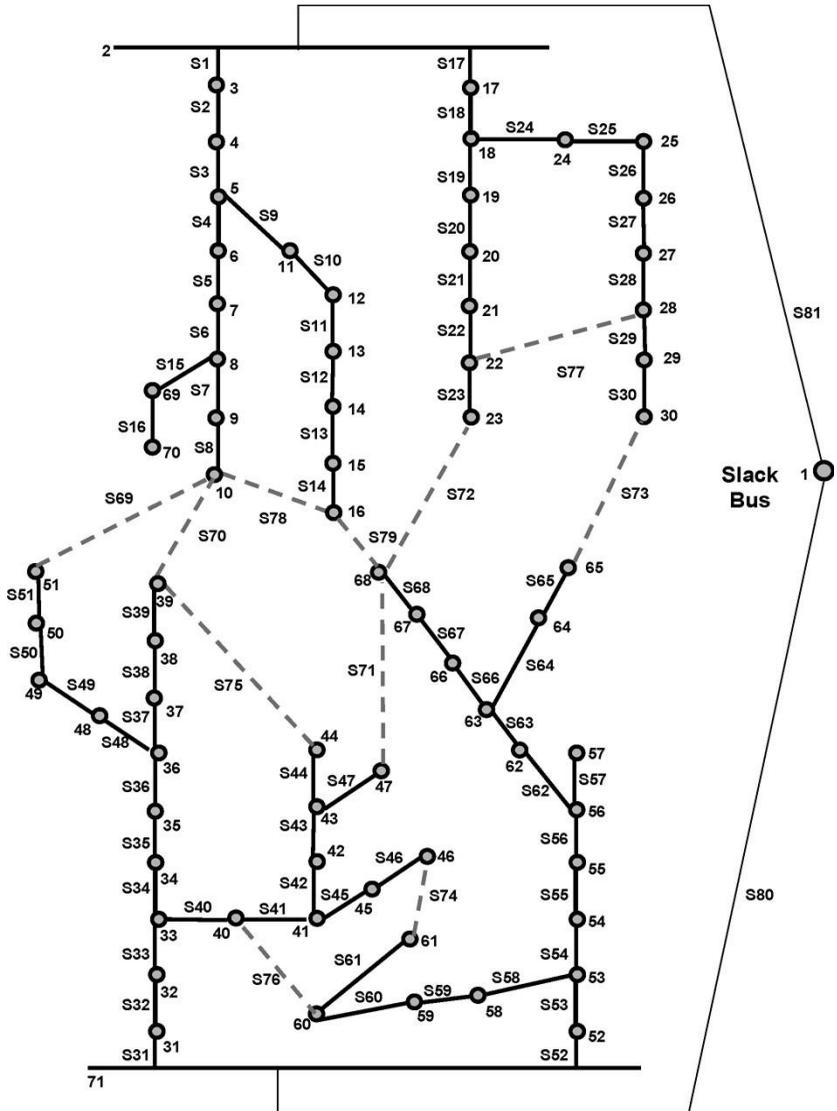
Dalam penelitian yang telah dilakukan oleh Syahputra (2012) telah dilakukan ujicoba terhadap sistem distribusi radial 11-kV standar IEEE yang mempunyai dua gardu induk, empat penyulang, 70 bus, dan 78 cabang seperti ditunjukkan pada Gambar 9.2. Sebelum dilakukan rekonfigurasi jaring distribusi sebagaimana terlihat pada Gambar 9.2, rugi-rugi daya aktif total jaring tersebut adalah 227.510 kW. Dalam kondisi awal sistem ini, efisiensi jaring distribusi adalah sebesar 95.142%. magnitudo tegangan minimum yang terjadi pada bus 67 adalah sebesar 0.900 p.u., sebagaimana terlihat pada Gambar 9.3.

Dalam penelitian ini, dimodelkan adanya pemasangan tujuh pembangkitan tersebar (*distributed generations*, DG) pada bus-bus 3, 6, 24, 29, 38, 52, dan bus 64, sebagaimana terlihat pada Tabel 2.1. Berdasarkan hasil penelitian untuk studi kasus ini, maka dapat dilihat dari sistem uji kasus 70 bus bahwa DG memberikan pengaruh dalam pengurangan rugi-rugi daya listrik pada jaring distribusi.

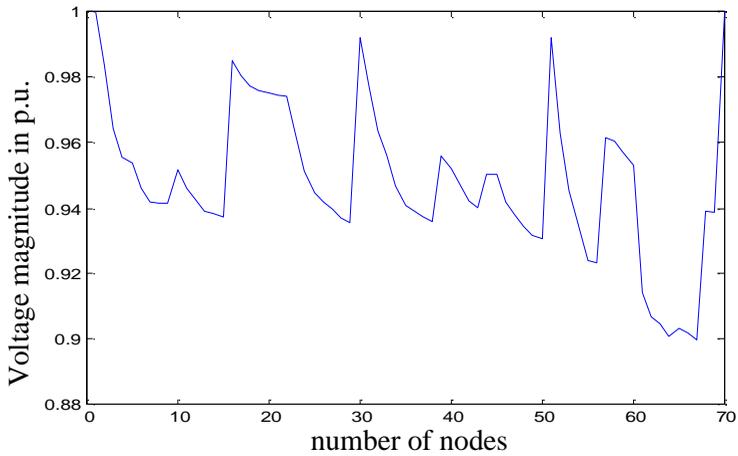
Tabel 9.1. Instalasi dan kapasitas DG

Bus	Kapasitas (kW)	Faktor Daya
3	50	0.8
6	100	0.9
24	200	0.9
29	100	1
38	200	0.9
52	50	0.8
64	100	0.9

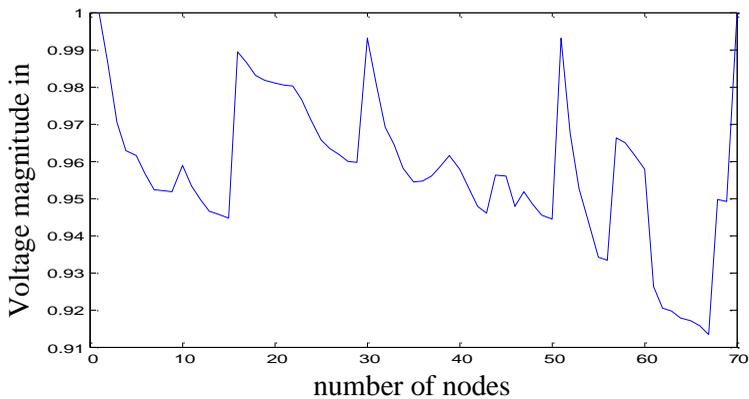
Rugi-rugi daya aktif jaring distribusi dengan pemasangan DG adalah 156.206 kW, atau, efisiensi jaring distribusi adalah sebesar 96.633%, sebagaimana terlihat pada Tabel 9.2. Magnitudo tegangan minimum terjadi pada bus 67 yaitu sebesar 0.913, sebagaimana terlihat pada Gambar 9.4.



Gambar 9.2. Sistem distribusi radial 11-kV, 70 bus.



