

SKRIPSI

**IDENTIFIKASI LETAK HUBUNG SINGKAT
PADA JARINGAN TRANSMISI TEGANGAN TINGGI**



OLEH

MUH. YASIM AKBAR

105 82 1169 13

MURSALIM

105 82 1299 13

**PROGRAM STUDI TEKNIK LISTRIK
JURUSAN ELEKTRO FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS MUHAMMADIYAH MAKASSAR**

2017



FAKULTAS TEKNIK

GEDUNG MENARA IQRA LT. 3

Jl. Sultan Alauddin No. 259 Telp. (0411) 866 972 Fax (0411) 865 588 Makassar 90221

Website: www.unismuh.ac.id, e_mail: unismuh@gmail.com

Website: <http://teknik.unismuh.makassar.ac.id>

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

HALAMAN PENGESAHAN

Tugas Akhir ini diajukan untuk memenuhi syarat ujian guna memperoleh gelar Sarjana Teknik (ST) Program Studi Teknik Elektro Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Muhammadiyah Makassar.

Judul Skripsi : **IDENTIFIKASI LETAK HUBUNG SINGKAT PADA JARINGAN TEGANGAN TINGGI**

Nama : 1. Muh. Yasim Akbar
2. Mursalim

Stambuk : 1. 10582 1169 13
2. 10582 1299 13

Makassar, 16 Desember 2017

Telah Diperiksa dan Disetujui
Oleh Dosen Pembimbing;

Pembimbing I

Pembimbing II

Dr. Eng. Ir. H. Zulfajri Basri Hasanuddin, M.Eng

Rizal Ahdiyati Duyo, S.T., M.T

Mengetahui,

Ketua Jurusan Elektro



Dr. Umar Katu, S.T., M.T.

NBM : 990 410



بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

PENGESAHAN

Skripsi atas nama Muh. Yasim Akbar dengan nomor induk Mahasiswa 10582 1169 13 dan Mursalim dengan nomor induk Mahasiswa 10582 1299 13, dinyatakan diterima dan disahkan oleh Panitia Ujian Tugas Akhir/Skripsi sesuai dengan Surat Keputusan Dekan Fakultas Teknik Universitas Muhammadiyah Makassar Nomor : 006/SK-Y/20201/091004/2017, sebagai salah satu syarat guna memperoleh gelar Sarjana Teknik pada Program Studi Teknik Elektro Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Muhammadiyah Makassar pada hari Rabu tanggal 20 Desember 2017

Panitia Ujian :

Makassar, 27 Rabi'ul Awal 1439 H
16 Desember 2017 M

1. Pengawas Umum

a. Rektor Universitas Muhammadiyah Makassar

Dr. H. Abdul Rahman Rahim, SE., MM.

b. Dekan Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin

Dr. -Ing. Ir. Wahyu H. Piarah, MSME.

2. Penguji

a. Ketua : Dr. Ir. Zahir Zainuddin, M.Sc

b. Sekretaris : Anugrah, S.T., M.M

3. Anggota : 1. Dr. Umar Katu, S.T., M.T

2. Andi Abd Halik Lateko Tj, S.T., M.T

3. Adriani, S.T., M.T

Mengetahui :

Pembimbing I

Dr. Eng. Ir. H. Zulfajri Basri Hasanuddin, M.Eng

Pembimbing II

Rizal Ahdiyut Duyo, S.T., M.T

Dekan



Ir. Hamzah Al Imran, S.T., M.T.

NBM : 855 500

Muh. Yasim Akbar¹, Mursalim²

¹Program Studi Teknik Elektro Fakultas Teknik Unismuh Makassar

Email : arga1391@gmail.com

²Program Studi Teknik Elektro Fakultas Teknik Unismuh Makassar

Email : mur.salim6@gmail.com

ABSTRAK

Tugas akhir ini membahas tentang penggunaan transformasi wavelet untuk menentukan jenis dan letak gangguan hubung singkat yang terjadi pada jaringan transmisi tegangan tinggi. Metode ini menerapkan teori gelombang berjalan untuk menentukan waktu tempuh gelombang transien di sepanjang saluran transmisi antara titik gangguan dan sisi pengiriman (sending end). Pengukuran gelombang dilakukan di satu titik yaitu di sisi pengiriman (sending end). Sinyal gangguan yang berupa tegangan dikonversikan menjadi dua mode, yaitu mode ground dan mode aerial, dengan menggunakan transformasi Clarke, Mode ground digunakan untuk mengidentifikasi jenis gangguan hubung singkat yang terjadi (ungrounded/symmetrical fault atau grounded fault), sedangkan mode aerial digunakan untuk menentukan lokasi gangguan. Transformasi wavelet digunakan untuk menentukan perbedaan waktu (time differential) antara waktu datangnya puncak gelombang pertama dan puncak gelombang kedua akibat refleksi pada mode aerial, Sedangkan pada mode ground, transformasi wavelet digunakan untuk mendapatkan koefisien transformasi wavelet (WTC) yang nantinya dipakai untuk mengidentifikasi jenis gangguan. Simulasi gangguan dilakukan dengan menggunakan software ATP, sedangkan pemrosesan sinyal dilakukan dengan menggunakan software MATLAB versi 7,3. Simulasi dilakukan untuk berbagai frekuensi sampling, jenis gangguan, sudut fasa tegangan, dan lokasi gangguan. Hasil simulasi menunjukkan bahwa metode ini mampu menentukan jenis dan lokasi gangguan dengan tingkat keakurasian yang cukup tinggi.

Kata kunci : frekuensi, transformasi wevelet, jenis gangguan

Muh. Yasim Akbar¹, Mursalim²

¹Program Studi Teknik Elektro Fakultas Teknik Unismuh Makassar

Email : arga1391@gmail.com

²Program Studi Teknik Elektro Fakultas Teknik Unismuh Makassar

Email : mur.salim6@gmail.com

ABSTRACT

This final project discusses the use of wavelet transforms to determine the type and location of short circuit faults that occur on the network. Delivery method for delivery of transient wave travel time along the transmission line between disruption side and delivery side (final delivery). Wave measurements made at one point are on the delivery side (final delivery). The disturbance signal being converted into two modes, namely the ground mode and aerial mode, using the Clarke transform, the ground mode used to anticipate the ungrounded / symmetrical fault or grounded fault, while the aerial mode is used to determine the location of the interference . The wavelet transform is used to determine the time difference between the arrival time of the first wave peak and the second wave peak due to reflection in aerial mode, whereas in ground mode, the wavelet transformation used to obtain wavelet transformation information (WTC) is immediately used for this type of interference. Simulation of disturbance by using ATP software, while pemoresan signal using MATLAB software version 7.3. Simulations are performed for various sampling frequencies, interference types, phase angles. The simulation results show this method with a high degree of accuracy.

Keywords : frequency, wavelet transformation, type of interference

KATA PENGANTAR

Syukur Alhamdulillah penulis panjatkan ke hadirat Allah SWT, karena Rahmat dan HidayahNya sehingga penulis dapat menyusun skripsi ini, dan dapat kami selesaikan dengan baik.

Tugas akhir ini disusun sebagai salah persyaratan akademik yang harus ditempuhdalam rangka penyelesaian program studi pada Jurusan Elektro Fakultas Teknik Universitas Muhammadiyah Makassar. Adapun judul tugas akhir adalah : **“Identifikasi Letak Hubung Singkat Pada Jaringan Tegangan Tinggi”**

Penulis menyadari sepenuhnya bahwa dalam penulisan skripsi ini masih terdapat kekurangan-kekurangan, hal ini disebabkan penulis sebagai manusia biasa tidak lepas dari kesalahan dan kekurangan baik itu ditinjau dari segi teknis penulis maupun dari perhitungan-perhitungan. Oleh karena itu penulis menerima dengan ikhlas dan senang hati segala koreksi serta perbaikan guna penyempurnaan tulisan ini agar kelak dapat bermanfaat.

Skripsi ini dapat terwujud berkat adanya bantuan, arahan, dan bimbingan dari berbagai pihak. Oleh karena itu dengan segalan ketulusan dan kerendahan hati, kami mengucapkan terima kasih dan penghargaan yang setinggi-tingginya kepada :

1. Bapak Hamzah Al Imran, ST, MT. sebagai Dekan Fakultas Teknik Universitas Muhammadiyah Makassar.
2. Bapak Umar Katu, ST, MT. sebagai Ketua Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Muhammadiyah Makassar.
3. Bapak. DR. Ir. H. Zulfajri Basri Hasanuddin, M.Eng, selaku Pembimbing I dan Bapak Rizal ADuyo, ST, MT, selaku Pembimbing II, yang telah banyak meluangkan waktunya dalam membimbing kami.
4. Bapak dan ibu dosen serta staf pegawai pada fakultas teknik atas segala waktunya telah mendidik dan melayani penulis selama mengikuti proses belajarmengajar di Universitas Muhammadiyah Makassar.
5. Ayahanda dan Ibunda yang tercinta, penulis mengucapkan terimakasih yang sebesar-besarnya atas segala limpahan kasih sayang, doa dan pengorbanan terutama dalam bentuk materi dalam menyelesaikan kuliah.
6. Saudara-saudaraku sertarekan-rekan mahasiswa fakultas teknik terkhusus angkatan 2013 yang dengan keakraban dan

persaudaraan banyak membantu dalam menyelesaikan tugas akhir ini.

Semoga semua pihak tersebut di atas mendapat pahala yang berlipat ganda di sisi Allah SWT dan skripsi yang sederhana ini dapat bermanfaat bagi penulis, rekan-rekan, masyarakat serta bangsa dan Negara. Amin.

Makassar, November 2017

Penulis

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
ABSTRAK	ii
KATA PENGANTAR	iv
DAFTAR ISI	vii
DAFTAR GAMBAR	x
DAFTAR TABEL	xiii
BAB I PENDAHULUAN	1
A. Latar Belakang	1
B. Rumusan Masalah	4
C. Tujuan Penulisan	4
D. Batasan Masalah	4
E. Manfaat Penelitian	5
F. Sistematika Penulisan	6
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	7
A. Transmisi Tenaga Listrik	7
B. Karakteristik Saluran Transmisi	7
1. Tahanan (R).....	8
2. Induktansi (L).....	9
a. Induktansi Saluran Tiga Fasa Dengan Jarak Pemisah yang sama	10
b. Induktansi Saluran Tiga Fasa Dengan Jarak Pemisah yang Simetris.....	10
c. Penghantar Berkas.....	11
3. Kapasitansi (C)	12
a. Kapasitansi Saluran Tiga Fasa Dengan Jarak Pemisah yang Sama	13
b. Kapasitansi Saluran Tiga Fasa Dengan Jarak Pemisah Yang Tidak Simetris	14
c. Penghantar Berkas.....	15

4. Jenis-Jenis Penghantar Pada Saluran.....	16
5. Komponen-Komponen Utama Saluran Udara	17
1. Menara transmisi atau tiang transmisi beserta Pondasinya.....	17
2. Isolator-isolator.....	18
3. Kawat penghantar	19
4. Kawat tanah (<i>grounchvire</i>)	19
C. Analisis Transien Pada Saluran Transmisi	20
1. Impedansi Sun'a Dan Kecepatan Rambat.....	24
2. Pemantulan Gelombang Berjalan Pada Sebuah Simpangan (<i>Jucntion</i>).....	26
D. Diagram <i>Lattice Bewley</i>	29
E. Gangguan Pada Saluran Transmisi	32
1. Jenis Gangguan	32
2. Akibat Gangguan.....	33
3. Faktor-Faktor Penyebab Terjadi Gangguan.....	34
4. Klasifikasi Gangguan	34
F. Metode-Metode Penentuan Lokasi Gangguan.....	35
1. Time Domain Reflectometers	35
2. Impedance-Based Fault Location methods.....	37
3. Travelling Wave Fault Location	39
G. Transformasi Wavelet	40
H. Transformasi Clarke	46
I. Prosedur Penentuan Lokasi Gangguan Dengan Trasformasi Wavelet	46
J. Penentuan Lokasi Gangguan Untuk Ke Tanah (Grounded Fault)	48
K. Penentuan Lokasi Gangguan Untuk Tidak Ke Tanah Atau Gangguan Simetrik (Ungrounded Symmetrical Fault).....	50
BAB III METODOLIGI PENELITIAN	51
A. Waktu Dan Tempat	51

1. Waktu	51
2. Tempat	51
B. Metode Penelitian	51
C. Flowchart Algoritma	53
D. Algoritma Penentuan Lokasi Gangguan Dengan Menggunakan Transformasi Wavelet	54
BAB IV HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN	56
A. Pemodelan Rangkaian Dengan ATP dan MATLAB/Simulink	56
B. Simulasi Dengan Frekuensi Sampling 50 MHz. Bahan Penghantar X: Dan Sudut Fasa Gangguan 0	61
1. Gangguan A-G (satu fasa ke ground) sejauh 1 km dari sending end	64
2. Gangguan A-G (satu fasa ke Ground) sejauh 3 km dari sending end	67
3. Gangguan A-G (satu fasa ke ground) sejauh 5 km dari sending end	70
4. Gangguan A-G (satu fasa ke Ground) sejauh 7 km Dari sending end	71
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN	76
A. Kesimpulan	76
B. Saran	76
DAFTAR PUSTAKA	77
LAMPIRAN	

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Penghantar dengan Jarak Simetris	10
Gambar 2.2	Penghantar dengan Jarak Tak Simetris	10
Gambar 2.3	Penghantar Berkas	11
Gambar 2.4	Penghantar dengan Jarak Simetris	13
Gambar 2,5	Penghantar dengan Jarak Tak Simetris	14
Gambar 2.6	Penghantar Berkas	15
Gambar 2.7	MenaraSaluranTransmisi	18
Gambar 2.8	Saluran Transmisi	20
Gambar 2.9	Saluran Transmisi dengan Sebuah Titik x_1	23
Gambar 2.10	Gambar Hubungan Antara Gelombang Keluaran, Gelombang Pantul dan Gelombang Terusan.....	27
Gambar 2.11	Diagram Lattice Bewley	31
Gambar 2.12	Diagram Dekomposisi Wavelet	44
Gambar 2.13	Fungsi Komponen Tiga fasa	46
Gambar 3.1	Flowchart Algoritma Metode Penentuan Lokasi Gangguan Hubung Singkat.....	53
Gambar 4.1	Model Sistem yang Digunakan Pada Simulasi.....	56
Gambar 4.2	Implementasi ATP Untuk Simulasi Gangguan Hubung Singkatke Tanah	57
Gambar 4.3	Implementasi ATP Untuk Simulasi Gangguan Hubung Singkat Tidakke Tanah	57
Gambar 4.4	Konfigurasi Menara Transmisi.....	58
Gambar 4.5	Implementasi MATLAB untuk Transformasi Clarke.....	61
Gambar 4.6	Karakteristik Saluran dengan Bahan Penghantar X.....	64
Gambar 4.7	Grafik WTC2 pada Mode Ground saat kondisi tanpa gagngguan	64
Gambar 4.8	Grafik WTC2 pada Mode Aerial Saat Kondisi Tanpa Gangguan	65

Gambar 4.9	Grafik Sinyal-Sinyal Fasa-Tanah Untuk Gangguan A-G Sejauh 1 km Dari Sending End	65
Gambar 4.10	Grafik Sinyal-Sinyal Modal Untuk Gangguan A-G Sejauh 1 km Dari Sending End	66
Gambar 4.11	Grafik WTC: pada Mode ground Untuk Gangguan A-G Sejauh 1 km Dari Sending End	67
Gambar 4.12	Grafik WTC: pada Mode Aerial Untuk Gangguan A-G Sejauh 1 km Dari Sending End	68
Gambar 4.13	Grafik Sinyal-Sinyal Fasa-Tanah Untuk Gangguan A-G Sejauh 3 km Dari Sending End	68
Gambar 4.14	Grafik Sinyal-Sinyal modal Untuk Gangguan A-G Sejauh 3 km Dari sending end	69
Gambar 4.15	Grafik WTC ² pada model aerial Untuk Gangguan A-G Sejauh 3 km Dari Sending End	70
Gambar 4.16	Grafik WTC pate Mode Aerial Untuk Gangguan A-G Sejauh 3 km Dan Sending End	71
Gambar 4.17	Grafik Sinyal-Sinyal Fasa-Tanah Untuk Gangguan A-G Sejauh 5 km Dari Sending End	71
Gambar 4.18	Grafik Sinyal-Sinyal Modal Untuk Gangguan A-G Sejauh 5 km Dari Sending End	72
Gambar 4.19	Grafik WTC: pada Mode Ground untuk Gangguan A-G Sejauh 5 km Dan Sending End	72
Gambar 4.20	Grafik WTC ² pada Mode Aerial Untuk Gangguan A-G Sejauh 5 km Dari Sending End	72
Gambar 4.21	Grafik Sinyal-Sinyal Fasa-Tanah Untuk Gangguan A-G Sejauh 7 km Dan Sending End	73
Gambar 4.22	Grafik Sinyal-Sinyal Modal Untuk Gangguan A-G Sejauh 7 km Dan Sending End	73
Gambar 4.23	Grafik WTC: pada model Ground Untuk Gangguan A-G Sejauh 7 km Dari Sending End	74

Gambar 4.24 Grafik ViTC2 pada Mode Aerial Untuk Gangguan A-G Sejauh 7 km Dari Sending End	74
--	----

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Jenis-Jenis Induk Wavelet	12
Tabel 4.1 No Tower Transmisi sungguminasa - Tello	58
Tabel 4.2 Tabel Perhitungan	63

BAB I

PENDAHULUAN

A. Latar Belakang

Penentuan lokasi gangguan hubung singkat pada saluran transmisi sudah lama menjadi salah satu perhatian utama dari industri tenaga listrik. Metode penentuan lokasi gangguan hubung singkat pada sistem tenaga yang diperkenalkan sejauh ini, dapat dikelompokkan secara luas ke dalam dua kategori. Pertama, metode berdasarkan pada komponen-komponen frekuensi daya, dan metode yang kedua berdasarkan atas sinyal-sinyal gangguan transien pada frekuensi yang lebih tinggi. Kedua, berkenaan dengan gelombang berjalan atau metode penentuan lokasi gangguan dengan sinyal berkecepatan sangat tinggi (*ultra high speed fault location*), dan penggunaannya mengacu pada teori gelombang berjalan serta memakai *windows* sampling yang lebih pendek.

Penggunaan teori gelombang berjalan untuk deteksi gangguan pertamakali diterapkan oleh Dommel dan Michels, dimana sebuah diskriminan (*polagratis*) yang digambarkan berdasarkan pada gelombang tegangan dan arus transien digunakan untuk menentukan gangguan pada saluran transmisi. McLaren kemudian telah mengembangkan suatu hubungan teknis dimana hubungan silang antara nilai-nilai puncak kedatangan di titik pengukuran dari gelombang berjalan maju dan mundur digunakan untuk memperkirakan waktu tempuh sinyal-sinyal transien dari pemancar (sumber sinyal) ke titik gangguan.

Salah satu keterbatasan metode gelombang berjalan adalah penggunaan nilai sampling yang tinggi. Masalah lain adalah ketidakpastian dalam pemilihan *sampling window* dan masalah perbedaan antara gelombang berjalan yang direfleksikan dari titik gangguan dan dari ujung saluran transmisi dekat sisi penerima (*receiving end*). Pengembangan terbaru dalam teknologi optik arus transducer memudahkan pencatatan angka sampling yang tinggi dari sinyal-sinyal transien selama gangguan. Kemampuan dalam pemilihan sampling yang tepat dapat memudahkan penggunaan gelombang berjalan yang lebih baik dan lebih efisien berdasarkan metode-metode untuk analisa gangguan.

Hubungan berdasarkan metode penentuan lokasi gangguan yang diperkenalkan dalam Tugas Akhir ini, sangat efektif selama interval dari *time window* untuk menyimpan gelombang yang bergerak maju dipilih dengan benar. Pemilihan ini bergantung pada lokasi gangguan yang tidak diketahui, pemilihan lebar *window* ini menyisakan suatu masalah yang tidak terpecahkan untuk penerapan praktis dari metode ini. Penggunaan dari *window* panjang dan pendek yang dikombinasikan telah diterapkan sebagai sebuah solusi untuk masalah ini.