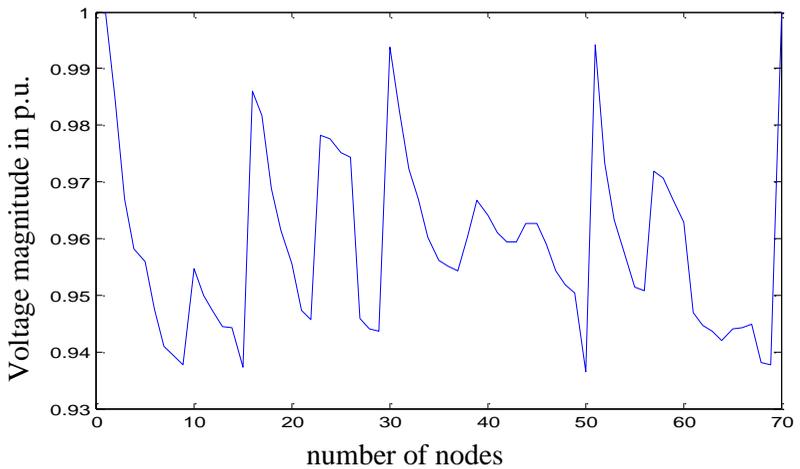
Gambar 9.3. Profil tegangan tanpa DG sebelum rekonfigurasi



Gambar 9.4. Profil tegangan dengan DG sebelum rekonfigurasi

Setelah dilakukan rekonfigurasi, rugi-rugi daya aktif total

adalah sebesar 141.239 kW, atau dengan kata lain, efisiensi jaring distribusi adalah sebesar 96.942%, sebagaimana ditunjukkan pada Tabel 9.2. Magnitudo tegangan minimum terjadi pada bus 15 yaitu sebesar 0.937 p.u. Pada Gambar 9.5 ditunjukkan profil tegangan untuk masing-masing bus jaring distribusi dengan integrasi DG setelah dilakukan rekonfigurasi jaringan.



Gambar 9.5. Profil tegangan dengan DG setelah rekonfigurasi

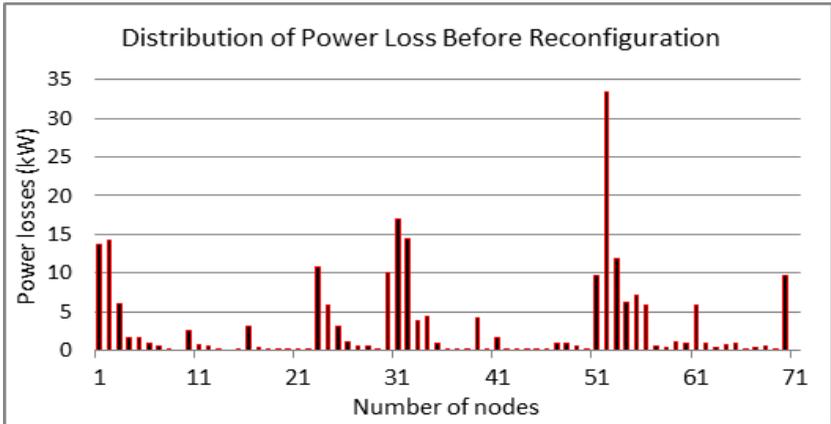
Tabel 9.2. Hasil Simulasi Jaringan Distribusi 70 Bus

Uji Kasus	Parameter Analisis		
	Kerugian Daya Aktif (kW)	Efisiensi Jaringan Distribusi (%)	Tegangan Minimum (p.u.)
Jaringan distribusi tanpa DG sebelum rekonfigurasi	227.510	95.142	0.900 ( $V_{67}$ )
Jaringan distribusi dengan DG sebelum rekonfigurasi	156.206	96.633	0.913 ( $V_{67}$ )
Jaringan distribusi dengan DG setelah rekonfigurasi	141.239	96.942	0.937 ( $V_{15}$ )

Pada Gambar 9.6 ditunjukkan distribusi rugi-rugi daya untuk setiap bus sebelum rekonfigurasi jaringan, sedangkan Gambar 9.7 menunjukkan distribusi rugi-rugi daya untuk setiap bus sesudah rekonfigurasi jaringan. Berdasarkan Gambar 2.13 dan Gambar 2.14 dapat diobservasi bahwa rugi-rugi daya listrik hampir setiap bus mengalami penurunan kecuali pada bus-bus 4, 6, 7, 11, 16, 18, 19, dan bus 20, dimana rugi-rugi dayanya mengalami sedikit peningkatan karena pembagian beban ke dalam penyulang-pengulanganya.

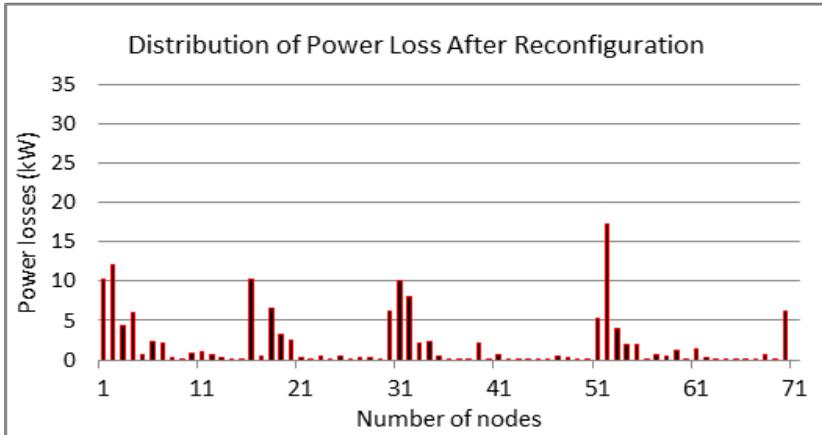
Berdasarkan hasil studi kasus dalam penelitian ini, maka dapat diperhatikan bahwa dari uji kasus sistem distribusi radial 70 bus bahwa DG memberikan pengaruh positif dalam penurunan rugi-rugi daya listrik pada jaringan, dan struktur topologi jaringan optimum

tanpa pembangkitan tersebar (DG) berbeda dengan struktur topologi jaringan optimum dengan DG.



Gambar 9.6. Distribusi rugi-rugi daya sebelum rekonfigurasi.

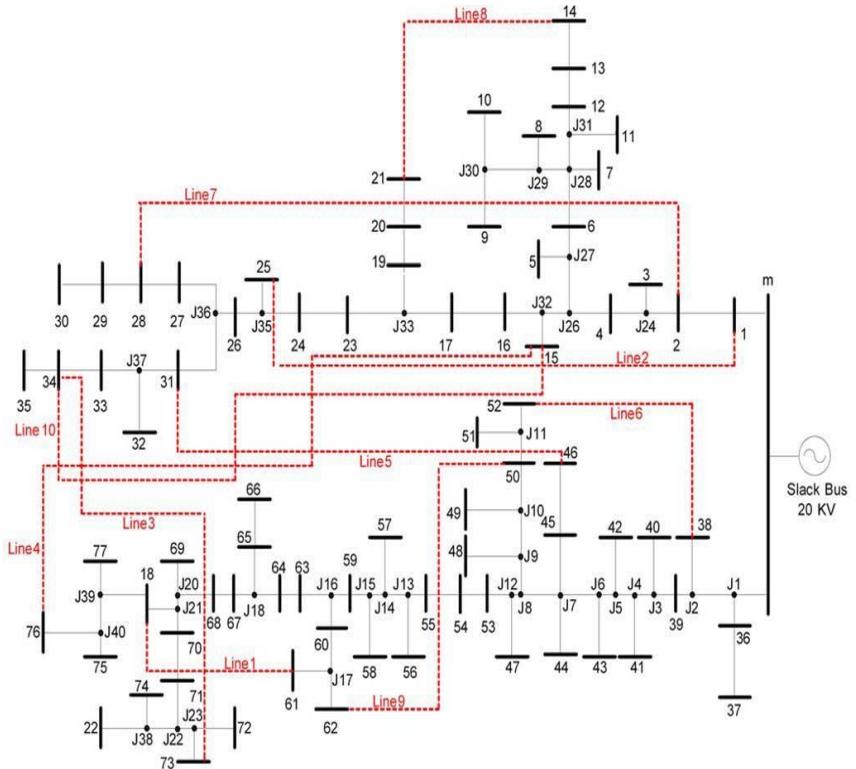
Berdasarkan uji kasus sistem distribusi radial 70 bus dengan integrasi DG, metode fuzzy multiobjective yang digunakan dalam penelitian ini memberikan hasil yang signifikan dalam upaya pengurangan rugi-rugi daya listrik, sehingga dengan demikian memberikan kontribusi penting dalam peningkatan efisiensi sistem distribusi daya listrik.



Gambar 9.7. Distribusi rugi-rugi daya setelah rekonfigurasi jaringan.

Dalam penelitian lebih lanjut yang telah dilakukan oleh Syahputra (2013), dilakukan uji coba terhadap sistem distribusi radial 20-kV yang mempunyai dua gardu induk, empat penyulang, 77 bus cabang seperti ditunjukkan pada Gambar 9.8.

Sebelum dilakukan rekonfigurasi jaringan distribusi sebagaimana terlihat pada Gambar 9.8, rugi-rugi daya aktif total jaringan tersebut adalah 229.64 kW. Dalam kondisi awal sistem ini, efisiensi jaringan distribusi adalah sebesar 93.25%. magnitudo tegangan minimum yang terjadi pada bus 67 adalah sebesar 0.900 p.u., sebagaimana terlihat pada Gambar 9.9.



Gambar 9.8. Sistem distribusi radial 20-kV, 77 bus.

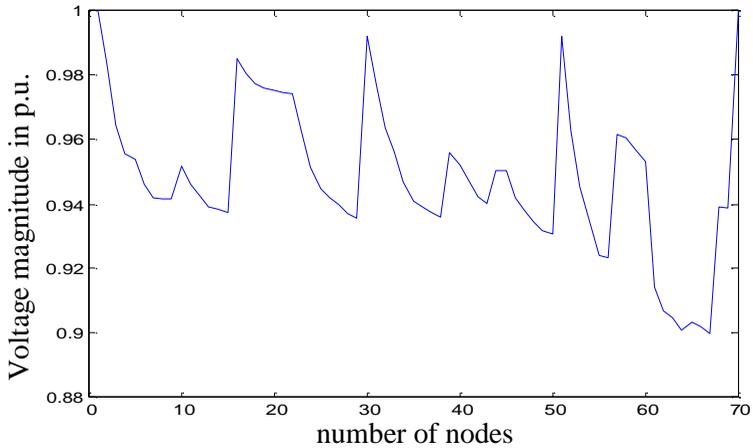
Dalam penelitian ini, dimodelkan adanya pemasangan tujuh pembangkitan tersebar (*distributed generations*, DG) pada bus-bus 3, 6, 24, 29, 38, 52, dan bus 64, sebagaimana terlihat pada Tabel 9.3. Berdasarkan hasil penelitian untuk studi kasus ini, maka dapat dilihat dari sistem uji kasus 77 bus bahwa DG memberikan pengaruh dalam pengurangan rugi-rugi daya listrik pada jaringan distribusi. Rugi-rugi daya aktif jaringan distribusi dengan pemasangan DG adalah 179.87 kW, atau, efisiensi jaringan distribusi adalah sebesar 94.63 %, sebagaimana terlihat pada Tabel 9.4. Magnitudo tegangan minimum

terjadi pada bus 67 yaitu sebesar 0.913, sebagaimana terlihat pada Gambar 9.9.

Tabel 9.3. Instalasi dan kapasitas DG

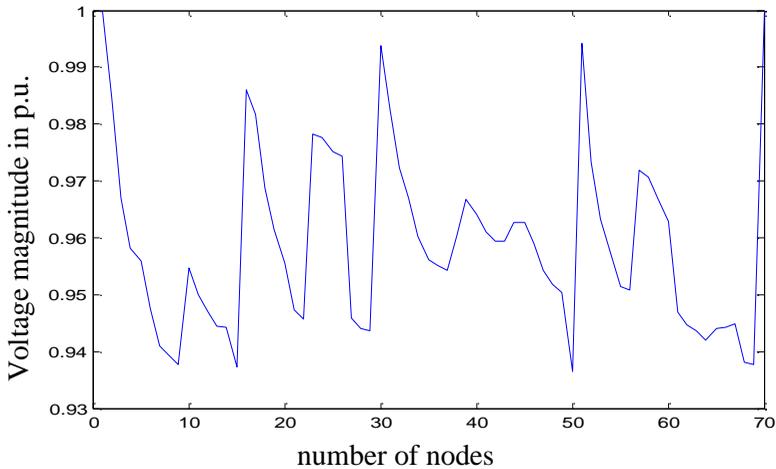
<b>Bus</b>	<b>Kapasitas (kW)</b>	<b>Power Factor</b>
5	150	0.8
7	100	0.9
14	100	0.9
22	100	1
28	150	0.9
34	50	0.8
36	100	0.9
41	150	0.8
46	100	0.9
54	200	0.9
59	100	1
68	200	0.9
70	50	0.8
74	100	0.9

Setelah dilakukan rekonfigurasi, rugi-rugi daya aktif total adalah sebesar 165.07 kW, atau dengan kata lain, efisiensi jaringan distribusi adalah sebesar 95.05 %, sebagaimana ditunjukkan pada Tabel 9.4. magnitudo tegangan minimum terjadi pada bus 15 yaitu sebesar 0.937 p.u. pada Gambar 9.10. ditunjukkan profil tegangan untuk masing-masing bus jaringan distribusi dengan integrasi DG setelah dilakukan rekonfigurasi jaringan.



Gambar 9.9. Profil tegangan tanpa DG sebelum rekonfigurasi.

Pada Gambar 9.11 ditunjukkan distribusi rugi-rugi daya untuk setiap bus sebelum rekonfigurasi jaringan, sedangkan Gambar 9.12 menunjukkan distribusi rugi-rugi daya untuk setiap bus sesudah rekonfigurasi jaringan. Berdasarkan Gambar 9.11 dan Gambar 9.12 dapat diobservasi bahwa rugi-rugi daya listrik hampir setiap bus mengalami penurunan kecuali pada bus-bus 4, 6, 7, 11, 16, 18, 19, dan bus 20, dimana rugi-rugi dayanya mengalami sedikit peningkatan karena pembagian beban ke dalam penyulang-pengulangannya.