Dalam Tugas Akhir ini, disajikan suatu metode pendekatan yang berbeda, berdasarkan pada transformasi *wavelet* dari sinyal gangguan transien. Transformasi *wavelet* memiliki beberapa keistimewaan unik yang membuatnya sangat cocok untuk aplikasi khusus ini, salah satunya adalah pemetaan fungsi yang ditetapkan dari daerah waktu menjadi daerah

time-scaling. Fungsi dasar yang digunakan dalam transformasi *wavelet*, memiliki karakteristik bandpass yang membuat pemetaan ini serupa dengan pemetaan dalam bentuk frekuensi-waktu (*time-frequency*).

Berbeda dengan fungsi dasar dalam analisa *Fourier*, *wavelet* tidak hanya dibatasi pada frekuensi, tapi juga pada waktu. Pembatasan atau penempatan ini memperhitungkan deteksi waktu dari kejadian gangguan yang terjadi secara tiba-tiba, seperti gangguan transien. Gangguan yang dihasilkan gelombang berjalan tampak seperti gangguan yang terjadi pada sinyal frekuensi daya yang dicatat pemancar sinyal. Pengolahan sinyal melalui transformasi *wavelet*, menyatakan waktu tempuh sinyal-sinyal diantara lokasi gangguan dan lokasi pemancar.

Manfaat potensial dalam penerapan transformasi *wavelet* untuk menganalisa sinyal-sinyal transien pada sistem tenaga telah diketahui dalam beberapa tahun terakhir. Robertson menyajikan suatu tinjauan komparatif dari *Fourier*, *Fourier* waktu pendek (*short time Fourier*) dan transformasi-transformasi *wavelet*, yang memberikan beberapa contoh dalam menerapkan transformasi *wavelet* untuk menganalisis transien sistem tenaga. Manfaat dari penggunaan transformasi *wavelet* untuk menganalisa keadaan transien dan solusi dari persamaan diferensial linear *time-invariant* dengan menggunakan transformasi *wavelet* ditunjukkan pada Tugas Akhir ini. Aplikasi lain dari transformasi *wavelet* adalah memecahkan masalah pengidentifikasian jenis gangguan yang terjadi.

B. Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang di atas, maka rumusan masalah pada tugas akhir ini adalah :

1. Bagaimana menentukan jenis gangguan hubung singkat (*unGrounded /symmetrical fault atau Grounded fault*)?
2. Bagaimana menentukan lokasi gangguan hubung singkat pada suatu saluran transmisi?
3. Bagaimana menentukan lokasi gangguan menggunakan transformasi *wavelet*?

C. Tujuan Penulisan

Tujuan dari penulisan tugas akhir ini adalah :

1. Untuk menentukan jenis gangguan hubung singkat (*unGrounded / symmetrical fault atau Grounded fault*)
2. Untuk menentukan lokasi gangguan hubung singkat yang terjadi pada suatu saluran transmisi
3. Untuk menentukan lokasi gangguan menggunakan transformasi *wavelet*

D. Batasan Masalah

Batasan masalah yang digunakan dalam tugas akhir ini adalah:

1. Sistem tiga fasa diasumsikan seimbang.

2. Frekuensi sampling yang digunakan adalah 1 MHz, 5 MHz, dan 50 MHz.
3. Jarak lokasi gangguan yang diukur dari *sending end* adalah 1 km, 3 km, 5 km, 7 km, dan 10 km.
4. Bahan konduktor yang digunakan pada saluran udara adalah bahan X, bahan ACSR Rook, dan bahan ACSR Partridge.
5. Sudut fasa gangguan : 0° , 45° , dan 90° .
6. Transformasi *wavelet* yang digunakan adalah transformasi *wavelet* dengan induk *wavelet Daubechies-4*.
7. Resistansi bumi (tanah) sebesar 1000 ohm meter dan resistansi gangguan sebesar 2 ohm.
8. *Software* yang digunakan adalah ATP dan MATLAB/Simulink versi 7.3.

E. Manfaat Penelitian

Hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan beberapa manfaat sebagai berikut:

1. Untuk mempermudah menentukan lokasi gangguan pada saluran transmisi ketika suatu hari nanti bisa diterapkan diperusahaan listrik negara (PLN).
2. Untuk menghasilkan metode penentuan jenis dan lokasi gangguan pada saluran transmisi dengan memanfaatkan gejala transien gelombang tegangan saat terjadi gangguan.

F. Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan yang digunakan dalam tugas akhir ini sebagai berikut:

Bab I Pendahuluan, merupakan pendahuluan yang berisi penjelasan mengenai latar belakang masalah, tujuan penulisan, batasan masalah, metode pembahasan serta Sistematika pembahasan yang digunakan.

Bab II Tinjauan Pustaka, merupakan penjelasan tentang teori transformasi *wavelet*, teori karakteristik saluran transmisi, teori analisis transien pada saluran transmisi, teori jenis gangguan pada saluran transmisi, dan metode-metode penentuan lokasi gangguan.

Bab III Metode Penelitian, merupakan penjelasan prosedur dan algoritma penentuan lokasi gangguan pada saluran transmisi dengan menggunakan transformasi *wavelet*.

Bab IV Hasil dan Pembahasan, merupakan penjelasan mengenai Hasil, dan Analisis Simulasi Penentuan Lokasi Gangguan, merupakan penjelasan mengenai hasil studi penentuan jenis dan lokasi gangguan pada saluran transmisi yang dilakukan dengan menggunakan simulasi ATP dan MATLAB/Simulink.

Bab V Penutup, merupakan kesimpulan dan saran yang didapatkan dari hasil analisis.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

A. Transmisi Tenaga Listrik

Transmisi tenaga listrik merupakan proses penyaluran tenaga listrik dari tempat pembangkit tenaga listrik (*power plant*) hingga saluran distribusi listrik (*substation distribution*) sehingga dapat disalurkan sampai pada konsumen pengguna listrik. Tegangan listrik pada jaringan transmisi dan distribusi listrik menggunakan tegangan yang sangat besar, bahkan pada jaringan transmisi tegangan listriknya mencapai ratusan ribu *Volt*. Pada umumnya lokasi sumber pembangkit listrik yang digunakan memiliki jarak yang sangat jauh sebelum sampai pada konsumen atau ke rumah-rumah.

Dalam upaya mencegah kerugian daya dan tegangan yang diakibatkan lokasi jaringan transmisi dan jaringan distribusi listrik yang sangat jauh, maka dibutuhkan tegangan dari pembangkit listrik yang besar agar kerugian tegangan tersebut dapat diatasi. Disamping itu, agar ukuran diameter penampang kawat atau kabel penghantar yang digunakan tidak terlalu besar, maka tegangan listrik dari sumber pembangkit menggunakan tegangan yang besar.

B. Karakteristik Saluran Transmisi

Karakteristik listrik dari saluran transmisi ialah konstanta-konstanta saluran, yaitu; tahanan (R), induktansi (L), konduktansi (G), dan kapasitansi (C). Pada saluran udara konduktansi sangat kecil sehingga dengan

mengabaikan konduktansi itu, perhitungannya jauh lebih mudah dan pengaruhnya pun masih dalam batas-batas yang dapat diabaikan. Selain itu, akan dipaparkan pula jenis-jenis penghantar pada saluran dan komponen-komponen utama saluran udara.

1. Tahanan (R)

Tahanan dari suatu konduktor (kawat penghantar) diberikan oleh;

$$R = \rho \frac{l}{A} \dots \dots \dots (1)$$

dimana:

ρ = resistivitas

l = panjang kawat

A = luas penampang kawat

Dalam tabel-tabel yang tersedia sering kita jumpai penampang kawat diberikan dalam satuan "*Circular Mil*" disingkat CM. Definisi CM ialah penampang kawat yang mempunyai diameter 1 mil (=1/1000 inch). Bila penampang kawat diberikan dalam mm², maka penampang kawat dalam CM adalah:

$$CM = 1973 \times (\text{Penampang dalam mm}^2), \text{ atau}$$

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

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

Tahanan kawat berubah oleh temperatur, dalam batas temperatur 10 °C sampai 100 °C, maka untuk kawat tembaga dan aluminium berlaku rumus:

$$R_{t2} = R_{t1} [1 + \alpha_{t1}(t_2 - t_1)] \dots\dots\dots (2)$$

dimana:

R_{t2} = tahanan pada temperatur t_2

R_{t1} = tahanan pada temperatur t_1

α_{t1} = koefisien temperatur dari tahanan pada temperatur Jadi,

$$\frac{R_{t2}}{R_{t1}} = 1 + \alpha_{t1} (t_2 - t_1) \dots\dots\dots (3)$$

$$\frac{R_{t2}}{R_{t1}} = \frac{T_0 + T_1}{T_0 + T_1} \dots\dots\dots (4)$$

dimana:

$$\alpha_{t1} = \frac{1}{T_0 + T_1} \dots\dots\dots (5)$$

atau

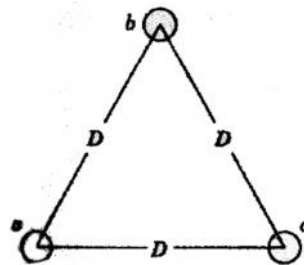
$$T_0 = \frac{1}{\alpha_{t1}} - t \dots\dots\dots (6)$$

2. Induktansi (L)

Dalam penurunan rumus-rumus untuk induktansi dari sesuatu konduktor biasanya diabaikan dua faktor, yaitu; a) Efek kulit (*skin effect*); b) Efek sekitar (*proximity effect*). Efek kulit adalah gejala pada arus bolak-balik, bahwa kerapatan arus dalam penampang konduktor tersebut makin besar kearah permukaan kawat. Tetapi bila kita hanya meninjau frekuensi kerja (50 Hz atau 60 Hz) maka pengaruh efek kulit itu sangat kecil dan dapat diabaikan.

Efek sekitar ialah pengaruh dari kawat lain yang berada disamping kawat yang pertama (yang ditinjau) sehingga distribusi fluks tidak simetris lagi. Tetapi bila radius konduktor kecil terhadap jarak antara kedua kawat maka efek sekitar ini sangat kecil dan dapat diabaikan.

a. Induktansi Saluran Tiga Fasa Dengan Jarak Pemisah Yang Sama



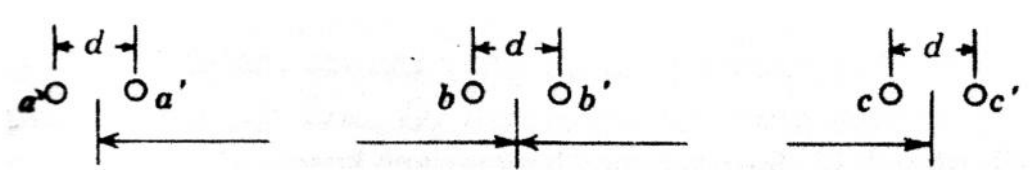
Gambar 2.1 Penghantar dengan Jarak Simetris

Penghantar-penghantar saluran tiga fasa membentuk ujung suatu segitiga sama sisi.

$$L_a = 2 \times 10^{-7} \ln \frac{D}{r} \text{ H/m} \dots \dots \dots (7)$$

Untuk penghantar lilit $r = r \cdot e^{-1/4}$ menggantikan $D_s \cdot r$ adalah jari-jariluar penghantar.

b. Induktansi Saluran Tiga Fasa Dengan Jarak Pemisah Tak Simetris



Gambar 2.2 Penghantar dengan Jarak Tak Simetris

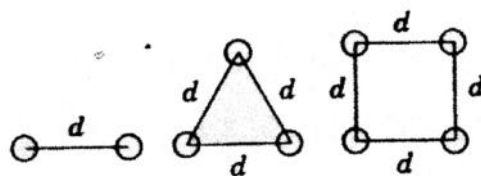
Penghantar-penghantar yang mempunyai jarak tidak simetris, persoalan untuk mencari induktansinya lebih sukar, karena fluks gandeng dan induktansi setiap fasanya menjadi tidak sama, pada setiap fasa menghasilkan suatu rangkaian yang tidak seimbang. Keseimbangan ketiga fasa itu dapat pulih dengan mempertukarkan kedudukan penghantar-penghantar pada selang jarak tertentu sepanjang saluran sedemikian hingga setiap penghantar akan mendudukikedudukan semula penghantar yang lain pada suatu jarak yang sama (transposisi). Sehingga induktansi rata-rata per fasa adalah:

$$L_a = 2 \times 10^{-7} \ln \frac{D_{eq}}{r} \text{ H/m} \dots \dots \dots (8)$$

dimana :

$$D_{eq} = \sqrt[3]{D_{12}D_{23}D_{31}} \dots \dots \dots (9)$$

c. Penghantar Berkas



Gambar 2.3 Penghantar Berkas

Pada tegangan ekstra tinggi diatas 230 kV, pada umumnya menggunakan penghantar berkas yaitu; menggunakan 2 atau lebih penghantar per fasa yang disusun berdekatan dibanding dengan

jarak pemisah antar fasanya atau disebut juga bundled conductors. Harga D_s untuk masing-masing penghantar berbeda-beda, tergantung dari jumlah penghantarnya. Sehingga:

Untuk suatu berkas dua penghantar

$$D_s^b = \sqrt[3]{(D_s x d)^2} = \sqrt{(D_s x d)} = \dots \dots \dots (10)$$

Untuk suatu berkas tiga penghantar

$$D_s^b = \sqrt[9]{(D_s x d x d)^3} = \sqrt[3]{(D_s x d)^2} = \dots \dots \dots (11)$$

Untuk suatu berkas empat penghantar

$$D_s^b = \sqrt[16]{(D_s x d x d x d x 2^{1/2})^3} = 1,09 \sqrt[4]{(D_s x d)^3} \dots \dots \dots (12)$$

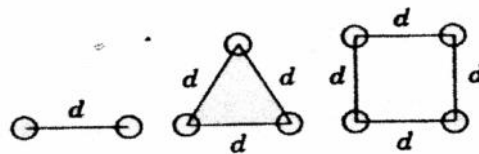
Padapenghantar berkas, nilai D_s^b menggantikan nilai D_s pada penghantar tunggal. Sedangkan untuk menghitung D_{eq} , jarak dari pusat suatu berkas ke pusat berkas yang lain cukup tepat untuk, D_{ab} , D_{bc} , D_{ca} . Mendapatkan GMD yang sebenarnya antar penghantar-penghantar pada suatu berkas dan penghantar pada berkas yang lain hampir tidak adabedanya dengan jarak antara pusat-pusat untuk jarak pemisah yang sama.

3. Kapasitansi (C)

Kapasitansi saluran transmisi terjadi akibat beda potensial antara penghantar (konduktor). Kapasitansi antara penghantar adalah muatan perunit beda potensial. Suatu tegangan bolak-balik yang terpasang pada saluran transmisi akan menyebabkan muatan pada penghantar disetiap titik bertambah atau berkurang sesuai dengan kenaikan dan penurunan nilai sesaat tegangan antara penghantar pada titik tersebut.

Aliran muatan adalah arus yang disebabkan oleh pengisian dan pengosongan bolak-balik (*alternative charging and discharging*) saluran karena tegangan bolak-balik disebut arus pengisian saluran.

a. Kapasitansi Saluran Tiga Fasa Dengan Jarak Pemisah Yang Sama



Gambar 2.4 Penghantar dengan jarak simetris

Karena kapasitansi ke netral merupakan perbandingan antara muatan pada suatu penghantar dan tegangan antara penghantar tersebut dengan netral adalah

$$C_n = \frac{q_c}{F_n} = \frac{2\pi\epsilon}{\ln D/r} F/m \text{ ke netral} \dots\dots\dots (13)$$

$$K = 8,85 \cdot 10^{12} F/m$$

r = adalah jari-jari luar penghantar

Sedangkan untuk arus pengisian (*charging current*) dipakai untuk arus yang ada hubungannya dengan saluran. Untuk suatu rangkaian fasa tunggal, arus pengisian adalah hasil perkalian tegangan antar saluran dengan suseptansi antar saluran sebagai suatu fasor,

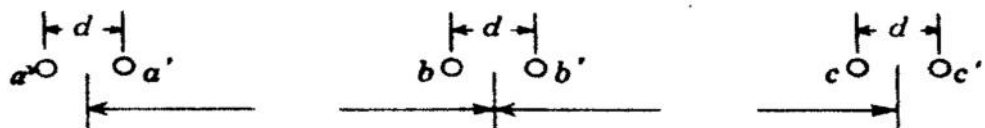
$$I_{chg} = j\omega C_{ab} V_{ab} \dots\dots\dots (14)$$

Untuk saluran tiga fasa, arus pengisian didapatkan dengan mengalikan tegangan ke netral dengan susceptansi kapasitif ke netral. Hasilnya adalah arus pengisian per fasa, fasor arus pengisian fasa a adalah :

$$I_{\text{chg}} = j\omega C_n V_{\text{am}} \text{ A/mi} \dots \dots \dots (15)$$

Karena tegangan rtns disepanjang saluran berbeda-beda, arus pengisian tidak sama dimana-mana. Tetapi untuk mendapatkan besar arus pengisian sering dipakai tegangan biasa yaitu dimana saluran itu dirancang misalnya 220 atau 500 kV yang mungkin sekali bukanlah tegangan yang sebenarnya terdapat baik pada stasiun pusat pembangkitan maupun pada beban,

b. Kapasitansi Saluran Tiga Fasa Dengan Jarak Pemisah Yang Tidak Simetris



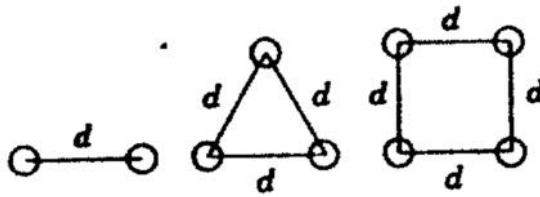
Gambar 2.5 Penghantar dengan Jarak Tak Simetris

Jika penghantar pada saluran tiga fasa tidak terpisah dengan jarak yang sama, perhitungan kapasitansi menjadi lebih sulit. Pada saluran yang tidak ditransposisikan lengkap adalah sama dengan kapasitansi rata-rata salah satu fasa ke netral untuk periode transposisi lengkap adalah sama dengan kapasitansi rata-rata setiap fasa yang lain ke netral, karena masing-masing penghantar fasa

menduduki posisi semula. Sehingga kapasitansi ke netral saluran tiga fasa adalah :

$$C_n = \frac{q_a}{V_{an}} = \frac{2\pi k}{\ln L_{eq}(r')} F/m \text{ ke netral} \dots\dots\dots(16)$$

c. Penghantar Berkas



Gambar 2.6 Penghantar Berkas

Penghantar berkas pada setiap berkas adalah sejajar, dan dapat kita misalkan bahwa muatan per berkas terbagi sama rata diantara penghantaraya, karena jarak pemisah antara berkas biasanya lebih dari 15 kali jarak antarpenghantar-penghantar dalam berkas. Sehingga rekatansi kapasitif ke netral dari saluran dengan \overline{rd} sama dengan D_s^b untuk suatu berkas dua penghantar adalah:

$$C_n = \frac{q_a}{V_{an}} = \frac{2\pi k}{\ln L_{eq}(rd)} F/m \text{ ke netral} \dots\dots\dots(17)$$

atau

$$C_n = \frac{2\pi k}{\ln L_{eq}(L_{sc}^b)} F/m \text{ ke netral} \dots\dots\dots(18)$$

Untuk suatu berkas dua penghantar :

$$D_{sc}^b = \sqrt[4]{(rxd)^2} = \sqrt{r x d} \dots\dots\dots(19)$$

Untuk suatu berkas tiga penghantar :

$$D_{sc}^b = \sqrt[9]{(rxdxd)^2} = \sqrt[3]{rxc^2} \dots\dots\dots(20)$$

Untuk suatu berkas empat penghantar :

$$D_{sc}^b = \sqrt[9]{(rxdxdxdx2^{1/2})^4} = 1,09^4 \sqrt[4]{rd^3} \dots\dots\dots(21)$$

4. Jenis-Jenis Penghantar Pada Saluran

Pada masa awal dari transmisi tenaga listrik, penghantar biasanya terbuat dari tembaga. Tetapi penghantar aluminium, yang lebih murah dan lebih ringan dibandingkan dengan penghantar tembaga untuk suatu resistansi yang sama, akhirnya menggantikan kedudukan penghantar tembaga. Kenyataan bahwa untuk resistansi yang sama penghantar aluminium mempunyai diameter yang lebih besar dari penghantar tembaga, juga merupakan suatu keuntungan. Dengan diameter yang lebih besar garis fluks listrik yang berasal dari penghantar tersebut akan lebih berjauhan satu dengan yang lain dipermukaan penghantar untuk tegangan yang sama. Ini berarti bahwa di permukaan penghantar terdapat gradien tegangan yang lebih rendah, sehingga kemungkinan terjadinya ionisasi udara di sekitar penghantar juga lebih kecil. Ionisasi menimbulkan efek buruk yang disebut corona.

Berbagai macam jenis penghantar aluminium dapat dikenal dari lambang-lambang berikut ini:

1. *All-Aluminium Conductors* (AAC), seluruhnya terbuat dari aluminium.
2. *All-Aluminium-Alloyconductors* (AAAC), seluruhnya terbuat dari campuran aluminium.

3. *Aluminium Conductor Steel Reinforced (ACSR)*, penghantar aluminium yang diperkuat dengan baja.
4. *Aluminium Conductor, Alloy-Reinforced (ACAR)*, penghantar aluminium yang diperkuat dengan logam campuran.

Penghantar dari campuran aluminium mempunyai kekuatan-tarik (*tensile strength*) yang lebih besar daripada penghantar aluminium biasa. ACSR terdiri dari inti serat baja di tengah, yang dikelilingi oleh lapisan-lapisan dari serat aluminium. ACAR mempunyai inti tengah terbuat dari aluminium berkekuatan tinggi yang dikelilingi oleh lapisan-lapisan penghantar aluminium biasa.

Lapisan-lapisan serat penghantar secara berturutan dipilin dan dililit dengan arah yang berlawanan agar tidak terlepas kembali dan supaya jari-jari luar suatu lapisan sesuai besarnya dengan jari-jari dalam lapisan berikutnya. Pelapisan dan pemilinan serat-serat (*stranding*) memberikan kelenturan yang baik untuk penampang kabel yang besar. Jumlah serat yang terpakai tergantung pada jumlah lapisan dan apakah semua serat mempunyai diameter yang sama. Jumlah serat yang dipakai dalam kabel-kabel, dililit secara konsentris (sepusat), yang seluruhnya terisi oleh serat-serat yang sama diameternya.

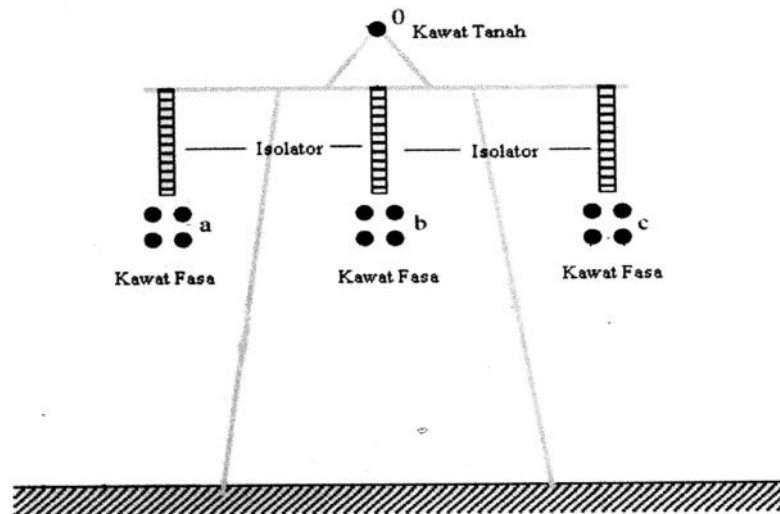
5. Komponen-Komponen Utama Saluran Udara

a. Menara transmisi atau tiang transmisi beserta pondasinya

Merupakan suatu bangunan penopang saluran transmisi. Jenis-jenis dari bangunan penopang adalah menara-menara baja,

tiang-tiang baja, tiang-tiang beton bertulang dan tiang-tiang kayu. Dilihat dari fungsi menara atau tiang saluran transmisi terdapat tiang atau menara pemikul, sudut, awal dan akhir. Menara atau tiang pemikul fungsinya adalah memikul konduktor beserta isolator. Karena jalannya saluran transmisi tidak selalu lurus dan terdapat belokkan maka pada tikungan diperlukan menara sudut.

Menara sudut perlu lebih kuat dari menara pemikul hal ini disebabkan karena terdapat tank tambahan (*guy wire*) pada satu arah tertentu karena adanya tikungan (agar tidak menjadi bengkok). Sedangkan untuk menara atau tiang awal maupun akhir juga perlu memiliki bentuk yang kuat.



Gambar 2.7 Menara Saluran Transmisi

b. Isolator-isolator

Jenis isolator yang digunakan pada saluran transmisi adalah jenis porselin atau gelas. Jenis isolator menurut penggunaannya dan

konstruksinya antara lain; isolator pasak (pin insulator, pin post insulator, line post insulator), isolator tarik dan isolator gantung. Isolator dipasang atau digantung pada travers (*cross arm*) menara atau tiang transmisi.

c. Kawat penghantar

Merupakan kawat-kawat tanpa isolator (kawat telanjang) yang padat (*solid*), berlilit (*stranded*) atau berongga (*hollow*). Jenis kawat penghantar adalah tembaga dengan konduktivitas 97.5 % atau aluminium dengan konduktivitas 61 %. Kawat penghantar tembaga mempunyai beberapa kelebihan dibandingkan dengan kawat penghantar aluminium karena konduktivitas dan kuat tariknya lebih tinggi. Tetapi kelemahannya yaitu untuk besar tahanan yang sama, tembaga lebih berat dari aluminium dan juga lebih mahal.

Kawat penghantar aluminium telah menggantikan kedudukan tembaga. Untuk memperbesar kuat tarik dari kawat aluminium, maka digunakan campuran aluminium (*alloy aluminium*). Untuk saluran transmisi tegangan tinggi, di mana jarak antara dua tiang/menara jauh (ratusan meter), dibutuhkan kuat tarik yang lebih tinggi. Untuk itu digunakan kawat penghantar ACSR.

d. Kawat tanah (*Groundwire*)

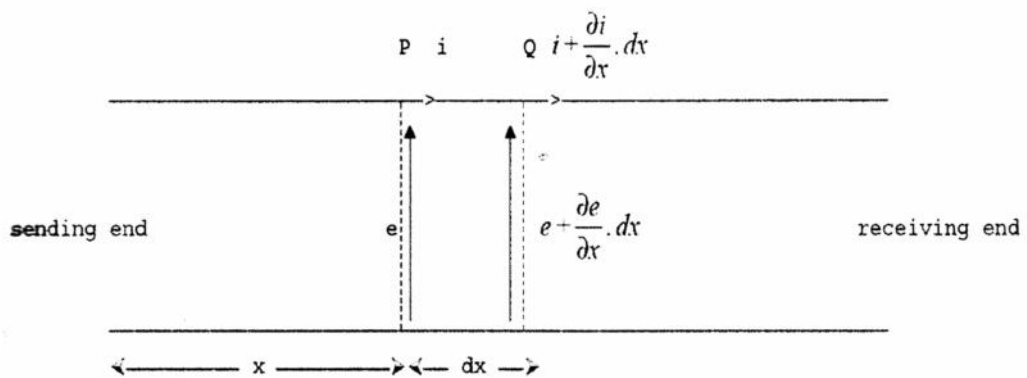
Kawat tanah disebut juga kawat pelindung (*shield wires*), berguna untuk melindungi kawat penghantar atau kawat fasa terhadap sambaran petir atau gangguan lain, seperti gangguan

hubung singkat. Jadi kawat tanah itu dipasang diatas kawat fasa. Sebagai kawat tanah umumnya dipakai kawat baja (steel wires) yang lebih murah tetapi tidaklah jarang digunakan ACSR.

C. Analisis Transien Pada Saluran Transmisi

Karena berbagai alasan, seperti sambaran petir langsung maupun tak langsung, atau operasi *switching* dan gangguan-gangguan, surja tegangan tinggi diinduksikan pada saluran transmisi. Surja dapat dilihat mengalir sepanjang saluran udara (*overhead line*) dengan kecepatan mendekati kecepatan cahaya. Gelombang ini yang menjangkau ujung saluran dan simpangan saluran transmisi, sebagian dipantulkan (mundur) dan sebagian lagi diteruskan (maju). Hal ini dapat dianalisa melalui cara di bawah ini.

Diasumsikan suatu bagian kecil dari panjang saluran transmisi adalah dx . Diberikan variasi tegangan sesaat yang melintas pada bagian tersebut adalah e dan $e + \frac{\partial e}{\partial x} dx$, dan arus yang melintas i dan $i + \frac{\partial i}{\partial x} dx$.



Gambar 2.8 Saluran Transmisi

Dalam kaitan dengan surja, tegangan yang dihasilkan pada saluran, berjalan disepanjang saluran dan akan mengakibatkan kerusakan pada transformator dan peralatan sistem lainnya.

Diberikan :

e = tegangan sesaat (bervariasi berdasarkan jarak dan waktu)

i = arus sesaat (bervariasi berdasarkan jarak dan waktu)

R = resistansi saluran per satuan panjang

L = induktansi saluran per satuan panjang

C = kapasitansi saluran per satuan panjang

G = konduktansi saluran per satuan panjang

Penurunan tegangan (*voltage drop*) yang melintasi PQ dan arus yang berhubungan dengannya diberikan pada persamaan berikut.

$$V = - \frac{dV}{dx} = R dx I + L dx \frac{di}{dt} \dots\dots\dots(22)$$

$$I = - \frac{dI}{dx} = G dx e + C dx \frac{de}{dt} \dots\dots\dots(23)$$

Penyelesaian dari persamaan (22) dan (23) memberikan persamaan turunan parsial

$$- \frac{dV}{dx} = R I + L \frac{di}{dt} \dots\dots\dots(24)$$

$$- \frac{dI}{dx} = G e + C \frac{de}{dt} \dots\dots\dots(25)$$

Pendiferensialan persamaan (24) terhadap x , dan persamaan (25)

terhadap t dan pengeliminasian i , maka dihasilkan

$$\frac{d^2 V}{dx^2} = (C.R + L.G) \frac{d^2 e}{dt^2} + R \frac{de}{dt}$$

Dengan menurunkan persamaan turunan parsial yang sejenis, maka akan diperoleh persamaan untuk i

$$\frac{a^2 i}{ax^2} = L.C \frac{a^2 i}{at^2} + (C.R + L.G) \frac{e^{-x}}{t} \cdot R i \dots\dots\dots(26)$$

Dalam saluran transmisi nyata, resistansiff bernilai lebih kecil daripada induktansi L, dan konduktansi G dapat diabaikan. Dengan asumsi ini, maka

ma dapat direduksi menjadi

$$\dots\dots\dots(27)$$

Dengan memisalkan $L \cdot C = 1/v^2$ yang mempunyai dimensi kecepatan.

Persamaan menjadi

$$V^2 \dots\dots\dots(28)$$

Penyelesaian persamaan turunan parsial orde kedua ini dapat ditulis dalam bentuk dua fungsi permisalan.

Diriskan fungsi $e = f(x - vt)$. Untuk ini,

$$V^2 \dots\dots\dots(29)$$

Dengan cara yang sama, misalkan fungsi $e = F(x + vt)$. Untuk ini,

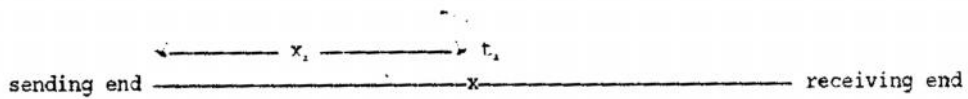
$$V^2 \dots\dots\dots(30)$$

Sehingga didapatkan bahwa solusi umum persamaan turunan parsial tersebut adalah

$$e = f(x - vt) + F(x + vt) \dots\dots\dots(31)$$

dimana f dan F adalah dua fungsi permisalan dari $(x - vt)$ dan $(x + vt)$.

Kedua fungsi ini dapat ditampilkan sebagai sebuah perjalanan maju dan mundur gelombang. Diberikan sebuah titik x_1 pada suatu waktu sesaat t_1 pada sebuah saluran transmisi *sending end receiving end*.



Gambar 2.9 Skema Saluran Transmisi dengan Sebuah Titik X₁,

Nilai dari fungsi $f(x - vt)$ pada posisi x_1 dan waktu t_1 adalah

$$e_1 = f(x_1 - vt_1) \dots\dots\dots(32)$$

Pada waktu setelah t_1 tersebut (pada waktu $t + t_1$), nilai dari fungsi tersebut pada posisi x adalah

$$e_2 = f[x - v(t + t_1)] = f(x - vt - vt_1) \dots\dots\dots(33)$$

Nilai tegangan e_2 sama dengan e_1 pada posisi $x_1 = x - vt_1$.

vt_1 merupakan jarak tempuh sebuah gelombang berjalan dengan kecepatan v dalam arah maju pada waktu t_1 . Hal ini memperlihatkan bahwa nilai tegangan pada jarak vt_1 dalam arah maju selalu sama dengan nilai tegangan pada posisi sebelumnya di waktu sebelumnya untuk setiap saat. Maka, fungsi $f(x - vt)$ menghadirkan sebuah gelombang maju. Dengan cara yang sama, dapat diperlihatkan bahwa fungsi $F(x + vt)$ menghadirkan sebuah gelombang mundur.

Efek dari resistansi dan konduktansi, yang telah diabaikan pada perhitungan sebelumnya, akan mengubah bentuk gelombang dan juga menyebabkan redaman (*attenuation*). Perubahan tersebut biasanya cukup kecil, dan gelombang mengalir dengan modifikasi kecil. Faktanya, efek ini dapat dianalisis secara terpisah dan dibahas nanti.

1. Impedansi Surja Dan Kecepatan Rambat

Dengan pertimbangan gelombang maju $e = f(x - vt)$, maka arus yang berhubungan dengan gelombang dapat diperkirakan dari persamaan berikut:

$$L = \frac{\partial}{\partial x} f(x-vt) \dots\dots\dots(34)$$

$$i = \frac{\partial}{\partial t} f(x-vt) \dots\dots\dots(35)$$

$$i = \frac{\partial}{\partial x} f(x-vt) \dots\dots\dots(36)$$

$$i = \frac{1}{v} \frac{\partial}{\partial t} f(x-vt) \dots\dots\dots(37)$$

$$e = \frac{1}{v} \frac{\partial}{\partial x} f(x-vt) \dots\dots\dots(38)$$

$$\text{dimana } Z_0 = \sqrt{L/C} \dots\dots\dots(39)$$

Z_0 diketahui sebagai impedansi surja (karakteristik) dari saluran transmisi. Perjalanan arus surja i sepanjang saluran selalu diiringi oleh perjalanan tegangan surja $e = Z_0 i$ pada arah yang sama. Untuk gelombang mundur, dengan cara yang sama dapat ditunjukkan bahwa arus surja i dikaitkan dengan sebuah tegangan surja $e = - Z_0 i$.

Untuk sebuah saluran transmisi tiga fasa, dengan penghantar (konduktor) yang memiliki radius r dan jarak antar penghantar (antar fasa) d , dapat ditunjukkan bahwa induktansi per fasa saluran tiga fasa

per satuan panjang adalah

$$L = \frac{2 \times 10^{-7}}{C/L} \ln \frac{d}{r} \dots\dots\dots(40)$$

Dengan asumsi fluks internal nilainya kecil dan dapat diabaikan, maka

Modul

$$L = \frac{\mu_0 I n^2}{2\pi r} \dots\dots\dots(41)$$

$$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ H/m}$$

Kapasitansi ke netral untuk saluran tiga fasa per satuan panjang

diberikan oleh

$$C = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r}{r} \dots\dots\dots(42)$$

Untuk udara murni maka $\epsilon_r = 1$

$$L.C = \mu_0 \epsilon_0 = \frac{1}{v^2} \dots\dots\dots(43)$$

dimana v - kecepatan cahaya

Oleh karena itu, kecepatan rambat gelombang v sama dengan kecepatan cahaya c . Dengan catatan : jika resistansi saluran tidak diabaikan, kecepatan rambat gelombang sedikit lebih kecil dari kecepatan cahaya (sekitar 5 sampai 10 %-nya).

Untuk sebuah kabel, dengan material dielektrik mempunyai permitivitas relatif ϵ_r yang tidak sama dengan 1, dapat diturunkan persamaan kecepatan gelombang sebagai

$$V = \frac{v}{\sqrt{\epsilon_r}} \dots\dots\dots(44)$$

Untuk kabel-kabel komersial, ϵ_r bernilai antara 1,5 dan 4. Sehingga kecepatan rambat gelombang pada sebuah kabel nilainya berkisar antara $\frac{1}{2}$ dan $\frac{4}{5}$ dari kecepatan cahaya.

Impedansi surja dari sebuah saluran dapat dihitung sebagai berikut:

$$Z_0 = \sqrt{\frac{L}{C}} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \ln\left(\frac{d}{r}\right) \dots\dots\dots(45)$$

Dengan memasukkan nilai $c = 3.108 \text{ m/s}$ maka didapatkan

$$Z_0 = 60 \ln(d/r) \Omega \dots\dots\dots(46)$$

Untuk sebuah overhead line, dengan penghantar yang memiliki radius r dan jarak antar penghantar d , nilai Z_0 berkisar antara 300 sampai 600 Ω .

Untuk sebuah kabel, impedansi surjanya

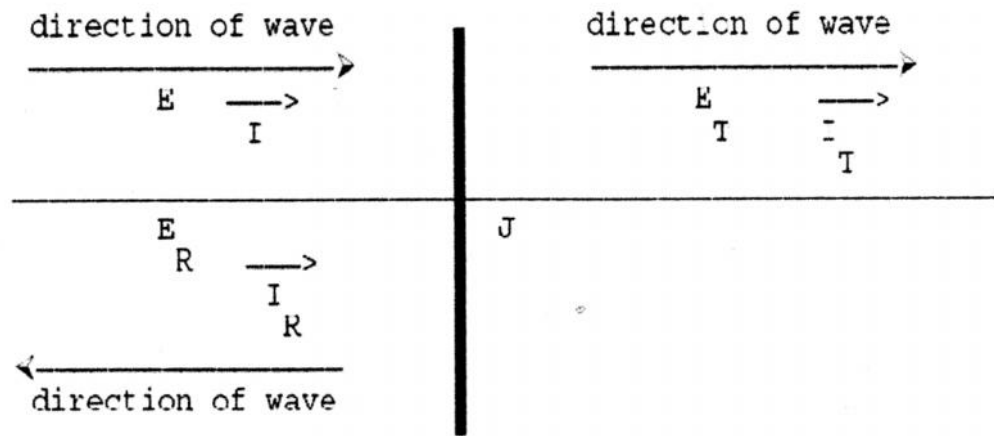
$$Z_0 = 120 \ln(d/r) \Omega \dots\dots\dots(47)$$

yang nilainya berkisar antara 50 sampai 80 Ω .

2. Pemantulan Gelombang Berjalan Pada Sebuah Simpangan (*Junction*)

Ketika sebuah gelombang berjalan pada sebuah saluran transmisi menjangkau sebuah simpangan dengan saluran lain, atau sebuah penutupan saluran (*termination*), maka sebagian dari gelombang berjalan keluaran (*incident wave*) itu dipantulkan balik, sebagian lainnya diteruskan keluar simpangan atau saluran tertutup.

Gelombang keluaran, gelombang pantul, dan gelombang yang diteruskan (gelombang terusan) memenuhi hukum Kirchoff. Ketiga gelombang tersebut juga memenuhi persamaan diferensial saluran.



Gambar 2.10 Gambar Hubungan Antara Gelombang Keluaran, Gelombang Pantul, dan Gelombang Terusan

Diberikan sebuah gelombang tegangan "dengan *magnitude* keluaran E simpangan I yang terletak di antara dua saluran dengan impedansi surja Z_1 dan Z_2 . Sebuah bagian gelombang E_T dari surja ini diteruskan dan bagian lainnya E_R akan dipantulkan seperti yang ditunjukkan pada gambar.