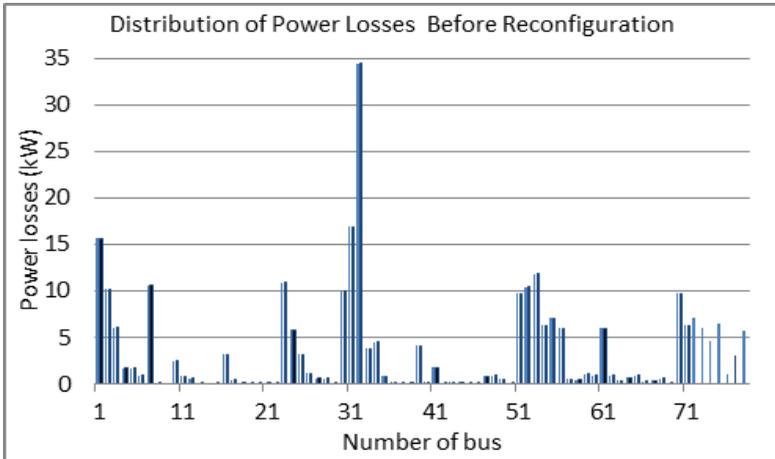
Gambar 9.10. Profil tegangan dengan DG setelah rekonfigurasi

Tabel 9.4. Hasil Simulasi Jaringan Distribusi 70 Bus

Uji Kasus	Parameter Analisis		
	Kerugian Daya Aktif (kW)	Efisiensi Jaringan Distribusi (%)	Tegangan Minimum (p.u.)
Jaringan distribusi tanpa DG sebelum rekonfigurasi	229.64	93.25	0.891 (V <sub>17</sub> )
Jaringan distribusi dengan DG sebelum rekonfigurasi	179.87	94.63	0.902 (V <sub>17</sub> )
Jaringan distribusi dengan DG setelah rekonfigurasi	165.07	95.05	0.918 (V <sub>45</sub> )

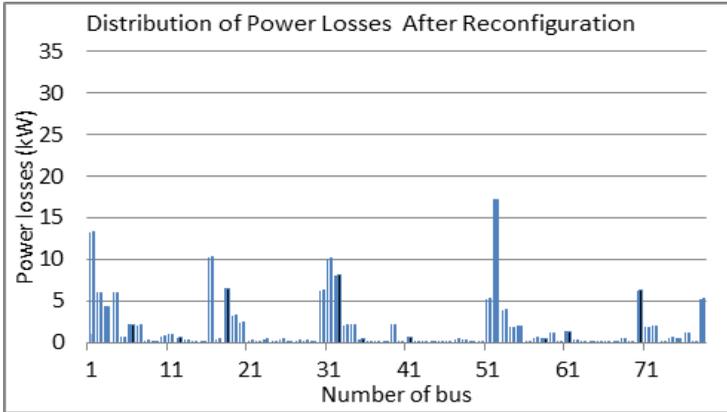
Berdasarkan hasil studi kasus dalam penelitian ini, maka dapat diperhatikan bahwa dari uji kasus sistem distribusi radial 77 bus

bahwa DG memberikan pengaruh positif dalam penurunan rugi-rugi daya listrik pada jaringan, dan struktur topologi jaringan optimum tanpa pembangkitan tersebar (DG) berbeda dengan struktur topologi jaringan optimum dengan DG.



Gambar 9.11. Distribusi rugi-rugi daya sebelum rekonfigurasi

Berdasarkan uji kasus sistem distribusi radial 77 bus dengan integrasi DG, metode fuzzy multiobjective yang digunakan dalam penelitian ini memberikan hasil yang signifikan dalam upaya pengurangan rugi-rugi daya listrik, sehingga dengan demikian memberikan kontribusi penting dalam peningkatan efisiensi sistem distribusi daya listrik.



Gambar 9.12. Distribusi rugi-rugi daya setelah rekonfigurasi

Metode yang dikembangkan dalam penelitian ini tidak dibandingkan dengan metode lain, karena sepengetahuan penulis belum ada metode yang sama untuk dapat dibandingkan hasil-hasilnya dalam uji kasus sistem distribusi 77 bus dengan integrasi pembangkitan tersebar (*distributed generation, DG*).

### Latihan:

1. Jelaskan urgensi meminimalkan rugi-rugi pada jaringan distribusi.
2. Jelaskanlah metode-metode optimisasi yang telah digunakan dalam meminimalkan rugi-rugi pada jaringan distribusi.
3. Analisislah mengapa rekonfigurasi jaringan distribusi merupakan metode minimisasi jaringan distribusi yang populer.

## **BAB X**

### **TOPOLOGI JARINGAN DISTRIBUSI**

#### **Tujuan Instruksional Umum:**

Memberikan wawasan dan tinjauan analitis mengenai transmisi dan distribusi tenaga listrik disertai perkembangan dan teknologinya dalam sistem tenaga listrik.

#### **Tujuan Instruksional Khusus:**

1. Memberikan pengetahuan tentang pengantar topologi jaringan distribusi tenaga listrik.
2. Memberikan pengetahuan tentang sistem jaringan distribusi tenaga listrik.
3. Memberikan pengetahuan tentang sistem jaringan distribusi loop.
4. Memberikan pengetahuan tentang sistem jaringan distribusi spindel.
5. Memberikan pengetahuan tentang dampak gangguan hubung singkat pada jaringan distribusi.

Klasifikasi jaringan distribusi berdasarkan letak jaringan terhadap posisi gardu distribusi dibedakan menjadi 2 (dua) jenis yaitu:

- Jaringan distribusi primer (jaringan distribusi tegangan menengah).
- Jaringan distribusi sekunder (jaringan distribusi tegangan rendah).

Jaringan distribusi primer (JDTM) merupakan suatu jaringan yang letaknya sebelum gardu distribusi berfungsi menyalurkan tenaga listrik bertegangan menengah (misalnya 6 kV atau 20 kV). Hantaran dapat berupa kabel dalam tanah atau saluran/kawat udara yang menghubungkan gardu induk (sekunder trafo) dengan gardu distribusi atau gardu hubung (sisi primer trafo didistribusi).

Jaringan distribusi sekunder (JDTR) merupakan suatu jaringan yang letaknya setelah gardu distribusi berfungsi menyalurkan tenaga listrik bertegangan rendah (misalnya 220 V/380 V). Hantaran berupa kabel tanah atau kawat udara yang menghubungkan dari gardu distribusi (sisi sekunder trafo distribusi) ke tempat konsumen atau pemakai (misalnya industri atau rumah – rumah).

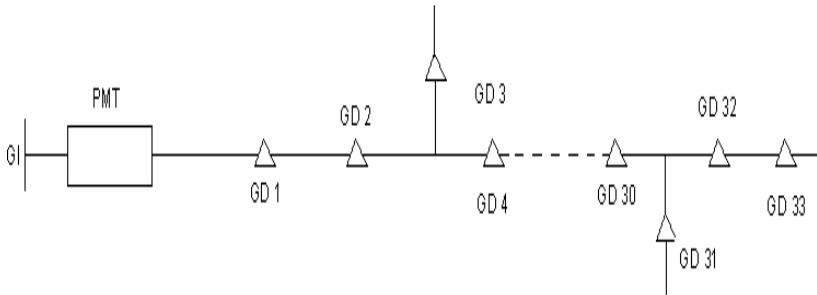
Sedangkan untuk gardu distribusi sendiri adalah suatu tempat/sarana, dimana terdapat transformator step down yaitu transformator yang menurunkan tegangan dari tegangan menengah menjadi tegangan rendah (sesuai kebutuhan konsumen).