Tidak ada diskontinuitas tegangan pada simpangan j , Oleh karena itu,

$$E = E_T + E_R \dots\dots\dots(48)$$

Tidak ada diskontinuitas arus pada simpangan J . Oleh karena itu,

$$I + I_R = I_T \dots\dots\dots(49)$$

Tegangan surja keluaran E terkait dengan arus surja keluaran I dan impedansi surja saluran Z_1 . Sedangkan tegangan surja terusan E_T berhubungan dengan arus surja terusan dan impedansi surja saluran

Z2. Dan tegangan surjapantulan E_R berhubungan dengan arus surja pantulan dan impedansi surja saluran Z_1

Bagaimanapun juga, dapat dicatat bahwa gelombang pantulan adalah sebuah gelombang balik. Sehingga bisa dituliskan

$$E = Z_1 I_T, E_T = Z_2 I_T, \text{ dan } E_R = -Z_1 I_R \dots \dots \dots (50)$$

Dengan substitusi maka didapat nilai

$$\frac{E + E_R}{Z_1} = \frac{E_T}{Z_2} = \frac{(E + E_R)}{Z_2} \dots \dots \dots (51)$$

Ini memberikan penyederhanaan

$$E_R = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} E \dots \dots \dots (52)$$

Dengan cara yang sama, surja terusan dapat ditulfe sebagai

$$E_T = \frac{2Z_2}{Z_2 + Z_1} E \dots \dots \dots (53)$$

Dari dua persamaan di atas, diperoleh gelombang terusan E_T dan gelombang pantulan E_R dalam fungsi gelombang keluaran E , Karena kedua surja ini adalah sebuah pecahan bagian dari surja keluaran, maka koefisien transmisi (terusan) α dan koefisien refleksi (pantulan) β dapat didefinisikan sebagai berikut:

$$\alpha = \frac{2Z_2}{Z_2 + Z_1} \dots \dots \dots (54)$$

$$\beta = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \dots \dots \dots (55)$$

Jika diasumsikan $Z_1 = Z_2$, maka tidak ada pemantulan pada simpangan dan koefisien refleksi bernilai nol. Ketika saluran Z_1 dihubung-terbukakan (*open circuited*) pada ujung yang jauh (ujung yang

mendekati sisi penerimaan / receiving end) atau $Z_1 = \infty$, maka seluruh gelombang dipantulkan balik dan koefisien refleksi bernilai 1.

Ketika saluran Z_1 dihubung-singkatkan (*short circuited*) pada ujung yang jauh atau $Z_2 = 0$, maka gelombang tegangan akan hilang. Seluruh gelombang dipantulkan balik pada arah berlawanan dan berperan sebagai penghambat gelombang keluaran. Pada kasus ini, koefisien refleksi bernilai -1.

D. Diagram *Lattice Bewley*

Diagram *Lattice Bewley* adalah sebuah diagram yang diperkenalkan oleh Bewley, yang menunjukkan suatu pengamatan posisi dan arah pergerakan masing-masing gelombang; gelombang keluaran, gelombang pantulan dan gelombang terusan dalam sistem setiap saat. Diagram ini mampu mengatasi kesulitan dalam mengamati penggantian pemantulan yang terjadi berturut-turut pada berbagai simpangan. Dianggap bahwa suatu saluran transmisi mempunyai resistansi R , induktansi L , konduktansi G dan kapasitansi C . Semua dalam per satuan panjang.

Jika

γ = konstanta perambatan (propagasi) saluran transmisi, dan

E = besar nilai surja tegangan pada sending end,

maka besar nilai dan fasa gelombang saat menjangkau suatu jarak x dari sending end adalah E_x diberikan oleh persamaan :

$$E_x = E \cdot e^{-\gamma x} = E \cdot e^{-(\alpha + j\beta)x} = E \cdot e^{-\alpha x} \cdot e^{-j\beta x} \dots \dots \dots (56)$$

dimana

$e^{-\alpha x}$ = redaman pada panjang saluran sebesar x

$e^{j\beta x}$ = perubahan sudut fasa pada panjang saluran sebesar x

dan

α = konstanta redaman saluran (neper/km)

β = konstanta sudut fasa saluran (rad/km).

Biasanya, faktor redaman k berkaitan dengan panjang saluran yang partikuler. Dimisalkan $k = e^{-\alpha l}$ untuk panjang saluran l .

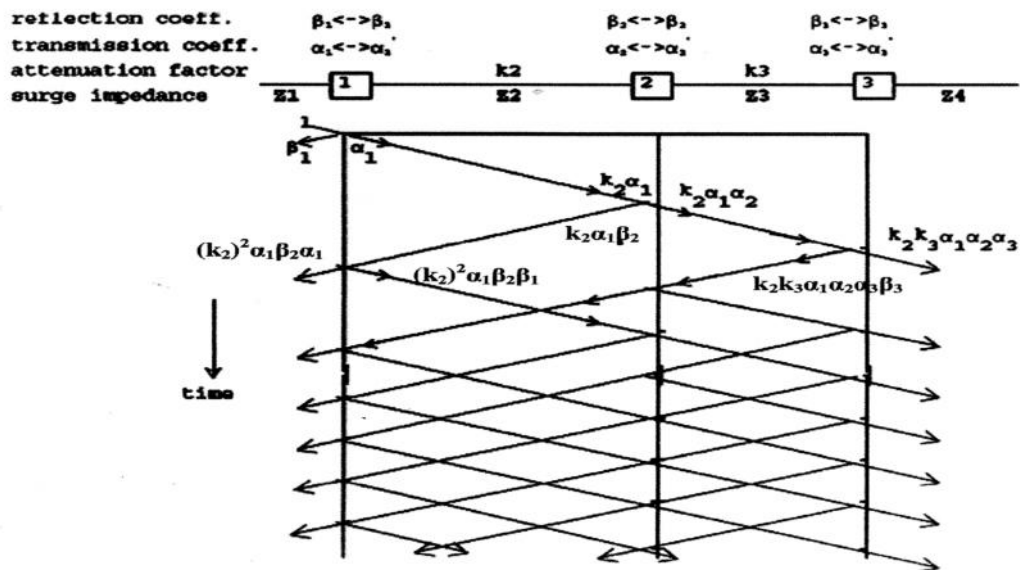
Konstanta perambatan saluran γ dari sebuah saluran dengan impedansi seri per satuan panjang z dan admitansi shunt per satuan panjang y diberikan oleh :

$$\gamma = \sqrt{Z \cdot y} = \sqrt{(R + j\omega L)(G + j\omega C)} \dots\dots\dots(57)$$

Dengan R, L, G, C sama, impedansi surja saluran (impedansi karakteristik)

$$Z_0 = \sqrt{\frac{R + j\omega L}{G + j\omega C}} \dots\dots\dots(58)$$

Ketika sebuah surja tegangan, dengan besar nilai satuan, menjangkau sebuah simpangan di antara dua bagian saluran dengan impedansi surja Z_1 dan Z_2 , maka suatu bagian α diteruskan dan suatu bagian β dipantulkan balik. Saat melintasi saluran kedua, jika faktor redaman adalah k , ketika telah menjangkau ujung penutupan saluran kedua maka amplitude surja tersebut akan berkurang nilainya menjadi $k \cdot \alpha$. Diagram *lattice* dapat dirancang sebagai berikut ini.



Gambar 2.11 Diagram Lattice Bewley

Ditentukan ujung-ujung saluran dengan interval waktu pelintasan yang sama untuk masing-masing saluran. Jika suatu skala waktu yang sesuai telah dipilih, maka garis-garis diagonal pada diagram tersebut menunjukkan sebuah perjalanan gelombang. Dalam merancang Diagram *Lattice Bewley*, ada hal-hal yang harus diperhatikan.:

1. Semua gelombang berjalan dengan arah menurun seiring dengan bertambahnya waktu.
2. Posisi semua gelombang pada setiap saat dapat diperkirakan langsung dari diagram.
3. Potensial (nilai gelombang) pada setiap titik, di setiap waktu, merupakan superposisi dari semua gelombang yang telah sampai di titik tersebut hingga suatu waktu tersebut.

4. Perjalanan gelombang tersebut mudah untuk dilacak. Sangatlah mungkin untuk menemukan dimana gelombang tersebut dan gelombang lain yang menjadi penyusunnya itu datang.
5. Redaman diperhitungkan. Maka, gelombang yang sampai pada ujung saluran yang jauh mempunyai hubungan dengan nilai amplitudo gelombang dikalikan faktor redaman saluran.

E. Gangguan Pada Saluran Transmisi

1. Jenis Gangguan

Gangguan pada saluran transmisi kira-kira 70% s/d 80% dari seluruh gangguan yang terjadi pada sistem tenaga listrik. Hal ini dikarenakan :

- a. Luas dan panjangnya bentangan kawat transmisi yang terbentang.
- b. Kondisi udara yang berbeda-beda,
- c. Pada sistem transmisi, suatu gangguan dapat terjadi disebabkan oleh :
 - 1) Kesalahan raekanis.
 - 2) Kesalahan thermis.
- d. Tegangan lebih.
- e. Material yang cacat atau rusak.

Sedangkan gangguan yang sering terjadi pada saluran transmisi adalah gangguan hubung singkat. Besar dari arus hubung singkat itu tergantung :

- a. Jenis dan sifat gangguan hubung singkat.
- b. Kapasitas dari sumber daya.
- c. Konfigurasi dari sistem.
- d. Metode hubungan netral dari trafo.
- e. Jarak gangguan dari unit pembangkit.
- f. Angka pengenal dari peralatan-peralatan utama dan alat-alat pembatas arus.
- g. Lamanya hubung singkat.
- h. Kecepatan beraksi dari alat-alat pengaman.

2. Akibat Gangguan

Sedangkan akibat-akibat yang disebabkan gangguan tersebut diatas antara lain adalah sebagai berikut:

- a. Menginterupsi kontinuitas pelayanan daya kepada konsumen apabila gangguan itu sampai menyebabkan terputusnya suatu rangkaian atau menyebabkan keluarnya suatu unit pembangkit.
- b. Penurunan tegangan yang besar menyebabkan rendahnya kualitas tenaga listrik dan merintanginya kerja normal pada peralatan konsumen.
- c. Pengurangan stabilitas sistem dan menyebabkan jatuhnya generator.

- d. Merusak peralatan pada daerah terjadinya gangguan.

3. Faktor-Faktor Penyebab Terjadi Gangguan

Faktor-faktor yang dapat menyebabkan terjadinya gangguan pada sistem transmisi adalah sebagai berikut:

- a. Surja petir atau surja hubung. Dari pengalaman diperoleh bahwa petir sering menyebabkan terjadinya gangguan pada sistem tegangan tinggi sampai 150-220 KV. Sedangkan pada sistem tegangan tinggi diatas 380 KV, yang menjadi sebab utamanya adalah surja hubung.
- b. Burung atau daun-daun. Jika burung atau daun-daun terbang dekat pada isolator gantung dari saluran transmisi, maka *clearance*(jarak aman) menjadi berkurang, sehingga ada kemungkinan terjadinya locatan bunga api.
- c. Polusi (debu). Debu-debu yang menempel pada isolator, merupakan konduktor yang bisa menyebabkan terjadinya loncatan bunga api.
- d. Pohon-pohon yang tumbuh di dekat saluran transmisi.
- e. Retak-retak pada isolator. Dengan adanya retak-retak pada isolator maka secara mekanis apabila ada petir yang menyambar akan terjadi tembus (*break down*) pada isolator.

4. Klasifikasi Gangguan

Klasifikasi gangguan dibedakan dari dua segi, yaitu :

- a. Dari macamnya gangguan :

- 1) Gangguan tiga fasa tanpa hubungan ke tanah.
- 2) Gangguan tiga fasa melalui tahap hubung tanah
- 3) Gangguan dua fasa tanpa hubungan ke tanah.
- 4) Gangguan dua fasa ke tanah.
- 5) Gangguan satu fasa ke tanah.

Gangguan tiga fasa ke tanah maupun tidak ke tanah merupakan jenis *symmetrical fault*. Gangguan satu fasa ke tanah dan dua fasa ke tanah adalah jenis *Grounded fault*. Sedangkan gangguan dua fasa (fasa ke fasa) termasuk *unGrounded fault*, *Grounded fault* dan *unGrounded fault* disebut juga *unsymmetrical fault*.

b. Dari lamanya waktu gangguan :

- 1) Gangguan permanen,

Merupakan gangguan yang terjadi baru dapat dihilangkan atau diperbaiki setelah bagian yang terganggu itu diisolir dengan bekerjanya pemutus daya.

- 2) Gangguan temporer.

Merupakan gangguan yang terjadi dalam waktu yang singkat saja dimana kemudian sistem kerabali pada keadaan normal.

F. Metode-Metode Penentuan Lokasi Gangguan

1. *Time Domain Reflectometers*

Pada awalnya, penentuan lokasi gangguan didasarkan pada teknik radar pulsa. Alat ini dikenal sebagai *Time Domain Reflectometers*

(pengukur gelombang pantulan berdomain waktu) atau TDRs, biasa digunakan untuk menentukan lokasi gangguan pada kabel tanah. Pemeriksaan secara visual tidak mungkin terjadi jika tanpa proses penggalian.

Teknik ini menggunakan sebuah pulsa yang diluncurkan pada satu ujung kabel. Pulsa tersebut dipantulkan kembali menuju sumber pulsa dan menunjukkan diskontinuitas elektrik pada lokasi gangguan. Lokasi gangguan ditentukan dengan pengukuran waktu tunda (*delay time*) antara waktu peluncuran pulsa dengan waktu penerimaan pantulan pulsa tersebut. Akan tetapi, metode ini kurang menarik jika diterapkan untuk saluran transmisi udara (*overhead transmission lines*).

Beberapa faktor yang menyebabkan teknik ini tidak bisa dipraktekkan untuk saluran transmisi udara, antara lain :

- a. Tidak seperti kabel tanah yang panjangnya dalam keseluruhan secara fisik dan parameter elektrisnya seragam, saluran udara memiliki diskontinuitas yang tak terpisahkan seperti struktur menara (*tower structure*), variasi dari penghantar. Hal tersebut menyebabkan pantulan sekunder pulsa yang tidak diinginkan yang mengganggu penentuan waktu penerimaan pantulan pulsa.
- b. Saluran yang terkena gangguan harus dinon-fungsikan untuk dilakukan pengujian. Selain itu, peringatan khusus diberikan untuk meyakinkan adanya efek induktansi timbal balik (*mutual in*

ductan ceffects) dari saluran-saluran di sebelahnya yang tidak terkena gangguan peralatan bertenaga listrik di dekatnya.

- c. Gangguan harus permanen (misalnya seperti *solid short* atau *open conductors*) untuk menegaskan sinyal atau pulsa pantulan yang kuat.

Biasanya ada beberapa gangguan dengan cepatnya menghilang sehingga peralatan penentuan lokasi gangguan (dalam hal ini TDRs) menjadi rusak dan tidak bisa digunakan. TDRs pernah digunakan pada saluran transmisi udara di negara Amerika Serikat untuk beberapa tahun sebelum akhirnya benar-benar terabaikan karena alasan kompleksitas dan keuntungan yang kecil.

2. Impedance-Based Fault Location Methods

Perkembangan terbesar metode penentuan lokasi gangguan adalah penentuan berdasarkan pengukuran sinyal frekuensi sistem (60 Hz). Metode ini menggunakan informasi dari saluran transmisi yang memiliki ketersediaan *protective relaying purposes* (misalnya tegangan dan arus saluran). Pada umumnya, teknik ini menganalisa karakteristik impedansi saluran untuk menentukan lokasi gangguan.

Pada mulanya, metode ini berdasarkan atas metode reaktansi (*reactance methods*) dimana lokasi gangguan ditentukan oleh perhitungan antara reaktansi saluran yang terkena gangguan pada akhir sumber gangguan dengan reaktansi saluran yang tidak terkena gangguan. Algoritma yang lebih kompleks adalah menggunakan tahap

kondisi sebelum dan sesudah gangguan (*pre- and post-fault conditions*) untuk mengurangi efek dari sumber-sumber, kecuali sumber nyata pada gangguan dan beban-beban.

Perkembangan alat perekam gangguan digital dan relai proteksi digital telah memungkinkan metode ini bisa diimplementasikan dengan lebih baik dan didasari oleh perhitungan dengan algoritma yang lebih kompleks. Kebanyakan dari metode ini melibatkan penyelesaian bersama dari persamaan non-linier yang diimplementasikan dengan menggunakan teknik iterasi.

Sejumlah pabrikan *protective relaying* telah menyertakan fungsi penentuan lokasi gangguan sebagai bagian dari relai proteksi mereka. Sebuah perusahaan di Amerika Serikat telah meluaskan penggunaan alat ini untuk tegangan 230 kV ke bawah. Pengalaman dengan relai penentuan lokasi gangguan ini telah menunjukkan sebuah hasil yang sangat baik, tapi tidak jarang hasil yang buruk terjadi.

Pada sistem 500 kV, akurasi dalam menentukan lokasi gangguan harus lebih baik. Penggunaan kompensasi seri (*serial compensation*) menghalangi penggunaan relai untuk lokasi gangguan. Pada saluran transmisi panjang, kompensasi reaktif dalam bentuk kapasitansi seri, disisipkan pada titik tengah saluran untuk mengkompensasi induktansi saluran dan meningkatkan kapasitas bawaan beban pada saluran.

Sebuah gangguan pada saluran yang terkompensasi dapat menghasilkan frekuensi transien yang nilainya di bawah frekuensi

sistem tenaga. Frekuensi tersebut merupakan hasil resonansi alami dari induktansi dan kapasitansi seri sistem. Frekuensi dari osilasi ini, sangat bergantung pada impedansi sumber dan nilainya dapat mendekati nilai frekuensi sistem tenaga. Frekuensi transien ini dan menghasilkan keluaran (*output*) palsu, sehingga menyebabkan ketidakakuratan hasil penentuan lokasi gangguan.

3. *Travelling Wave Fault Location*

Metode ini memanfaatkan sinyal transien yang dibangkitkan oleh gangguan. Ketika gangguan pada saluran terjadi, seperti terbakarnya isolator atau kabel putus, tegangan berubah secara kasar pada titik gangguan. Sehingga membangkitkan sebuah impuls elektromagnetik berfrekuensi tinggi disebut gelombang berjalan, merambat sepanjang saluran dalam dua arah berlawanan dari titik gangguan dengan kecepatan mendekati kecepatan cahaya.

Lokasi gangguan ditentukan oleh ketelitian pengamatan waktu kedatangan gelombang berjalan pada tiap ujung saluran dan perbandingan selisih waktu total rambat sepanjang saluran. Metode *Impedance-Based Fault Location*, tidak dipengaruhi oleh kondisi beban, resistansi *Ground* yang tinggi dan *series capacitor banks*. Teknik ini mengandalkan ketepatan penggunaan pencacah waktu serentak (*synchronized clock*) pada terminal saluran (*substation*) yang dapat mencatat waktu kedatangan gelombang berjalan dengan teliti.

Beberapa negara maju telah mencoba metode ini dengan menggunakan gelombang dengan kecepatan rambat mendekati 300 meter per mikrosekond. Hal ini menyebabkan waktu sampling pencatatan waktu harus minimal satu mikrosekond. Ketepatan *synchronized clock* adalah elemen penting pada implementasi teknik ini. Tingkat kebutuhan dari pencacah waktu akurat ini telah tersedia dalam harga yang tidak terlalu mahal dengan pengenalan *Global Positioning System* (GPS).

G. Transformasi *Wavelet*

Transformasi *wavelet* telah diperkenalkan baru-baru ini dalam matematika, walaupun gagasan penting yang mendorong ke arah pengembangan sudah ada untuk periode waktu yang lama. Bagaimanapun, transformasi *wavelet* merupakan suatu transformasi linear yang hampir mirip dengan transformasi Fourier, dengan satu perbedaan penting, yakni transformasi *wavelet* membolehkan penempatan waktu dalam komponen-komponen frekuensi yang berbeda dari sinyal yang diberikan. Transformasi Fourier berjendela (*windowed Fourier transform*) juga secara parsial mencapai tujuan seperti ini, tapi dengan sebuah keterbatasan dalam penggunaan fungsi lebar window yang ditetapkan.

Sebagai hasilnya, baik frekuensi maupun resolusi waktu dari transformasi yang dihasilkan akan menjadi sebuah prioritas yang ditetapkan. Pada kasus transformasi *wavelet*, analisa fungsi-fungsi, yang disebut *wavelet*, akan menyesuaikan lebar waktunya (*time-width*) terhadap

frekuensinya. Sehingga, *wavelet* dengan frekuensi yang lebih tinggi akan menjadi sangat sempit dan *wavelet* dengan frekuensi yang lebih rendah akan menjadi lebih luas.

Sampai sekarang transformasi Fourier masih menjadi transformasi yang paling populer di area pemrosesan sinyal digital (PSD). Transformasi Fourier memberikan informasi frekuensi dari sebuah sinyal, tapi tidak informasi waktu (tidak diketahui kapan frekuensi itu terjadi). Karena itulah transformasi Fourier hanya cocok untuk sinyal stationari (sinyal yang informasi frekuensinya tidak berubah menurut waktu). Untuk menganalisa sinyal yang frekuensinya bervariasi di dalam waktu, diperlukan suatu transformasi yang dapat memberikan resolusi frekuensi dan waktu disaat yang bersamaan, biasa disebut analisis multi resolusi (AMR).

AMR dirancang untuk memberikan resolusi waktu yang baik dan resolusi frekuensi yang buruk pada frekuensi tinggi suatu sinyal, serta resolusi frekuensi yang baik dan resolusi waktu yang buruk pada frekuensi rendah suatu sinyal. Aturan dari multi resolusi ini sangat berguna untuk menganalisa gangguan transien yang mengandung komponen-komponen frekuensi tinggi yang dilokalisasi pada sinyal-sinyal frekuensi daya. Transformasi *wavelet* dibagi menjadi dua jenis, yaitu transformasi *wavelet* kontinu dan transformasi *wavelet* diskrit yang akan dijelaskan berikut ini.

Dengan memberikan fungsi suatu gelombang $f(t)$, transformasi *wavelet* kontinu (continuous *wavelet* transform/CWT) dapat dihitung sebagai berikut:

$$\text{CWT}(f, a, b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \Psi\left(\frac{t-b}{a}\right) dt \dots \dots \dots (59)$$

Dimana, a dan b merupakan konstanta skala (pelebaran/dilasi) dan konstanta translasi (pergeseran waktu), $\text{CWT}(f, a, b)$ adalah koefisien transformasi *wavelet* kontinu dan Ψ adalah fungsi *wavelet* yang tidak nyata/real seperti yang diasumsikan pada persamaan diatas untuk tujuan penyederhanaan. Pilihan fungsi atau induk *wavelet* (*mother wavelet*) disesuaikan dengan kebutuhan (*admissibility condition*). Dengan koefisien *wavelet*, sinyal masukan $f(t)$ dapat disusun kembali berdasarkan parameter pergeseran waktu dan pelebaran skala yang tepat.

CWT menghasilkan terlalu banyak koefisien transformasi *wavelet* (WTC). Hal ini menyebabkan data yang dihasilkan menjadi berlebihan (redudansi). Dan masalah redudansi data ini dapat diselesaikan dengan pemakaian transformasi *wavelet* diskrit (*discrete wavelet transform/DWT*). Koefisien transformasi *wavelet* diskrit dari suatu gelombang dapat diperoleh dengan menerapkan DWT yang diberikan melalui persamaan

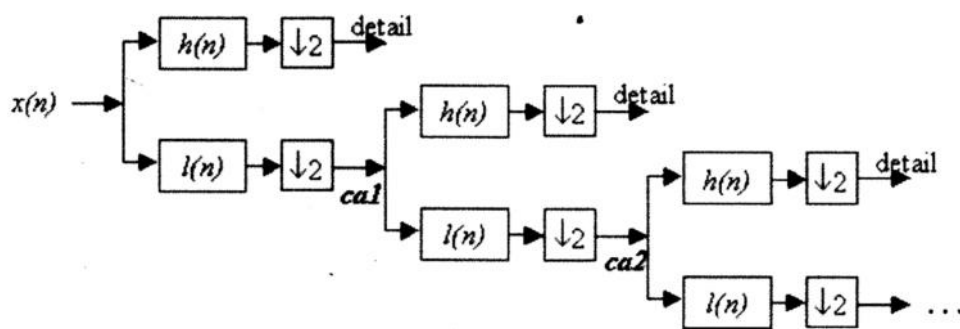
$$\text{DWT}(f, m, n) = \frac{1}{\sqrt{a_0^m}} \sum_k f[k] \Psi * \left(\frac{n - ka_0^m}{a_0^n}\right) \dots \dots \dots (60)$$

Dimana parameter a dan b dalam persamaan digantikan dengan a_0^m dan a_0^n , k dan m adalah variabel bilangan bulat positif. Pada DWT, hanya beberapa sampel WTC saja yang diambil. Artinya, DWT mengurangi kelebihan WTC dari CWT.

Implementasi DWT disusun berdasarkan algoritma dekomposisi Mallat. Sinyal gelombang input dipisahkan (didekomposisikan) menjadi dua

sinyal. Yaitu, bagian frekuensi rendah (*low frequency*) yang disebut Aproksimasi dan bagian frekuensi tinggi (*high frequency*) yang dinamakan Detail. Dalam penggunaan suatu induk *wavelet*, DWT melakukan analisis detail melalui bagian frekuensi tinggi dari induk *wavelet* tersebut. Sedangkan analisis aproksimasi dilakukan melalui bagian frekuensi rendah dari induk *wavelet*.

Gambar 2-11 menunjukkan diagram dekomposisi (*decomposition diagram*) dari dekomposisi DWT yang berdasarkan algoritma Mallat. Sinyal input dibagi ke dalam dua sub-sinyal dengan bagian frekuensi rendah $l(n)$ dan frekuensi tinggi $h(n)$. Sub-sinyal bagian frekuensi rendah dibagi lagi menjadi dua sub-sinyal dengan frekuensi yang berbeda. Proses ini terjadi berulang-ulang sesuai dengan jumlah level transformasi *wavelet* yang digunakan. Berdasarkan struktur pohon tersebut, ketika dua sinyal baru dihasilkan, satu dari sinyal sebelumnya akan dibuang. Oleh karena itu, panjang dari sinyal yang terdekomposisi akan tetap sama dengan panjang sinyal mula-mula sebelum ditransformasi.



Gambar 2.11 Diagram Dekomposisi *Wavelet*

Transformasi *wavelet* mempunyai jenis induk *wavelet* yang bermacam-macam. Transformasi *wavelet* yang sering dipakai adalah transformasi dengan induk *wavelet Daubechies*, penemuan Ingrid *Daubechies* pada tahun 1988. Beliau merupakan salah seorang terkemuka di dunia dalam pengembangan *wavelet*. Beliau menemukan teknik *wavelet* yang disebut sebagai *wavelet orthonormal*. Formulasinya berdasarkan pada penggunaan hubungan berulang (rekursif) untuk menghasilkan sampling diskrit yang terbaik dari sebuah fungsi induk *wavelet* implisit.

Skala resolusi setelah transformasi sebesar dua kalinya skala sebelum proses transformasi dilakukan pada fungsi tersebut. Jika total jumlah data yang digunakan $D=2^N$ dan panjang sinyal L , maka $D/2$ data pada skala $L/2^{(N-1)}$ akan diproses/dihitung. Lalu, berikutnya $(D/2)/2$ data pada skala $L/2^{(N-2)}$, dan seterusnya sampai akhirnya diperoleh 2 data pada skala $L/2$. Teknik ini memudahkan analisis *wavelet* diskrit.

Induk *wavelet Daubechies* biasa ditulis dbN , dimana N menunjukkan orde, dan db menunjukkan nama induk *wavelet Daubechies*. Makin tinggi nilai N , maka sampling diskrit dari sebuah fungsi semakin baik. Atau dengan kata lain, resolusi semakin bagus. *Daubechies* menurunkan banyak famili *wavelet*. Yang pertama kali ditemukan adalah induk *wavelet Haar*. Induk *wavelet Haar* disebut juga *wavelet dbJ*. Hingga saat ini, telah banyak variasi *wavelet Daubechies* yang dikembangkan, salah satunya adalah induk *wavelet Daubechies-4* ($db-4$).

Tabel di bawah ini menunjukkan jenis-jenis induk *wavelet* yang telah dikenal sampai saat ini:

Jenis induk wafelet
<i>Haar wavelet</i>
<i>Daubechieswavelets</i>
<i>Symlets</i>
<i>Coiflets</i>
<i>Biorthogonal wavelets</i>
<i>Reverse biorthogonal wavelets</i>
<i>Meyer wavelet</i>
<i>Discrete approximation of Meyer wavelet</i>
<i>Gaussian wavelets ! Mexican hat wavelet</i>
<i>Morlet wavelet</i>
<i>Complex Gaussian wavelets</i>
<i>Shannon wavelets</i>
<i>Frequency B-Spline wavelets</i>
<i>Complex Moriet wavelets</i>

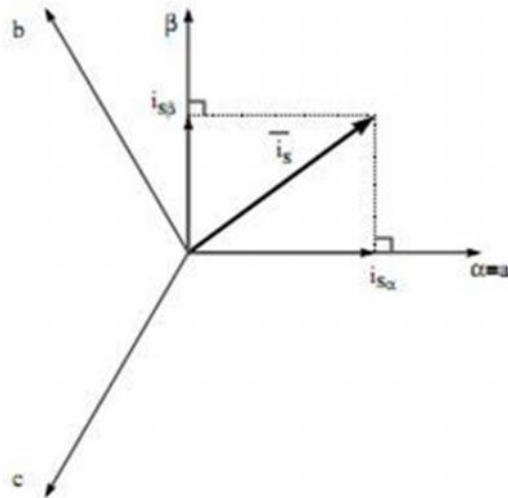
Tabel 2.1 Jenis-jenis Induk *Wavelet*

H. Transformasi Clarke

Transformasi Clarke atau yang juga sering disebut sebagai transformasi $\alpha\beta$ merupakan **transformasi sistem tiga fasa (a,b,c) menjadi sistem dua fasa (α,β) yang stasioner**. Jika dianggap arus a, b, dan c bernilai sesuai dengan fungsi sinusoidal dan memiliki perbedaan fasa sebesar 120° satu sama lainnya, maka arus tiga fasa tersebut dapat diubah ke dalam dua fasa yang diam, yaitu sumbu $\alpha-\beta$, atau sumbu α sebagai nilai

real-nya, dan sumbu β sebagai nilai imajinerinya (kerangka referensi stator).

Transformasi clarke dapat dilihat pada Gambar 2.12. berikut:



Gambar 2.12 Fungsi Komponen Tiga Fasa

I. Prosedur Penentuan Lokasi Gangguan dengan Transformasi

Wavelet

Asumsi berikut ini dibuat untuk pengembangan prosedur penentuan lokasi gangguan.

1. Pengukuran sinyal tegangan dilakukan di sending end.
2. Saluran transmisi tersedia antara terminal (generator).

Prosedur mengandung 3 tahapan. Pada tahap awal, transformasi dasar (modal), yang dinamakan transformasi Clarke, digunakan untuk mengubah sinyal-sinyal tegangan fasa-tanah (sinyal-sinyal transien gangguan yang terukur pada sending end) menjadi sinyal-sinyal tegangan

dasar (modal), matriks transformasi Clarke yang digunakan adalah sebagai berikut:

$$\begin{bmatrix} V1 \\ V2 \\ V3 \end{bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ \sqrt{2} & -\frac{1}{\sqrt{2}} & -\frac{1}{\sqrt{2}} \\ 0 & \frac{3}{2} & -\frac{3}{2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} \dots\dots\dots(61)$$

dimana V_a , V_b dan V_c adalah tegangan fasa-tanah, V_1 adalah tegangan mode ground, dan V_2 , V_3 adalah tegangan mode aerial. Pada tahap kedua, sinyal-sinyal tegangan modal tadi ditransformasikan dengan menggunakan transformasi wavelet diskrit (DWT) sehingga diperoleh koefisien transformasi wavelet. Setelah itu, kuadrat dari koefisien transformasi wavelet (wavelet transform coefficient/WTC²) diperoleh dengan tujuan untuk menentukan waktu saat kuadrat amplitude sinyal mencapai nilai maksimum wavelet Daubechies-4 (induk wavelet yang akan digunakan pada transformasi wavelet dalam simulasi). Kemudian pada tahap akhir, mode ground WTC² diobservasi dengan tujuan untuk mengidentifikasi tipe/jenis gangguan hubung singkat yang terjadi (grounded atau ungrounded/symmetrical fault). Dan mode aerial WTC² diproses berdasarkan pada Diagram Lattice Bewley dari awal terjadinya gelombang gangguan berjalan dengan tujuan untuk mengukur lokasi gangguan gangguan hubung singkat dari sending end.

Berdasarkan pada algoritma penentuan lokasi gangguan menggunakan transformasi wavelet, maka penentuan lokasi gangguan untuk masing-masing jenis gangguan (grounded atau ungrounded/symmetrical fault) di jelaskan di bawah ini

J. Penentuan Lokasi Gangguan Untuk Gangguan Ke Tanah (*Grounded Fault*)

Pantulan-pantulan gelombang akan berlipat ganda dan berlapis-lapis pada titik yang terputus (diskontinuitas) pada saluran. Diagram Bewley dari kondisi grounded fault pada lokasi yang berbeda memberikan tanda-tanda gelombang berjalan kompleks pada lokasi pengukuran. Gelombang berjalan maju dan mundur yang tiba pada titik pengukuran, menghasilkan pola-pola yang berbeda dan bergantung pada lokasi gangguan dalam sistem transmisi.

Pertama, perkiraan daerah gangguan diperoleh dengan cara menghitung selisih waktu kedatangan puncak pertama WTC^2 mode ground dan waktu kedatangan puncak pertama WTC^2 mode aerial. Selisih waktu antara waktu kedatangan puncak pertama WTC^2 mode ground dan waktu kedatangan puncak pertama WTC^2 mode aerial akan bertambah besar nilainya seiring dengan semakin jauh lokasi gangguan dari titik pengukuran (dalam hal ini sending end). Setelah daerah gangguan diidentifikasi (terletak pada Si atau 82), lokasi gangguan dihitung dengan prosedur berikut.

Daerah gangguan dapat diidentifikasi dengan cara menghitung membandingkan selisih waktu kedatangan puncak pertama WTC^2 mode ground dan waktu kedatangan puncak pertama WTC mode aerial dengan t_m (selisih waktu kedatangan puncak pertama WTC^2 mode ground dan waktu kedatangan puncak pertama WTC^2 mode aerial dengan perkiraan

gangguan terjadi di tengah saluran). Jika selisih waktu tersebut bernilai lebih kecil daripada t_m , maka daerah gangguan teridentifikasi terjadi pada daerah S_1 . Untuk mencari letak gangguan dari sending end, maka

$$X = \frac{v \cdot \Delta t}{2} \dots\dots\dots (62)$$

$$\Delta t = t_B - t_A \dots\dots\dots (63)$$

dimana v adalah kecepatan rambat gelombang di mode aerial, t_A adalah waktu kedatangan puncak pertama WTC pada mode aerial yang berhubungan dengan gelombang berjalan mundur, dan t_B adalah waktu kedatangan puncak kedua WTC² pada mode aerial yang berhubungan dengan gelombang berjalan mundur berupa gelombang pantulan dari titik gangguan.

Jika selisih waktu tersebut bernilai lebih besar daripada t_m , maka daerah gangguan teridentifikasi terjadi pada daerah 82 Untuk mencari letak gangguan dari sending end, maka digunakan rumus

$$X = \frac{v \cdot \Delta t}{2} \dots\dots\dots (64)$$

$$\Delta t = t_B - t_A \dots\dots\dots (65)$$

dimana v adalah kecepatan rambat gelombang di mode aerial, t_A adalah waktu kedatangan puncak pertama WTC² pada mode aerial yang berhubungan dengan gelombang berjalan mundur, t_B adalah waktu kedatangan puncak kedua WTC² pada mode aerial yang berhubungan

dengan gelombang berjalan maju berupa gelombang pantulan dari receiving end, dan L adalah panjang total saluran transmisi ($S_1 + S_2$).

K. Penentuan Lokasi Gangguan Untuk Gangguan Tidak Ke Tanah Atau Gangguan Simetrik (*Ungrounded / Symmetrical Fault*)

Ditetapkan bahwa tidak ada pemantulan pada receiving end untuk ungrounded/symmetrical fault. Karena adanya ketidaksesuaian yang signifikan antara pola-pola WTC dan magnitude gangguan yang terjadi, maka lokasi gangguan pada saluran dapat diperoleh melalui perhitungan dengan menggunakan persamaan (62) dan (63)

$$X = \frac{v \Delta t}{2}$$

$$\Delta t = t_B - t_A$$

dimana v adalah kecepatan rambat gelombang di mode aerial, t_A adalah waktu kedatangan puncak pertama WTC² pada mode aerial yang berhubungan dengan gelombang berjalan mundur, dan t_B adalah waktu kedatangan puncak kedua WTC² pada mode aerial yang berhubungan dengan gelombang berjalan mundur berupa gelombang pantulan dari titik gangguan.

BAB III

METODOLOGI PENELITIAN

A. Waktu dan Tempat

1. Waktu

Pembuatan tugas akhir ini dilaksanakan selama 6 bulan, mulai dari bulan Juni 2017 sampai dengan September 2017.

2. Tempat

Penelitian dilaksanakan di PLN Tragi Panakukan Makassar.

B. Metode Penelitian

Metode penelitian ini berisikan langkah-langkah yang ditempuh penulis dalam menyusun tugas akhir ini. Metode penelitian ini disusun untuk memberikan arah dan cara yang jelas bagi penulis sehingga penyusunan tugas akhir ini dapat berjalan dengan lancar.

Adapun langkah-langkah yang ditempuh oleh penulis dalam penyusunan tugas akhir ini adalah sebagai berikut:

Metode Pustaka

Yaitu mengambil bahan-bahan penulisan tugas akhir ini dari referensi-referensi serta literatur-literatur yang berhubungan dengan masalah yang dibahas.

Metode Penelitian

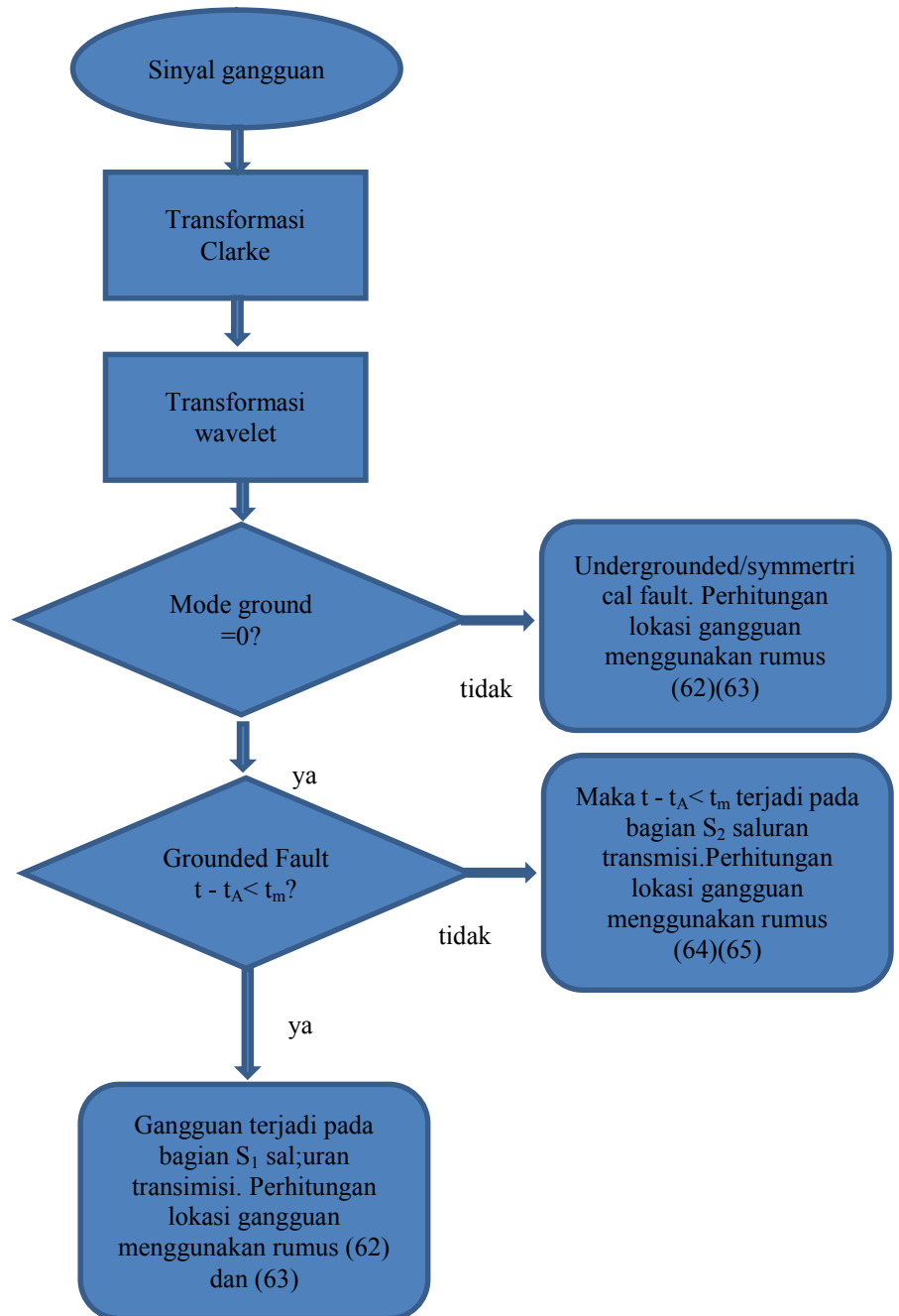
Mengadakan penelitian dan pengambilan data di Makassar, Kemudian mengadakan pembahasan/analisa hasil pengamatan dan menyimpulkan

hasil analisa tersebut.