Berdasarkan konfigurasi jaringan, maka sistem jaringan distribusi dapat dikelompokkan menjadi 3 (tiga) macam, yaitu sistem jaringan distribusi radial, loop dan spindel.

### **10.1 Sistem Jaringan Distribusi Radial**

Bentuk jaringan ini merupakan bentuk yang paling sederhana, banyak digunakan dan murah. Dinamakan radial karena saluran ini

ditarik secara radial dari suatu titik yang merupakan sumber dari jaringan itu dan dicabang – cabangkan ke titik – titik beban yang dilayani, seperti terlihat pada Gambar 10.1.



Gambar 10.1. Jaringan Distribusi Radial

Catu daya berasal dari satu titik sumber dan karena adanya pencabangan – pencabangan tersebut, maka arus beban yang mengalir disepanjang saluran menjadi tidak sama sehingga luas penampang konduktor pada jaringan bentuk radial ini ukurannya tidak sama sehingga luas penampang konduktor pada jaringan bentuk radial ini ukurannya tidak sama karena arus yang paling besar mengalir pada jaringan yang paling dekat dengan gardu induk. Sehingga saluran yang paling dekat dengan gardu induk ini ukuran penampangnya relatif besar dan saluran cabang – cabangnya makin ke ujung dengan arus beban yang lebih kecil mempunyai ukuran konduktornya lebih kecil pula. Spesifikasi dari jaringan bentuk radial ini adalah :

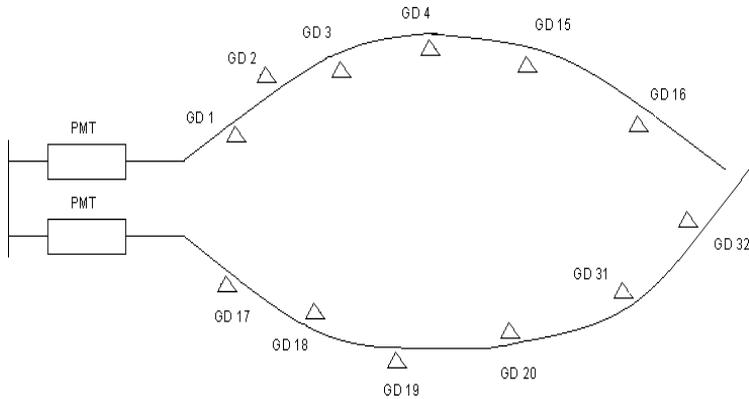
- a. Bentuknya sederhana.
- b. Biaya investasinya murah.

- c. Kualitas pelayanan dayanya relatif jelek, karena rugi tegangan dan rugi daya yang terjadi pada saluran relatif besar.
- d. Kontinuitas pelayanan daya kurang terjamin sebab antara titik sumber dan titik beban hanya ada satu alternatif saluran sehingga bila saluran tersebut mengalami pemadaman total, yaitu daerah saluran sesudah atau dibelakang titik gangguan selama gangguan belum teratasi.

Untuk melokalisir gangguan pada bentuk radial ini biasanya dilengkapi dengan peralatan pengaman, fungsinya untuk membatasi daerah yang mengalami pemadaman total, yaitu daerah saluran sesudah atau dibelakang titik gangguan selama gangguan belum teratasi.

## **10.2 Sistem Jaringan Distribusi Loop**

Jaringan ini merupakan bentuk tertutup, disebut juga bentuk jaringan ring. Susunan rangkaian saluran membentuk ring, seperti terlihat pada gambar 2.3 yang memungkinkan titik beban terlayani dari dua arah saluran, sehingga kontinuitas pelayanan lebih terjamin serta kualitas dayanya menjadi lebih baik, karena drop tegangan dan rugi daya saluran menjadi lebih kecil.



Gambar 10.2. Jaringan Distribusi Loop

Bentuk sistem jaringan distribusi loop ini ada 2 macam yaitu :

- a. Bentuk open loop, bila dilengkapi dengan normally open switch yang terletak pada salah satu bagian gardu distribusi, dalam keadaan normal rangkaian selalu terbuka.
- b. Bentuk close loop, bila dilengkapi dengan normally close switch yang terletak pada salah satu bagian diantara gardu distribusi, dalam keadaan normal rangkaian selalu tertutup.

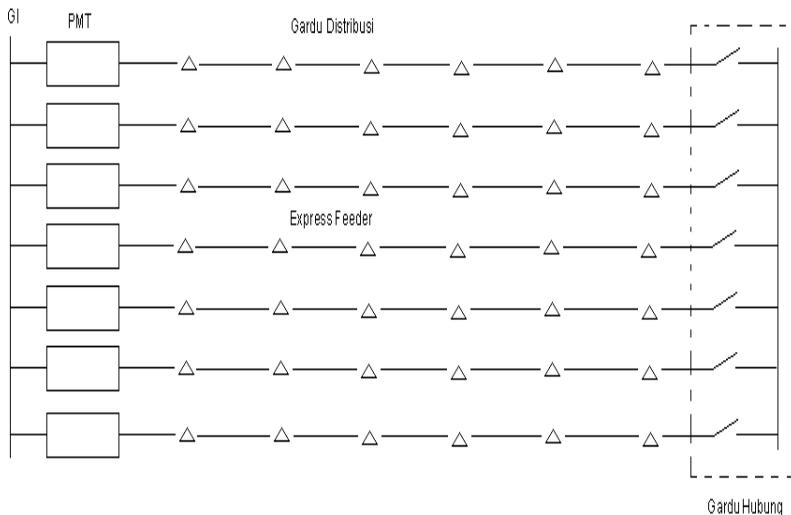
Struktur jaringan ini merupakan gabungan dari dua buah struktur jaringan radial, dimana pada ujung dari dua buah jaringan dipasang sebuah pemutus (PMT), pemisah (PMS). Pada saat terjadi gangguan, setelah gangguan dapat diisolir, maka pemutus atau pemisah ditutup sehingga aliran daya listrik ke bagian yang tidak terkena gangguan tidak terhenti. Pada umumnya penghantar dari struktur ini mempunyai struktur yang sama, ukuran konduktor tersebut

dipilih sehingga dapat menyalurkan seluruh daya listrik beban struktur loop, yang merupakan jumlah daya listrik beban dari kedua struktur radial.

Jaringan distribusi loop mempunyai kualitas dan kontinuitas pelayanan daya yang lebih baik, tetapi biaya investasi lebih mahal dan cocok digunakan pada daerah yang padat dan memerlukan keandalan tinggi.

### 10.3 Sistem Jaringan Distribusi Spindel

Jaringan distribusi spindel (seperti Gambar 10.3) merupakan saluran kabel tanah tegangan menengah (SKTM) yang penerapannya sangat cocok di kota – kota besar.