Metode Diskusi/Wawancara

Yaitu mengadakan diskusi/wawancara dengan seseorang yang lebih mengetahui bahan yang akan kami bahas.

C. Flowchart Algoritma



Gambar 3.1 Flowchart Algoritma Metode Penentuan Lokasi Gangguan Hubung Singkat

D. Algoritma Penentuan Lokasi Gangguan Dengan Menggunakan Transformasi Wavelet

1. Pengukuran sinyal tegangan dilakukan pada sending end.
2. Transformasi modal (Clarke's Transformation) digunakan pada tegangan yang terukur. sinyal-sinyal tegangan dalam fasa-fasa diuraikan menjadi sinyal-sinyal tegangan dasar (modal), yaitu sinyal tegangan mode aerial dan tegangan mode ground.
3. Discrete Wavelet Transform (DWT) . digunakan untuk memperoleh WTC dari tegangan mode aerial dan tegangan mode ground : #
Jika mode ground tidak bernilai nol :
 - a. Dihitung nilai selisih ($t - t_A$) antara waktu kemunculan puncak WTC^2 pertama pada mode ground (t) dengan waktu kemunculan puncak WTC^2 pertama pada mode aerial (t_A).
 - b. Jika $t - t_A < t_m$, maka gangguan terjadi pada bagian saluran transmisi yang dekat dengan sending end (bagian S_1 saluran). Lokasi gangguan pada saluran dapat diperoleh melalui perhitungan dengan menggunakan persamaan (62) dan (63).
 - c. Jika $t - t_A > t_m$, maka gangguan terjadi pada bagian saluran transmisi yang dekat dengan receiving end (bagian S_2 saluran). Lokasi gangguan pada saluran dapat diperoleh melalui perhitungan dengan menggunakan persamaan (64) dan (65). #
Jika mode ground bernilai nol maka :

Lokasi gangguan pada saluran dapat diperoleh melalui perhitungan dengan menggunakan persamaan (62) dan (63).

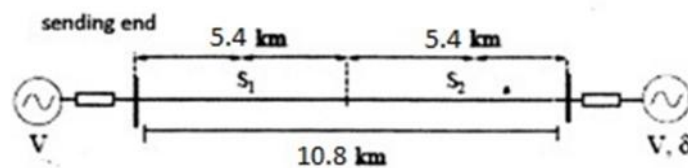
BAB IV

HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN

A. Pemodelan Rangkaian Dengan ATP dan MATLAB/Simulink

Analysis Transient Program (ATP) digunakan untuk mengukur sinyal-sinyal transien dalam sistem tenaga. Gambar 4.1 menunjukkan model sistem yang digunakan dalam simulasi. Sebuah model ,bertipe saluran Bergeron, digunakan untuk model saluran transmisi tersebut. Proses Monitoring dilakukan pada *sending end*.

Model sistem, dengan panjang saluran transmisi 10,8 km, yang digunakan dalam simulasi ini adalah sebagai berikut:



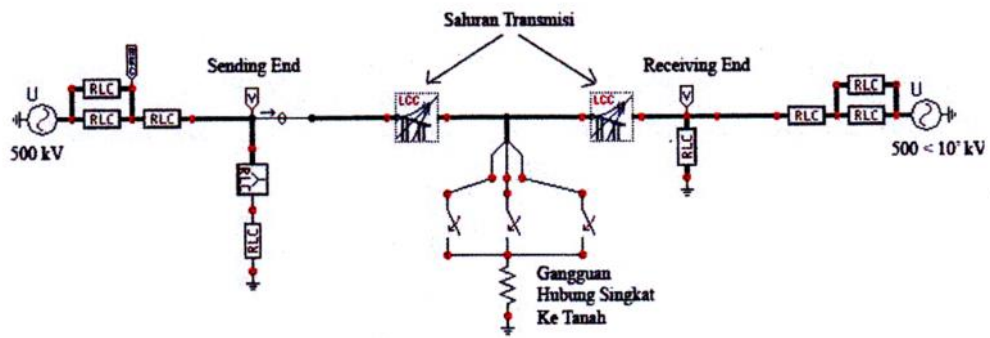
Gambar 4.1 Model Sistem yang Digunakan Pada Simulasi

dimana

S_1 =bagian pertama saluran transmisi dengan panjang sebesar 5,4 km (bagiansaluran yangdekat dengan sending end).

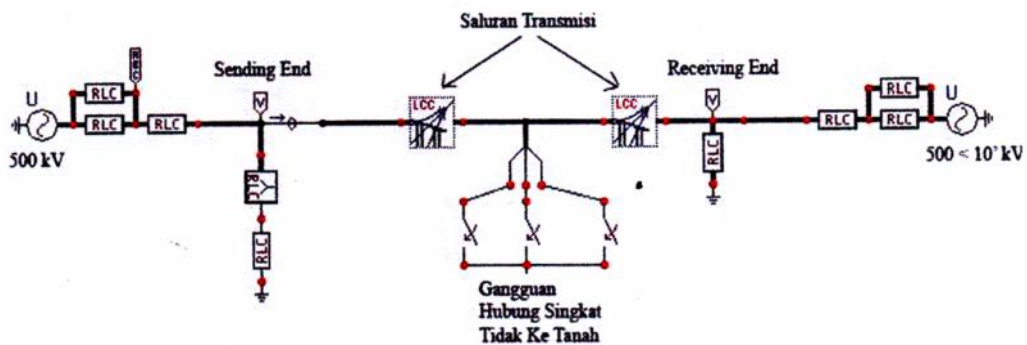
S_2 =bagian kedua saluran transmisi dengan panjang sebesar 5,4 km (bagiansaluran yang dekat dengan receiving end).

Implementasi rangkaian tersebut dalam ATP adalah :



Gambar 4.2 Implementasi ATP Untuk Simulasi Gangguan Hubung Singkat ke Tanah

Untuk gangguan hubung-singkat ke tanah (*Grounded fault*). Sedangkan



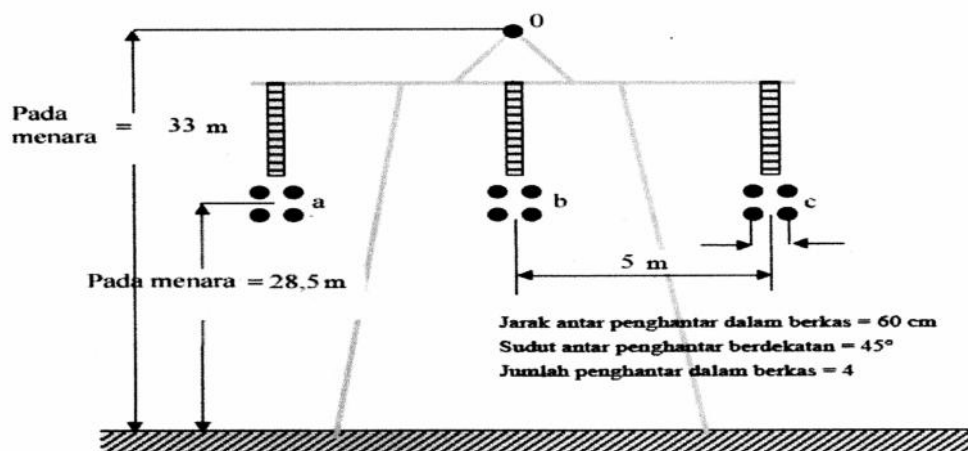
Gambar 4.3 Implementasi ATF Untuk Simulasi Gangguan Hubung Singkat Tidak ke Tanah

Line Transmisi Sungguminasa - Tello

NO	NO TOWER	TYPE TOWER	NO TOWER	TYPE TOWER	KETERANGAN
1	1	Ddr	20	Aa	Panjang jaringan sekitar 10,8 kms Jarak antar tiang tower kurang lebih 300 Meter Berdasarkan standar perusahaan listrik negara (SPLN) No.13-1997 tentang kriteria dasar perencanaan saluran udara tegangan tinggi
2	2	Cc	21	Aa	
3	3	Bb	22	Cc	
4	4	Cc	23	Aa	
5	5	Cc	24	Bb	
6	6	Aa	25	Bb	
7	7	Bb	26	Cc	
8	8	Bb	27	Bb	
9	9	Aa	28	Aa	
10	10	Cc	29	Bb	
11	11	Aa	30	Bb	
12	12	Bb	31	Aa	
13	13	Bb	32	Aa	
14	14	Cc	33	Aa	
15	15	Bb	34	Bb	
16	16	Aa	35	Aa	
17	17	Bb	36	Bb	
18	18	Bb	37	Bb	
19	19	Aa			

Tabel 4.1 No. Tower sungguminasa – tello

Konfigurasi menara transmisi saluran udara pada saluran transmisi adalah sebagai berikut:

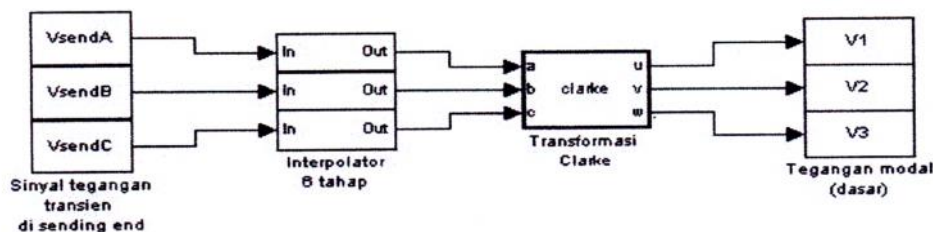


Gambar 4.4 Konfigurasi Menara Transmisi

Dengan a,b,c adalah saluran fasa (kabel-kabel fasa), dan 0 adalah saluran pentanahan (kawat-kawat tanah).

Frekuensi sampling yang diambil adalah sebesar 1 MHz, 5MHz, dan 50 MHz. Jarak lokasi gangguan yang diukur dari sending end adalah 1 km, 50 km, 100 km, 150 km, dan 199 km. Bahan konduktor yang digunakan pada saluran udara adalah jenis X, jenis ACSR Rook, dan jenis ACSR Partridge. Sudut fasa gangguan diatur (dengan mengubah-ubah sudut fasa generator) pada sudut 0° , 45° , dan 90° . Simulasi dilakukan pada berbagai jenis gangguan (*Grounded dan unGrounded/symmetrical fault*). Waktu terjadinya gangguan diatur pada 0,02 sekon dari waktu mulai simulasi.

Sinyal-sinyal tegangan transien gangguan masing-masing fasa yang didapat dari ATP, ditransformasikan dengan transformasi Clarke ke komponen tegangan dasar (modal) dengan menggunakan simulasi pada MATLAB/Simulink, Adapun pemodelan transformasi Clarke sebagai berikut:



Gambar 4.5 Implementasi MATLAB/Simulink Untuk Transformasi Clarke

```
function [u,v,w] = clarke(a,b,c)
% a = VsendA = Sinyal transien V fasa a di sending end setelah terjadi gangguan.
% b = VsendB = Sinyal transien V fasa b di sending end setelah terjadi gangguan.
% c = VsendC = Sinyal transien V fasa c di sending end setelah terjadi gangguan.
% u = V1 = Tegangan modal ground (ground mode).
% v = V2 = Tegangan modal udara (aerial mode).
% w = V3 = Tegangan modal udara (aerial mode).

u = 0.5774*a + 0.5774*b + 0.5774*c;
v = 0.8165*a - 0.4082*b - 0.4082*c;
w = 0.7071*b - 0.7071*c;
```

Blockset Transformasi Clarke mengandung fungsi (source code)

Sinyal-sinyal modal diurai dengan menggunakan wavelet Daubechies-4 (db4) dimana angka 4 menunjukkan jumlah tahap koefisien wavelet (WTC). Untuk meminimalisasi efek gangguan, maka WTC dikuadratkan (WTC²) pada masing-masing mode. Source code MATLAB untuk tahap ini adalah:

```
[ca1,cd1] = dwt(u,'db4');
[ca2,cd2] = dwt(v,'db4');

wtc1=cd1.^2;
wtc2=cd2.^2;
```

dimana cd1 menunjukkan koefisien transformasi wavelet (WTC) pada mode 1 (mode *Ground*), cd2 menunjukkan detail koefisien transformasi wavelet (WTC) pada mode 2 (mode *aerial*), wtc1 adalah WTC² pada mode 1 (mode *Ground*), wtc2 adalah WTC² pada mode 2 (mode *aerial*), ca1 dan ca2 adalah aproksimasi koefisien transformasi wavelet.

Aproksimasi dalam simulasi ini dapat diabaikan penggunaannya, karena sinyal transien gangguan memiliki frekuensi tinggi yang akan dianalisis oleh bagian frekuensi tinggi dari induk wavelet. Analisis frekuensi rendah tidak diperlukan.

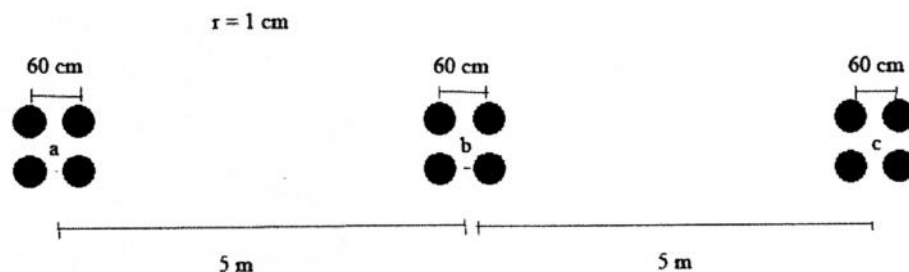
Simulasi penentuan lokasi gangguan hubung singkat yang dilakukan pada Tugas Akhir ini berdasarkan pada parameter-parameter berikut:

1. Frekuensi sampling 5 MHz, bahan penghantar saluran udara adalah bahan X, dan sudut fasa gangguan 0°.

2. Frekuensi sampling 50 MHz, bahan penghantar saluran udara adalah bahan X, dan sudut fasa gangguan 0° .
3. Frekuensi sampling 1 MHz, bahan penghantar saluran udara adalah bahan X, dan sudut fasa gangguan 0° .
4. Frekuensi sampling 5 MHz, bahan penghantar saluran udara adalah bahan ACSR jenis Rook, dan sudut fasa gangguan 0° .
5. Frekuensi sampling 5 MHz, bahan penghantar saluran udara adalah bahan ACSR jenis Partridge, dan sudut fasa gangguan 0° .
6. Frekuensi sampling 5 MHz, bahan penghantar saluran udara adalah bahan X, dan sudut fasa gangguan 45° .
7. Frekuensi sampling 5 MHz, bahan penghantar saluran udara adalah bahan X, dan sudut fasa gangguan 90° .

B. Simulasi Dengan Frekuensi Sampling 50 MHz, Bahan Penghantar X, Dan Sudut Fasa Gangguan 0°

Karakteristik saluran udara dengan bahan penghantar X adalah



Gambar 4.6 Karakteristik Saluran dengan Bahan Penghantar X

Perhitungan induktansi saluran adalah sebagai berikut :

$$L = 2 \times 10^{-7} \ln \frac{D_{eq}}{D_s^b} \quad \text{H/m}$$

$$D_{eq} = \sqrt[3]{D_{ab} D_{bc} D_{sc}} = \sqrt[3]{500 \times 500 \times 1000} = 629,9605 \text{ cm}$$

$$D_s^b = 1,09 \sqrt[4]{D_s^2 d^3} = 1,09 \sqrt[4]{1 \times e^{-1/4} \times 60^3} = 22,0851 \text{ cm}$$

$$L = 2 \times 10^{-7} \ln \frac{D_{eq}}{D_s^b} = 8,0715 \cdot 10^{-7} \text{ H/m/fasa}$$

Perhitungan kapasitansi saluran adalah sebagai berikut:

$$C = \frac{2\pi\epsilon}{\ln(D_{eq}/D_s^b)} \quad \text{F/m ke netral}$$

$$D_{eq} = \sqrt[3]{D_{ab} D_{bc} D_{sc}} = \sqrt[3]{500 \times 500 \times 1000} = 629,9605 \text{ cm}$$

$$D_s^b = 1,09 \sqrt[4]{1 \times 60^3} = 23,4985 \text{ cm}$$

$$C = \frac{2\pi \times 10^{-9}}{\ln \left(\frac{629,9605}{23,4985} \right)} = 1,6908 \cdot 10^{-11} \text{ F/m ke netral}$$

Kecepatan rambat gelombang pada saluran udara tersebut adalah:

$$V_1 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$$

$$= 297074,826 \text{ km/s}$$

Kecepatan rambat gelombang pada kawat tanah v₀ dapat dihitung :

$$V_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$$

dimana

S = jarak gangguan pada simulasi (km)

t = waktu kedatangan puncak pertama WTC² pada mode *Ground*(ms) dan

nilai 20 menunjukkan waktu terjadinya gangguan pada saluran yaitu pada

saat 20 ms dari waktu start simulasi.