Gambar 10.3 Jaringan Distribusi Spindel

Adapun operasi sistem jaringan sebagai berikut :

- a. Dalam keadaan normal semua saluran digardu hubung (GH) terbuka sehingga semua SKTM beroperasi radial.
- b. Dalam keadaan normal saluran ekspres tidak dibebani dan dihubungkan dengan rel di gardu hubung dan digunakan sebagai pemasok cadangan dari gardu hubung.
- c. Bila salah satu seksi dari SKTM mengalami gangguan, maka saklar beban di kedua ujung seksi yang terganggu dibuka. Kemudian seksi – seksi sisi gardu induk (GI) mendapat suplai dari GI, dan seksi – seksi gardu hubung mendapat suplai dari gardu hubung melalui saluran ekspres.

Sistem jaringan distribusi spindel sangat cocok untuk memenuhi kebutuhan – kebutuhan antara lain :

- a. Peningkatan keandalan atau kontinuitas pelayanan sistem.
- b. Menurunkan atau menekan rugi – rugi akibat gangguan.
- c. Sangat baik untuk mensuplai daerah beban yang memiliki kerapatan beban yang cukup tinggi.
- d. Perluasan jaringan mudah dilakukan.

#### **10.4 Hubung Singkat**

Menurut VDE 0100 3 N g 3 hubung singkat didefinisikan sebagai berikut :

Hubung singkat ialah suatu hubungna yang terjadi karena adanya kesalahan – kesalahan antara bagian – bagian yang bertegangan kerja, sebagai akibat tidak adanya suatu hambatan guna pada lingkaran arus dimana kesalahan tersebut terjadi.

Untuk selanjutnya hubung singkat akan sering disingkat dengan huruf – huruf h.s.

Sebab – sebab hubung singkat.

- a) Disebabkan adanya isolasi yang tembus/rusak karena tidak tahan terhadap tegangan lebih, baik yang disebabkan oleh tegangan lebih dalam (akibat manipulasi/switching) atau tegangan lebih luar (akibat petir) maupun karena isolasi tersebut telah tua/usang.
- b) Adanya pengaruh – pengaruh mekanis yang menyebabkan antaran putus dan mengenai phase/ phase – phase lainnya seperti akibat angin, layang – layang maupun akibat galian – galian yang kurang hati – hati dan lain – lainnya.
- c) Disebabkan binatang seperti tikus, kalong, lowak, ular dan lain – lain.

Macam – macam jenis hubung singkat.

A. Menurut besarnya hambatan pada tempat hubung singkat, dibeda – bedakan :

1) Hubung singkat penuh

Disini h.s. tersebut bersifat metalik

2) Hubung singkat busur api.

Disini hambatan h. S. Dibatasi oleh besarnya busur api listrik yang besarnya dapat beberapa ratus Ohm.

B. Menurut jumlah phase yang terkena h.s dibeda – bedakan :

1) Hubung singkat 3 (tiga) phase

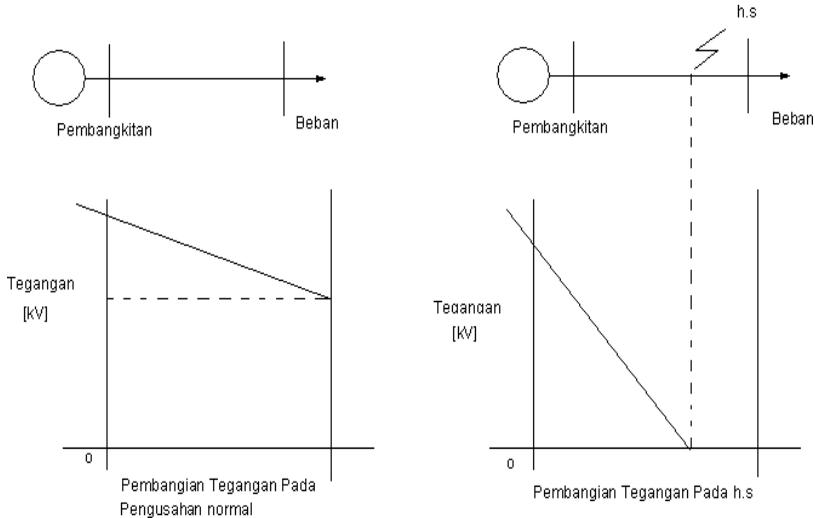
2) Hubung singkat 2 (dua) phase

- 3) a. Hubung singkat 1 (satu) phase, bila hubung dengan titik nol/netral bersifat kaku.
    - a. Hubung singkat melalui kumparan petersen dan ini tidak disebut h.s tetapi hubung tanah.
  - 4) Hubung tanah ganda (melalui kumparan petersen atau tidak) bersifat h.s 2 (dua) phase disertai hubung tanah.
- C. Menurut tempat terjadinya hubung singkat, dibeda – bedakan :
- 1) Hubung singkat yang terjadi pada sistem pembangkitan. Disini yang dimaksud adalah h.s yang terjadi pada jepitan – jepitan generator (dinamakan pula h.s jepitan ) dan umumnya sangat berbahaya.
  - 2) Hubung singkat yang terjadi cukup dekat dari sistem pembangkit. Yang dimaksud disini adalah h.s yang mungkin terjadi pada rel – rel dibelakang transformator.
  - 3) Hubung singkat yang terjadi jauh dari sistem pembangkit. Yang dimaksud disini adalah h.s yang mungkin terjadi pada jaringan listrik yang jauh dari sistem pembangkitan.

### **10.5 Dampak Gangguan Hubung Singkat pada Jaringan Distribusi**

Hubung singkat yang terjadi dapat mengakibatkan :

1. Turunnya tegangan pada sistem jaringan, atau malahan pada tempat – tempat tertentu tegangan tersebut hilang sama sekali. Lihat gambar 10.4.



Gambar 10.4 Profil tegangan pada pengusahaan normal dan h.s

Turunnya tegangan (biasanya disertai dengan kegoncangan tegangan) yang dapat mengganggu stabilitas jaringan.

2. Terjadinya hubung singkat dapat menyebabkan timbulnya pengaruh – pengaruh mekanis yang dinamis pada komponen – komponen instalasi listrik seperti pada rel –rel/isolator, bata – bata penutup kabel, kumparan – kumparan trafo dan lain – lainnya. Tersebut sebanding dengan kwardat arus lonjakan hubung singkat.
3. Mulai saat terjadinya hubung singkat dapat menimbulkan pengaruh – pengaruh thermis yang mungkin cukup tinggi untuk menaikkan suhu komponen –komponen instalasi listrik sampai pada panas – panas yang membahayakan seperti :  
Merusak bahan isolasi – isolasi antaran , melelehkan bahan –

bahan antaran, mendidih/menguapkan minyak – minyak trafo, pemutus tenaga dan sebagainya.

4. Dapat mengganggu kontinuitas jalannya perusahaan system jaringan, karena adanya pemutus tenaga yang terangsang serta bekerja mengeluarkan pemutus – pemutus tenaga dari suatu rangkaian arus tertentu sebagai akibat adanya h.s bekerjanya pemutus tenaga tersebut mungkin menyebabkan adanya pemadam.

Oleh karena itu perencanaan insatalasi listrik hendaknya dihitung dan disebabkan dengan kemungkinan akan adanya h.s dengan pengaruh serta akibat–akibat tersebut diatas. Pada permulaan perkembangan teknik arus kuat instalasi – instalasi listrik normal. Pengaruh hubung singkat belum belum disadari dengan bertambah besarnya system jaringan tersebut (tertentu dengan daya system pembangkitan yang lebih besar pula) pengaruh serta akibat–akibatnya tersebutnya hububng singkat terasa makin besar pula. Karena itu pengaruh–pengaruh hubung singkat harus dibatasi dengan jalan membatasi lama waktu terjadinya hubung singkat. Hal ini dilaksanakan misalnya dengan memasang teralis arus lebih dengan komponen waktunya pada pemutus – pemutus tenaga ataupun dengan menggunakan sekering – sekering yang dapat memetus hubung singkat tersebut dalam waktu yang relative singkat. Dengan pengaturan penyetelan komponen waktu realitas – realitas dapat diperoleh suatu pengaman yang selektif artinya pemutusan hanya akan terjadi pada bagian – bagian terganggu saja. Di samping itu

dikenal pula teknik pemutusan sementara hal ini didasarkan atas pengalaman bahwa tidak semua h.s tersebut bersifat tetap, tetapi justru banyak yang bersifat sementara (hubung tanah, busur listrik, burung kalong dan lain – lainnya).

**Latihan:**

1. Jelaskanlah jenis-jenis topologi jaringan distribusi.
2. Jelaskanlah keuntungan dari masing-masing jenis topologi jaringan distribusi.
3. Jelaskanlah dampak yang dapat terjadi dengan adanya hubung-singkat pada jaringan distribusi tenaga listrik.

## DAFTAR PUSTAKA

- [1] Anonim, “Statistik PLN 2013”, Sekretariat Perusahaan PT PLN (Persero). (2014)
- [2] D. Kusdiana, “Kondisi Riil Kebutuhan Energi di Indonesia dan Sumber-Sumber Energi Alternatif Terbarukan”, Presented at the Seminar of Renewable Energy, Direktorat Jenderal Listrik dan Pemanfaatan Energi Departemen ESDM, Bogor, 3 Dec. (2008).
- [3] J.J. Grainger dan W.D. Stevenson, 1994, “Power System Analysis”, *McGraw-Hill*, Singapore.
- [4] John Twidell and Tony Weir, 2006, “Renewable Energy Resources, Second Edition”, Taylor & Francis, New York.
- [5] S. Kim and E. Kim, “PSCAD/EMTDC-based modeling and analysis of a gearless variable speed wind turbine”, *IEEE Trans Energy Conversion*, Vol. 22, No. 2, pp. 421-430, 2007.
- [6] SS. Müller, M. Deicke, and R. W. De Doncker, “Doubly-fed induction generator system for wind turbines”, *IEEE Industry Applications Magazine*, May/June 2002.
- [7] R. Syahputra, Robandi, I., and Ashari, M., 2014, “Optimal Distribution Network Reconfiguration with Penetration of Distributed Energy Resources”, in *Proceeding of ICITACEE 2014*, Semarang, Indonesia.
- [8] R. Syahputra, “Fuzzy Multi-Objective Approach for the Improvement of Distribution Network Efficiency by Considering DG”, *IJCSIT*, Vol. 4, No. 2, pp. 57-68, 2012.
- [9] R. Syahputra, Robandi I, Ashari M. Distribution Network Efficiency Improvement Based on Fuzzy Multi-objective Method. *IPTEK Journal of Proceedings Series*. 2014; 1(1):224-9.
- [10] R. Syahputra, Robandi, I., and Ashari, M., “Optimization of Distribution Network Configuration with Integration of Distributed Energy Resources Using Extended Fuzzy Multi-objective Method”, *International Review of Electrical Engineering (IREE)*, vol.9, no.3, pp. 629-639, 2014.
- [11] R. Syahputra, Robandi I, Ashari M. Modeling and Simulation of Wind Energy Conversion System in Distributed Generation Units. *International Seminar on APTECS*. 2011; 290-6.

- [12] R. Syahputra, Robandi, I., and Ashari, M., “Performance Analysis of Wind Turbine as a Distributed Generation Unit in Distribution System”, *International Journal of IJCSIT*, Vol 6, No 3, pp. 39-56, 2014.
- [13] R. Syahputra, Robandi, I., and Ashari, M., 2015, “Performance Improvement of Radial Distribution Network with Distributed Generation Integration Using Extended Particle Swarm Optimization Algorithm”, *International Review of Electrical Engineering (IREE)*, vol.10, no.2, 2015. pp.293-304.
- [14] R. Syahputra, Robandi, I., and Ashari, M., 2015b, “Reconfiguration of Distribution Network with DER Integration Using PSO Algorithm”, *TELKOMNIKA*, vol.13, no.3, 2015. pp.759-766.
- [15] R. Syahputra, Robandi, I., and Ashari, M., 2015, “PSO Based Multi-objective Optimization for Reconfiguration of Radial Distribution Network”, *International Journal of Applied Engineering Research (IJAER)*, vol.10, no.6, 2015. pp. 14573-14586.
- [16] R. Syahputra, 2012, “Distributed Generation: State of the Arts dalam Penyediaan Energi Listrik”. LP3M UMY, Yogyakarta, 2012.
- [17] T.S. Hutauruk, 1996, “Transmisi Daya Listrik”, *Erlangga*, Jakarta.
- [18] T. Gonen, 1986, “Electric Power Distribution System Engineering”, *McGraw-Hill*, New York.
- [19] Y. Lei, A.Mullane, G.Lightbody, and R.Yacamini, “Modeling of the Wind Turbine With a Doubly Fed Induction Generator for Grid Integration Studies,” *IEEE Transactions on Energy Conversion*, Vol. 21(1), pp.257-264, 2006.
- [20] Zuhail, 1996, “Dasar Teknik Tenaga Listrik dan Elektronika Daya”, *Gramedia*, Jakarta.

## GLOSARIUM

- AAAC, *All Aluminium Alloy Conducor*, yaitu kawat penghantar yang seluruhnya terbuat dari campuran aluminium.
- AAC, *All Aluminium Conductor*, yaitu kawat penghantar yang seluruhnya terbuat dari aluminium.
- ACAR, *Aluminium Conductor Alloy Reinforced*, yaitu kawat penghantar aluminium yang diperkuat dengan campuran logam.
- ACSR, *Aluminium Conductor Steel Reinforced*, yaitu kawat penghantar aluminium berinti kawat baja.
- Bundled conductor*, konduktor berkas atau pilin yang digunakan sebagai penghantar yang umum dalam sistem transmisi daya listrik.
- DC, *alternating current*, arus bolak-balik.
- DC, *direct current*, arus searah.
- DG, *distributed generation*, istilah yang sangat populer guna menjelaskan tentang sumber-sumber energi terbarukan atau yang tidak terbarukan dengan kapasitas kecil hingga menengah yang diinjeksikan ke grid sistem tenaga listrik, dalam istilah Indonesianya disebut “pembangkitan tersebar”.
- EHV, *extra high voltage*, tegangan ekstra tinggi.
- ESDM, energi dan sumber daya mineral.
- Fuel cell*, sel bahan bakar, suatu piranti elektrik yang berguna membangkitkan energi listrik dengan bahan bakar hidrogen.
- Gardu Induk (GI)*, suatu stasiun pengumpul energi listrik dari sistem pembangkitan atau sistem transmisi yang terdiri dari alat-alat transformator daya, pemutus tenaga, saklar pemisah, bus station, reactor pembatas arus, transformator arus, transformator tegangan, kapasitor kopling, transformator tegangan kapasitor, lightning arrester, rele proteksi, baterai, dan alat pendukung lainnya.
- GMD, *Geometric Mean Distance*.
- GMR, *Geometric Mean Radius*, atau jejari rata-rata geometris dari suatu luas (area) adalah limit dari jarak rata-rata geometris (GMD) antara pasangan-pasangan elemen dalam luas itu sendiri jika jumlah elemen itu diperbesar sampai tak berhingga..