Dari hasil simulasi, diperoleh 3 data t untuk 3 jarak gangguan yang berbeda (1,50,100,150,199 km) dari contoh kasus gangguan satu fasa ke tanah (A-G) pada 4.2.1-4.2.5 untuk menghitung v_0 sebagai berikut:

Jarak gangguafi \ (km)	t (ms)	V_0 (km/s)
3	20,0161	234101,029
5	20,0369	233445,231
7	20,0548	232793,459

Tabel 4.2 Tabel Perhitungan V_0

3 data v_0 di atas dirata-ratakan sehingga didapatkan v_0 rata-rata sebesar 233446,573 km/s. V_0 rata-rata ini akan dipakai dalam perhitungan t_m berikut. Diasumsikan bahwa gangguan terjadi pada pertengahan saluran, yaitu pada jarak 100 km dari *sending end*, Diberikan persamaan:

$$t - t_A = x_f \left(\frac{1}{V_0} - \frac{1}{V_1} \right)$$

dimana,

t = waktu kemunculan puncak WTC^2 pertama pada mode *Ground*

t_A = waktu kemunculan puncak WTC^2 pertama pada mode aerial

X_f = posisi lokasi gangguan

V_0 = kecepatan rambat gelombang pada mode *Ground* = 233446,573 km/s

V_1 = kecepatan rambat gelombang pada mode aerial = 297074,826 km/s

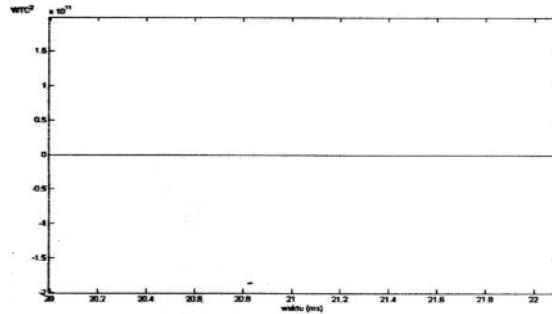
Untuk $X_f = 100$ km, maka

$$(t - t_A)_{100\text{km}} = t_m = 100 \left(\frac{1}{V_0} - \frac{1}{V_1} \right)$$

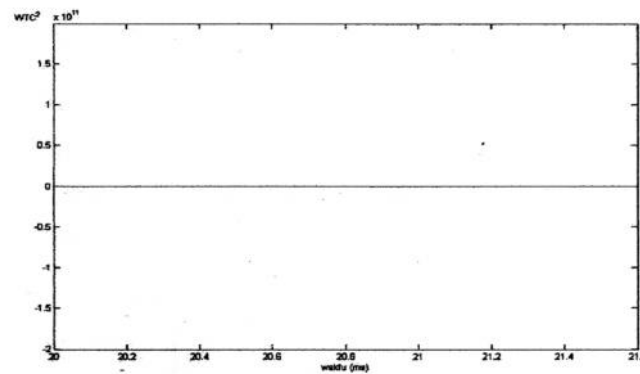
$$= 0,091748 \cdot 10^{-3} \text{ s}$$

$$= 0,091748 \text{ ms}$$

Sebagai parameter, hasil simulasi untuk kondisi saluran transmisi normal (tanpa gangguan) adalah :



Gambar 4.7 Grafik WTC¹ pada Mode *Ground* Saat Kondisi Tanpa Gangguan

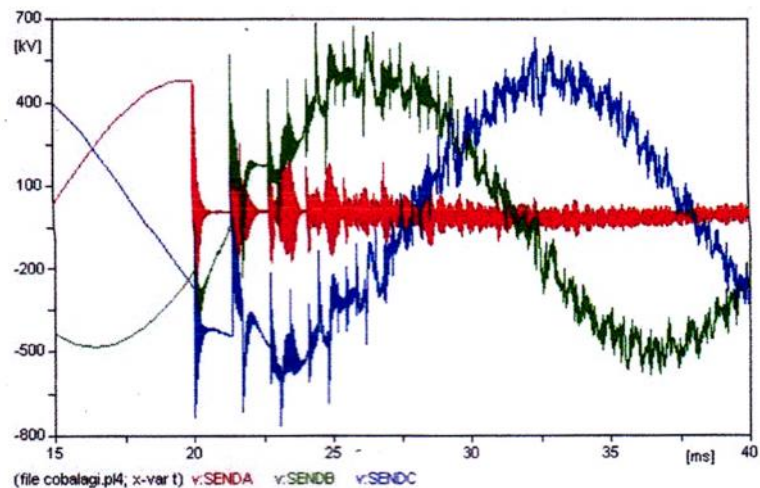


Gambar 4.8 Grafik WTC² pada Mode *Acrid*/ Saat Kondisi Tanpa Gangguan

Pada saat kondisi normal, maka Grafik WTC² terhadap waktu, pada mode 1 (*mode Ground*) dan mode 2 (*mode aerial*) menunjukkan nilai nol. Berikut ini akan ditunjukkan hasil simulasi untuk berbagai jenis gangguan dengan variasi jarak gangguan dari *sending end*.

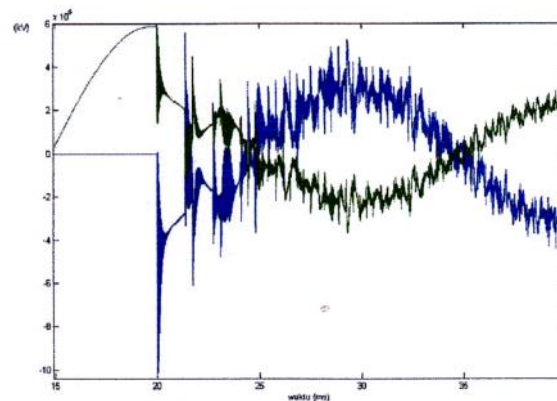
1. Gangguan A-G (satu fasa ke *Ground*) sejauh 1 km dari *sending end*

Sinyal transien gangguan (sinyal tegangan fasa-tanah) yang terukur pada *sending end* adalah;



Gambar 4.9 Grafik Sinyal-Sinyal Fasa-Tanah Untuk Gangguan A-G Sejauh 1 km Dari *Sending End*

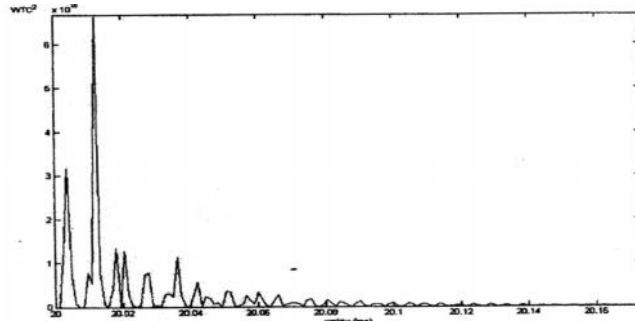
Grafik berwarna merah menunjukkan sinyal tegangan fasa A, grafik berwarna hijau menunjukkan sinyal tegangan fasa B, dan grafik berwarna biru menunjukkan sinyal tegangan fasa C. Dengan menerapkan Transformasi Clarke pada sinyal fasa-tanah tersebut, maka akan dihasilkan sinyal-sinyal tegangan modal sebagai berikut:



Gambar 4.10 Grafik Sinyal-Sinyal Modal Untuk Gangguan A-G Sejauh 1 km Dari *Sending End*

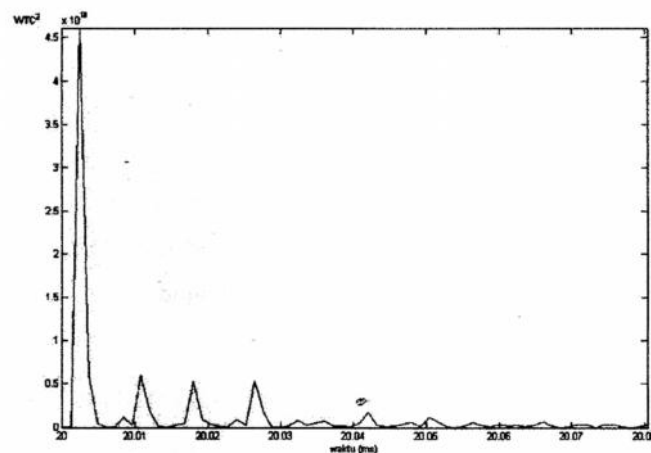
Grafik berwarna biru menunjukkan sinyal tegangan mode *Ground*, sedangkan grafik berwarna hijau menunjukkan sinyal tegangan mode aerial. Sinyal tegangan modal ditransformasi wavelet-kan,

sehingga menghasilkan WTC. Grafik WTC dikuadratkan, maka diperoleh grafik WTC^2 untuk masing-masing mode. .



Gambar 4.11 Grafik WTC^2 pada Mode *Ground* Untuk Gangguan A-G Sejalan 1 km Dari *Sending End*

Grafik WTC^2 terhadap waktu, pada mode 1 (mode *Ground*) tidak menunjukkan nilai nol. Artinya, gangguan yang terjadi bertipe *Grounded fault*. Puncak pertama terjadi pada $t = 20,0036$ ms.



Gambar 4.12 Grafik WTC^2 pada Mode *Aerial* Untuk Gangguan A-G Sejalan 1 km Dari *Sending End*

Berdasarkan grafik WTC terhadap waktu pada mode 2 (mode *aerial*), puncak WTC^2 yang pertama terjadi pada $t_A = 20,0024$ ms. $t - t_A = 0,0012$ ms. Maka $t - t_A < t_m$. Oleh karena itu, dapat disimpulkan bahwa gangguan terjadi pada bagian Si saluran transmisi. Puncak kedua WTC^2

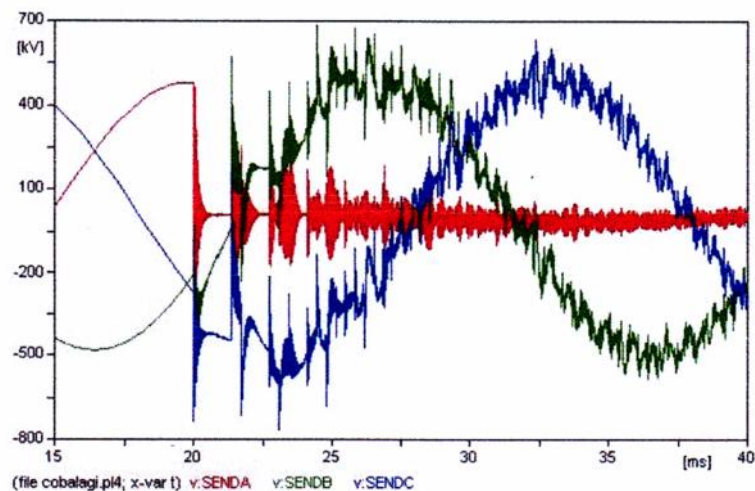
pada mode 2 terjadi pada $t_B = 20,008399$ ms. Sehingga $A = t_B - t_A = 0.005999$ ms, dan dengan menggunakan persamaan (62):

$$X = \frac{297074,826 \times 0,005999 \times 10^{-3}}{2} = 0,891076 \text{ km}$$

Pada single line diagram indikasi gangguan antara Tower No. 4 dan No.5 dijarak 1 kms (Lampiran Gambar).

2. Gangguan A-G (satu fasa ke *Ground*) sejauh 3 km dari *sending end*

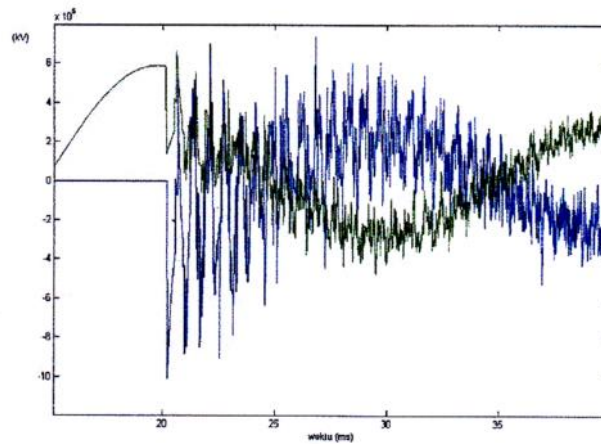
Sinyal transien gangguan (sinyal tegangan fasa-tanah) yang terukur pada *sending end* adalah :



Gambar 4.13 Grafik Sinyal-Sinyal Fasa-Tanah Untuk Gangguan A-G Sejauh 3 km Dari *Sending End*

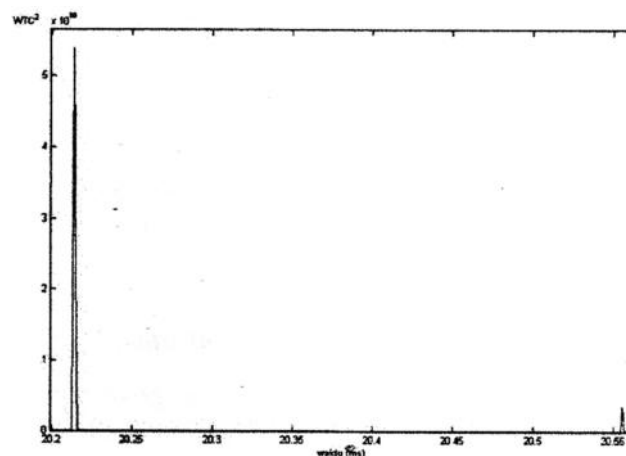
Grafik berwarna merah menunjukkan sinyal tegangan fasa A, grafik berwarna hijau menunjukkan sinyal tegangan fasa B, dan grafik berwarna biru menunjukkan sinyal tegangan fasa C. Dengan

menerapkan Transformasi Clarke pada sinyal-sinyal fasa-tanah tersebut, maka akan dihasilkan sinyal tegangan modal sebagai berikut:



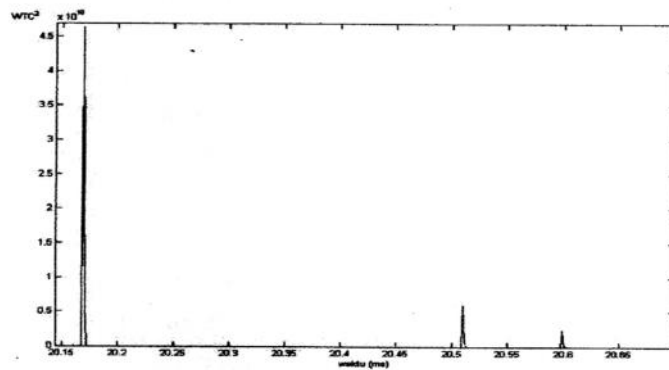
Gambar 4.14 Grafik Sinyal-Sinyal Modal Untuk Gangguan A-G Sejauh 3 km Dari *Sending End*

Grafik berwarna biru menunjukkan sinyal tegangan mode *Ground*, sedangkan grafik berwarna hijau menunjukkan sinyal tegangan mode aerial. Sinyal-sinyal tegangan modal ditransformasi wavelet-kan, sehingga menghasilkan WTC. Grafik WTC dikuadratkan, maka di peroleh grafik WTC^2 untuk masing-masing mode.



Gambar 4.15 Grafik WTC^3 pada Mode *Ground* Untuk Gangguan A-G Sejauh 3 km Dari *Sending End*

Grafik WTC² terhadap waktu, pada mode \ (mode *Ground*) tidak menunjukkan nilai nol. Artinya, gangguan yang terjadi bertipe *Grounded* fault. Puncak pertama terjadi pada $t = 20,0161$ ms.



Gambar 4.16 Grafik WTC² pada Mode Aerial Untuk Gangguan A-G Sejauh 3 km Dari *Sending End*

Berdasarkan grafik WTC terhadap waktu pada mode 2 (mode aerial), puncak WTC² yang pertama terjadi pada $t_A = 20,0137$ ms. $t - t_A = 0,0024$ ms. Maka $t - t_A < t_m$. Oleh karena itu, dapat disimpulkan bahwa gangguan terjadi pada bagian Si saluran transmisi.

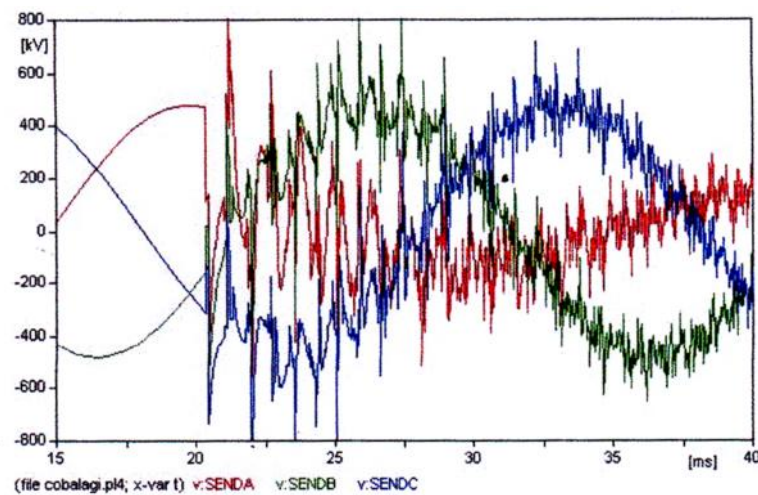
Puncak kedua WTC² pada mode 2 terjadi pada $t_B = 20,033824$ ms. Sehingga $\Delta t = t_B - t_A = 0,020124$ ms, dan dengan menggunakan persamaan (62):

$$X = \frac{297074,826 \times 0,020124 \times 10^{-3}}{2} = 2,98917 \text{ km}$$

Pada single line diagram indikasi gangguan di Tower No. 11 dijarak 3 kms (Lampiran Gambar).

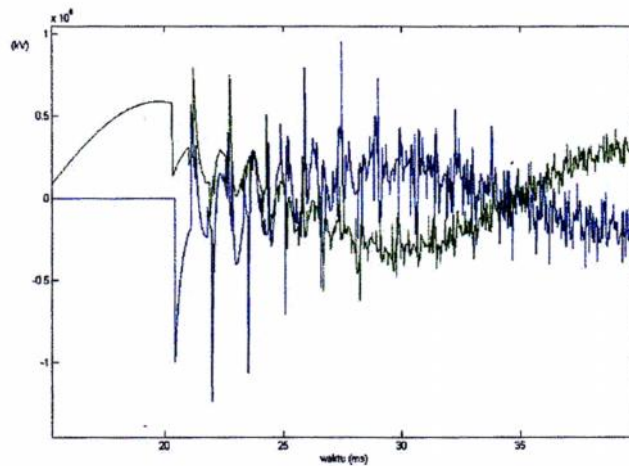
3. Gangguan A-G (satu fasa ke *Ground*) sejauh 5 km dari *sending end*

Sinyal transien gangguan (sinyal tegangan fasa-tanah) yang terukur pada *sending end* adalah:



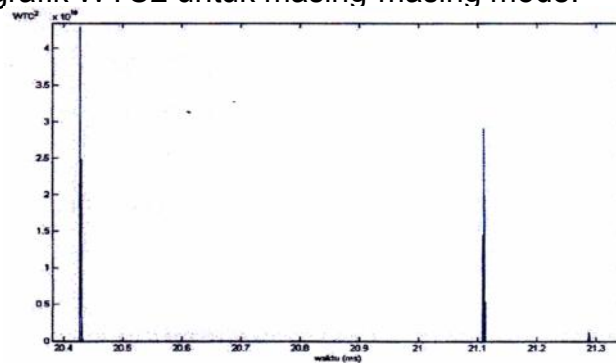
Gambar 4.17 Grafik Sinyal-Sinyal Fasa-Tanah Untuk Gangguan A-G Sejang 5 km Dari *Sending End*

Grafik berwarna merah menunjukkan sinyal tegangan fasa A, grafik berwarna hijau menunjukkan sinyal tegangan fasa B, dan grafik berwarna biru menunjukkan sinyal tegangan fasa C. Dengan menerapkan Transformasi Clarke pada sinyal-sinyal fasa-tanah tersebut, maka akan dihasilkan sinyal-sinyal tegangan modal sebagai berikut



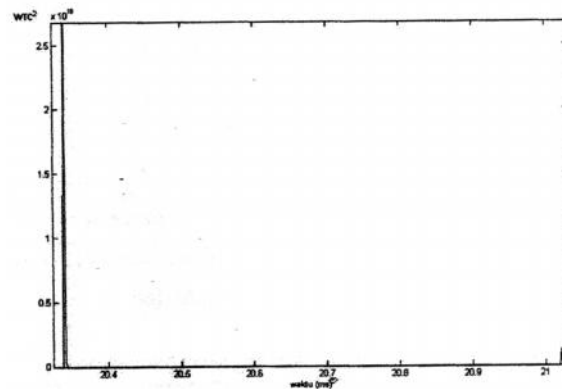
Gambar 4.18 Grafik Sinyal-Sinyal Modal Untuk Gangguan A-G Sejauh 5 km Dari *Sending End*

Grafik berwarna biru menunjukkan sinyal tegangan mode *Ground*, sedangkan grafik berwarna hijau menunjukkan sinyal tegangan mode aerial. Sinyal-sinyal tegangan modal ditransformasi wavelet-kan, sehingga menghasilkan WTC. Grafik WTC dikuadratkan, maka diperoleh grafik WTC² untuk masing-masing mode.



Gambar 4.19 Grafik WTC² pada Mode *Ground* Untuk Gangguan A-G Sejauh 5 km Dari *Sending End*

Grafik WTC² terhadap waktu, pada mode 1 (mode *Ground*) tidak menunjukkan nilai nol. Artinya, gangguan yang terjadi bertipe *Grounded* fault. Puncak pertama terjadi pada $t = 20,0369$ ms.