*Induktansi diri*, perbandingan antara jatuh tegangan yang ditimbulkan oleh perubahan arus terhadap perubahan arusnya sendiri.

*Inverter*, piranti elektrik yang berfungsi untuk mengubah tegangan arus searah (DC) menjadi tegangan arus bolak-balik (AC).

*Isolator*, piranti elektrik digunakan untuk mencegah hubung singkat antara kawat penghantar dengan menara.

*Kawat tanah, ground wires*, atau kawat pelindung (*shield wires*), berfungsi untuk melindungi kawat-kawat penghantar atau kawat fase terhadap sambaran petir

*Konverter*, piranti pengubah jenis tegangan listrik.

*Kompensasi saluran transmisi*, suatu upaya untuk meningkatkan unjukkerja sistem transmisi dengan cara memasang piranti elektrik di antaranya reaktor shunt, kapasitor seri atau kombinasi dari keduanya.

*Konverter daya*, piranti pengubah jenis tegangan listrik dengan kapasitas daya besar.

*Magnetic flux*, fluks magnetic, garis gaya magnetik pada suatu medan magnetik.

*Menara transmisi*, suatu bangunan penopang saluran transmisi yang dapat berupa menara baja, tiang baja, tiang beton bertulang, atau tiang kayu.

MKS, meter-kilogram-sekon, satuan dasar standar baku internasional dalam perhitungan-perhitungan fisika dan bidang-bidang terkait.

*overhead lines*, saluran transmisi atau distribusi udara.

PLTA, pembangkit listrik tenaga air.

PLTAngin, pembangkit listrik tenaga angin.

PLTG, pembangkit listrik tenaga gas.

PLTMH, pembangkit listrik tenaga mikrohidro.

PLTN, pembangkit listrik tenaga nuklir.

PLTS, pembangkit listrik tenaga surya.

PLTU, pembangkit listrik tenaga uap.

*proximity effect*, efek sekitar, pengaruh dari kawat lain yang berada di samping kawat yang ditinjau sehingga distribusi fluks tidak simetris lagi. Tetapi jika radius konduktor relatif kecil terhadap jarak antara kedua kawat maka efek sekitar ini sangat kecil dan dapat diabaikan

*renewable energy resources*, sumber-sumber energi terbarukan seperti angin, air, surya, dan lain-lain.

- Saluran transmisi menengah*, saluran transmisi jarak menengah pada suatu sistem tenaga listrik (80 s.d. 250 km).
- Saluran transmisi pendek*, saluran transmisi jarak pendek pada suatu sistem tenaga listrik (< 80 km).
- Saluran transmisi panjang*, saluran transmisi jarak panjang pada suatu sistem tenaga listrik (> 250 km).
- skin effect*, efek kulit, gejala pada arus bolak-balik bahwa kerapatan arus dalam penampang konduktor tersebut makin besar ke arah permukaan kawat. Tetapi jika kita hanya meninjau frekuensi kerja (50 Hz atau 60 Hz) maka pengaruh efek kulit itu sangat kecil dan dapat diabaikan.
- Sistem Tenaga Listrik*, suatu sistem yang terdiri dari komponen utamanya yaitu sistem pembangkitan, sistem transmisi, sistem distribusi, dan beban-beban listrik.
- Sistem Distribusi Tenaga Listrik*, suatu sistem yang berfungsi untuk menerima daya listrik dari sistem transmisi dan menyalurkannya ke pusat-pusat beban dalam sistem tenaga listrik, dengan tingkat tegangan menengah menurut standar yang berlaku di suatu negara.
- Sistem Pembangkitan Tenaga Listrik*, suatu sistem yang berfungsi untuk membangkitkan daya listrik yang umumnya terdiri dari turbin dan generator, untuk selanjutnya mencatu sistem transmisi daya listrik untuk dikirimkan ke sistem distribusi.
- Sistem subtransmisi*, bagian dari sistem perlengkapan elektrik yang mengirimkan daya dari bulk power sources (BPS), sebagaimana halnya gardu induk transmisi yang besar.
- Sistem Transmisi Tenaga Listrik*, suatu sistem yang berfungsi untuk menghubungkan sistem pembangkitan ke sistem distribusi dalam sistem tenaga listrik, dengan tingkat tegangan tinggi, tegangan ekstra tinggi, dan atau tegangan ultra tinggi menurut standar yang berlaku di suatu negara. Standar tegangan transmisi di Indonesia adalah 66 kV, 150 kV, 380 kV, dan 500 kV.
- solar cell*, sel surya, piranti elektrik untuk membangkitkan energi listrik dengan sumber energi matahari (surya).
- solid wire*, konduktor padat atau pejal yang digunakan sebagai penghantar yang umum dalam sistem tenaga listrik.
- Transformer*, piranti elektrik yang berfungsi untuk menaikkan atau menurunkan tegangan listrik.

*Transformator arus*, piranti elektrik yang berfungsi untuk menaikkan atau menurunkan arus listrik (umumnya penurun arus) yang digunakan pada sistem proteksi dan pengukuran.

*Transformator daya*, piranti elektrik yang berfungsi untuk menaikkan atau menurunkan tegangan listrik pada pembangkit listrik dan sistem transmisi daya listrik.

*Transformator distribusi*, piranti elektrik yang berfungsi untuk menaikkan atau menurunkan tegangan listrik pada pembangkit listrik dan sistem distribusi daya listrik.

UHV, *ultra high voltage*, tegangan ultra tinggi.

*underground cable*, saluran transmisi atau distribusi bawah tanah menggunakan kabel daya bawah tanah.

## BIODATA PENULIS



### A. Identitas Diri

Nama Lengkap	Dr. Ramadoni Syahputra, S.T., M.T.
Jabatan Fungsional	Lektor Kepala
Tempat dan Tanggal Lahir	Galang, Deli Serdang, Sumatera Utara, 10 Oktober 1974
Agama	Islam
Pekerjaan	Staf Pengajar di Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Muhammadiyah Yogyakarta
Pendidikan	S1: Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknologi Industri Institut Teknologi Medan, Medan, 1993-1998 S2: Program Studi Ilmu Teknik Elektro Program Pascasarjana Universitas Gadjah Mada Yogyakarta, 1999-2002 S3: Program Studi Ilmu Teknik Elektro Program Pascasarjana Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya, 2011-2015
Alamat Rumah	Perum Popongan No. AA1, Jl. Magelang Km 5 Sinduadi, Mlati, Sleman, DI Yogyakarta 55284
Nomor HP	081215526565
Alamat Kantor	Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik UMY Jl. Lingkar Barat, Tamantirto, Kasihan, Bantul, Yogyakarta 55183
Nomor Telepon/Faks	0274-387656/ 0274-387646
Alamat e-mail	<a href="mailto:ramadoni@umy.ac.id">ramadoni@umy.ac.id</a>