Gambar 4.20 Grafik WTC^2 pada Mode Aerial Untuk Gangguan A-G Sejauh 5 km Dari *Sending End*

Berdasarkan grafik WTC terhadap waktu pada mode 2 (mode aerial), puncak WTC^2 yang pertama terjadi pada $t_A = 20,0318$ ms. $t - t_A = 0,0051$ ms. Maka $t - t_A < t_m$. Oleh karena itu, dapat disimpulkan bahwa gangguan terjadi pada bagian Si saluran transmisi.

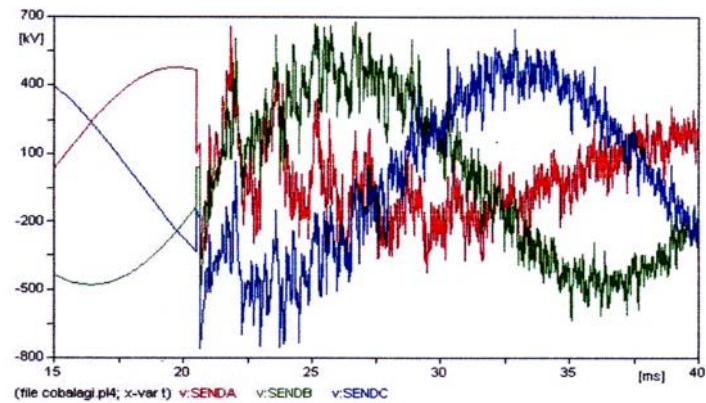
Puncak kedua WTC^2 pada mode 2 terjadi pada $t_B = 20,065401$ ms. Sehingga $\Delta t = t_B - t_A = 0,033601$ ms, dan dengan menggunakan persamaan (52):

$$X = \frac{297074.826 \times 0,033601 \times 10^{-3}}{2} = 4,991005 \text{ km}$$

Pada single line diagram indikasi gangguan antara Tower No.17 dan No.18 dijarak 5 kms (Lampiran Gambar).

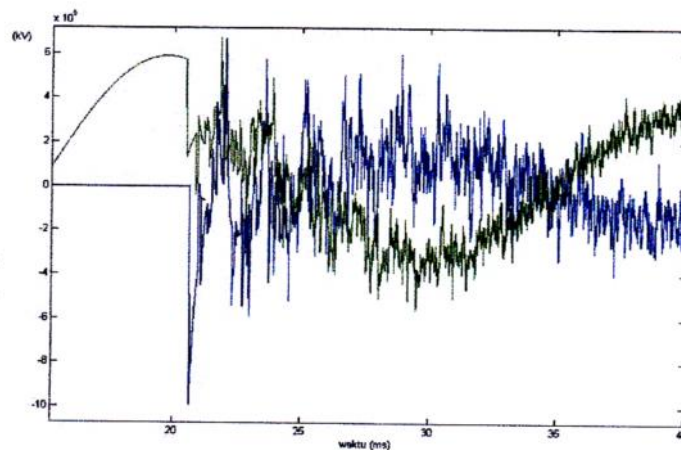
4. Gangguan A-G (satu fasa ke *Ground*) sejauh 7 km dari *sending end*

Sinyal transien gangguan (sinyal tegangan fasa-tanah) yang terukur pada *sending end* adalah:



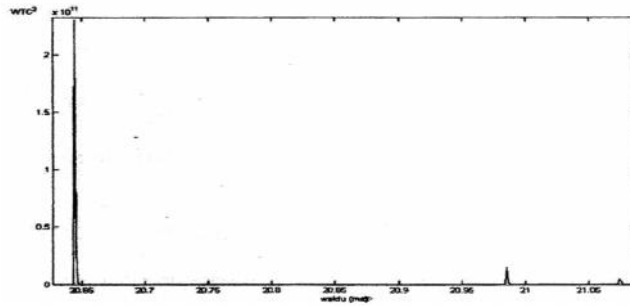
Gambar 4.21 Grafik Sinyal-Sinyal Fasa-Tanah Untuk Gangguan A-G Sejauh 7 km Dari *Sending End*

Grafik berwarna merah menunjukkan sinyal tegangan fasa A, grafik berwarna hijau menunjukkan sinyal tegangan fasa B, dan grafik berwarna biru menunjukkan sinyal tegangan fasa C. Dengan menerapkan Transformasi Clarke pada sinyal fasa-tanah tersebut, maka akan dihasilkan sinyal-sinyal tegangan modal sebagai berikut:



Gambar 4.22 Grafik Sinyal-Sinyal Modal Untuk Gangguan A-G Sejauh 7 km Dari *Sending End*

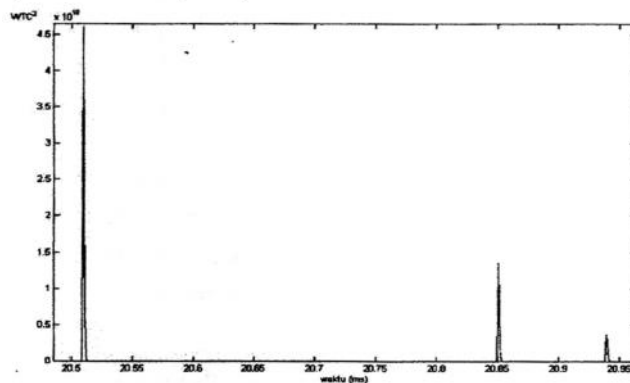
Grafik berwarna biru menunjukkan sinyal tegangan mode *Ground*, sedangkan grafik berwarna hijau menunjukkan sinyal tegangan mode aerial. Sinyal-sinyal tegangan modal ditransformasi wavelet-kan,



Gambar 4.23 Grafik WTC^2 pada Mode *Ground* Untuk Gangguan A-G Sejauh 7 km Dari *Sending End*

sehingga menghasilkan WTC. Grafik WTC dikuadratkan, maka diperoleh grafik WTC^2 untuk masing-masing mode.

Grafik WTC^2 terhadap waktu, pada mode1(mode ground) tidak menunjukkan nilai nol. Artinya, gangguan yang terjadi bertipe *Grounded* fault. Puncak pertama terjadi pada $t = 20,0548$ ms.



Gambar 4.24 Grafik WTC^2 pada Mode Aerial Untuk Gangguan A-G Sejauh 7 km Dari *Sending End*

Berdasarkan grafik WTC terhadap waktu pada mode 2 (mode aerial), puncak WTC^2 yang pertama terjadi pada $t_A = 20,0464$ ms. $t - t_A = 0,0084$ ms. Maka $t - t_A > t_m$. Oleh karena itu, dapat disimpulkan bahwa gangguan terjadi pada bagian S2 saluran transmisi.

Puncak kedua WTC² pada mode 2 terjadi pada $t_B - 20,093195$ ms. Sehingga $\Delta t = t_B - t_A - 0,046995$ ms, dan dengan menggunakan persamaan (62):

$$X = \frac{297074,826 \times 0,046995 \times 10^{-3}}{2} = 6,980515 \text{ km}$$

Pada single line diagram indikasi gangguan antara Tower No.24 dan No.25 dijarak 7 kms (Lampiran Gambar).

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

A. Kesimpulan

Berdasarkan hasil simulasi penentuan lokasi gangguan pada saluran transmisi dengan menggunakan transformasi wavelet, maka dapat disimpulkan:

1. Lokasi gangguan dapat diperoleh dari perbedaan waktu datangnya puncak gelombang pertama dan puncak gelombang kedua pada mode aerial dikalikan dengan kecepatan rambat gelombang pada penghantar. Kecepatan rambat gelombang pada penghantar dipengaruhi oleh jenis penghantar.
2. Jarak gangguan dari *sending end* memengaruhi keakuratan perhitungan lokasi gangguan. Semakin jauh lokasi, maka keakuratan hasil perhitungan lokasi gangguan akan semakin tinggi.
3. Dari 3 hasil percobaan maka ditemukan indikasi gangguan antara tower 11 pada jarak 3 km, antara tower 17 dan 18 pada jarak dan antara tower 24 dan 25 pada jarak 7 km (Lampiran Gambar)

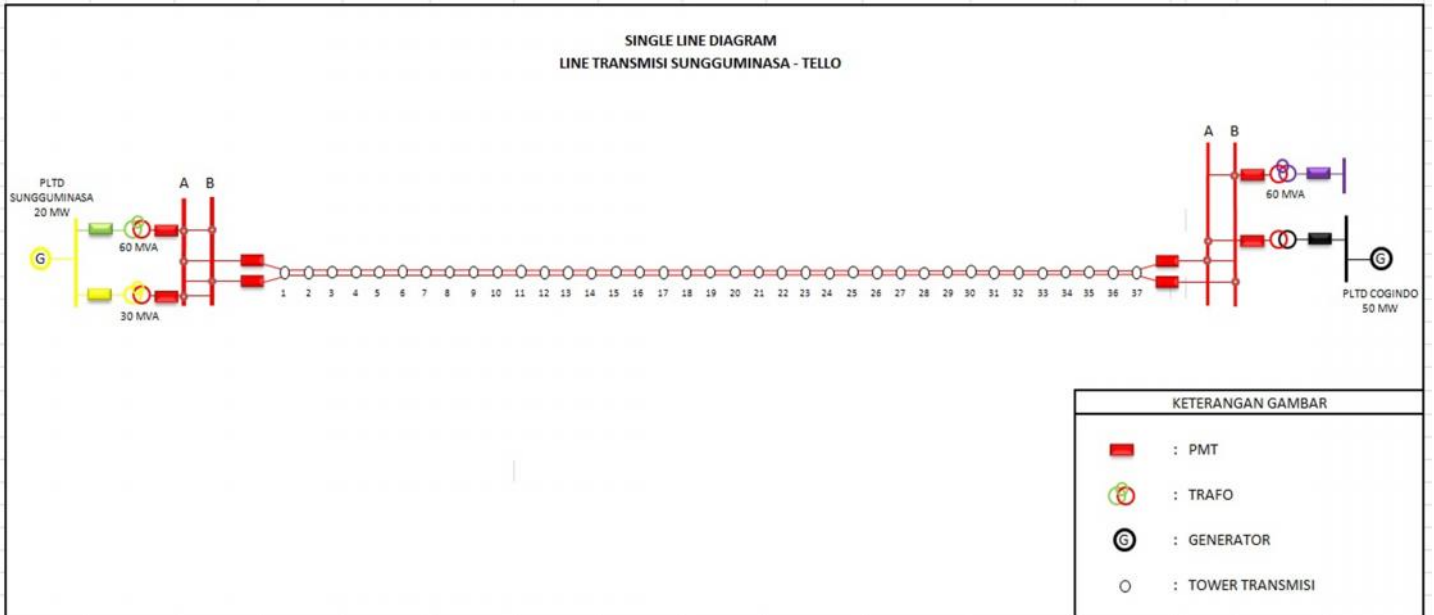
B. Saran

Untuk memperoleh akurasi tinggi pada pengukuran/perhitungan lokasi gangguan, harus dipilih frekuensi sampling yang tinggi/tetap. Selain itu, beton penghantar pada saluran transmisi harus diperhatikan, karena mempengaruhi keakuratan perhitungan.

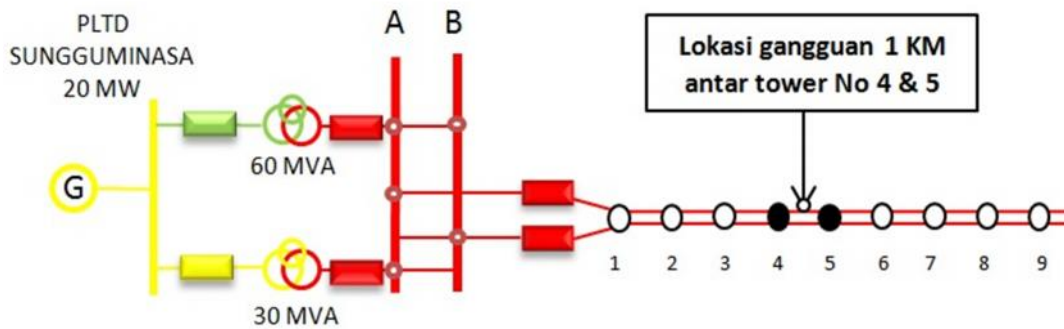
DAFTAR PUSTAKA

- Canadian-American EMTP Users Group. 2014. *ATP-EMTP Rule Book*.
- C.Y. Evrenosoglu and A. Abur. 2015. "Fault Location in Distribution Systems with Distributed Generation", 15th PSCC, Session 10, Paper 5, page 1-5.
- Drs. Sahid, Msc. 2016, *Panduan Praktis Matlab Disertai Latihan Langsung*. Yogyakarta :Penerbit Andi.
- F. H. Magnago and A. Abur. 2014. "Fault location using wavelets," *IEEE Trans. PowerDel*, vol. 3, no. 4, pp. 1475-1480.
- L. V. Bewley. 2011 *Travelling Waves on Transmission Systems*. New York: Wiley.
- Lucas, J R. *High Voltage Engineering*. 2WI.
- Sudirham, Sndaryatno. 2015. *Analisis Rangkaian Listrik*. Bandung :Penerbit ITB, 201Q5.
- William D. Stevenson Jr. 2002. *Power System Analysis*. McGraw-WI, Inc. 1996.

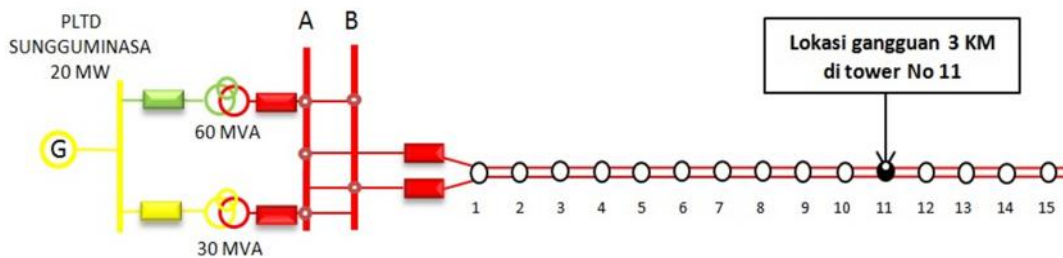
LAMPIRAN GAMBAR



Gambar single line diagram Transmisi Tegagan Tinggi Sungguminasa-Tello



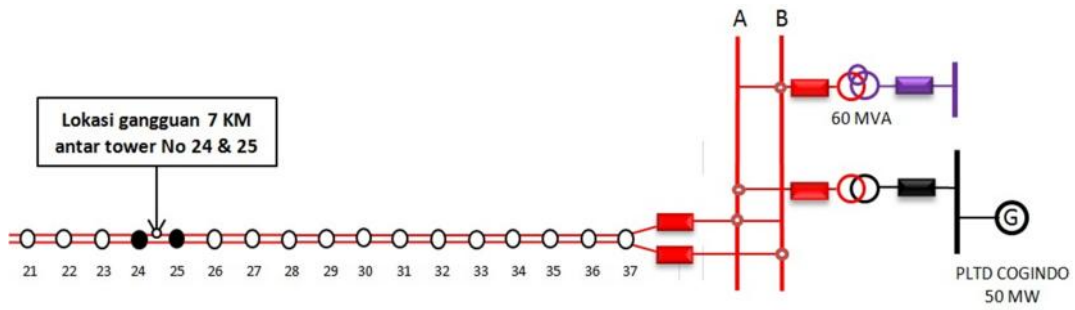
Gambar lokasi gangguan jarak 1 km



Gambar lokasi gangguan jarak 3 km

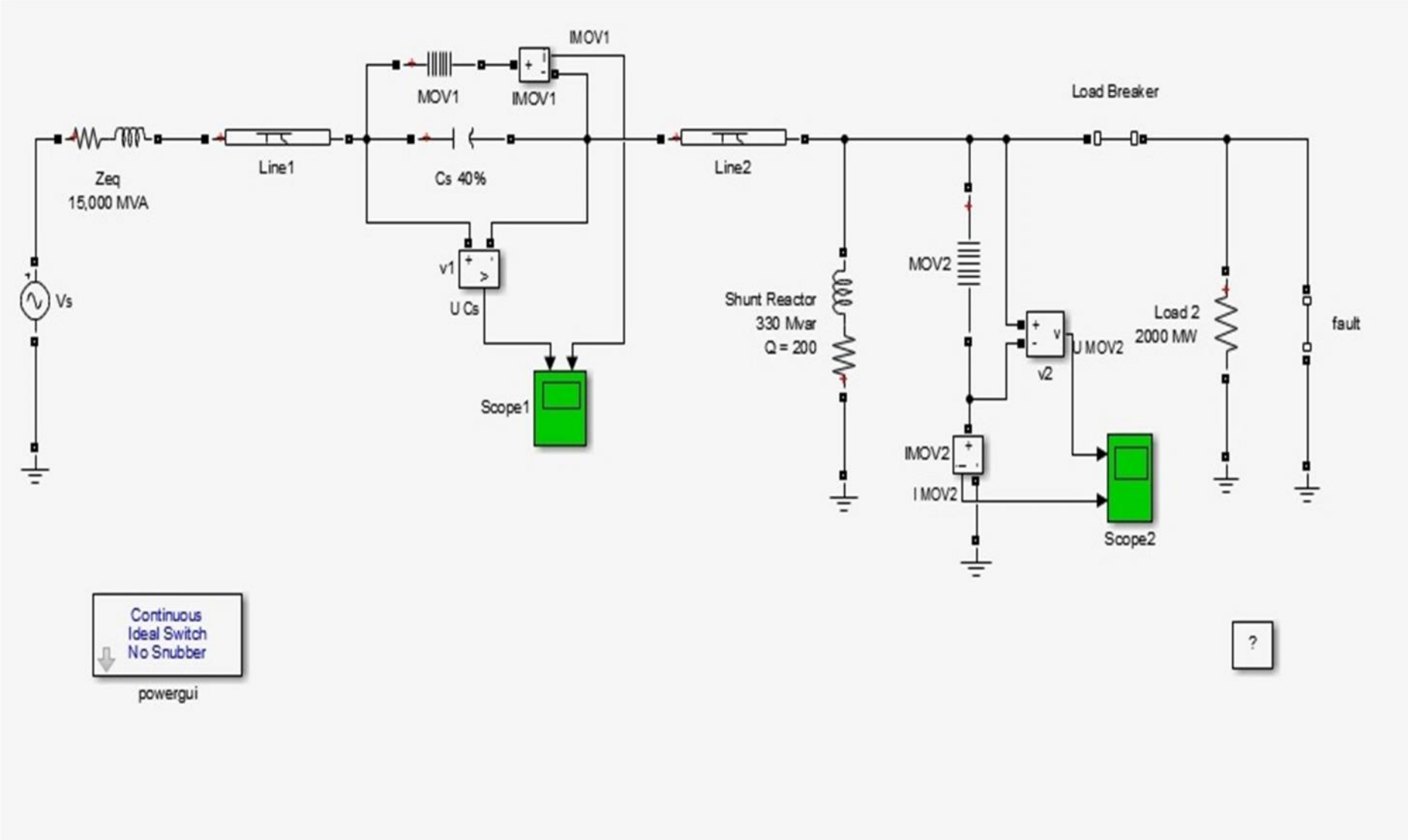


Gambar lokasi gangguan jarak 5 km



Gambar lokasi gangguan jarak 7 km

GAMBAR RANGKAIAN SIMULASI GANGGUAN DALAM APLIKASI MATLBA



STATES:

1:	'Il Zeq 15,000 MVA	' =	7890.19 A	-84.72 °
2:	'Il Shunt Reactor 330 Mvar Q = 200'	' =	5.39 A	5.47 °
3:	'Il section 1: Line1	' =	7929.82 A	-84.75 °
4:	'Il section 2: Line1	' =	7976.34 A	-84.79 °
5:	'Il section 1: Line2	' =	8016.31 A	-84.82 °
6:	'Il section 2: Line2	' =	8049.57 A	-84.84 °
7:	'Uc input: Line1	' =	314656.29 V	0.39 °
8:	'Uc section 2: Line1	' =	185307.77 V	-1.66 °
9:	'Uc output: Line1	' =	56525.35 V	-13.13 °
10:	'Uc section 2: Line2	' =	132190.79 V	-0.59 °
11:	'Uc output: Line2	' =	8824.81 V	-84.81 °
12:	'Uc input: Line2	' =	263093.67 V	1.32 °

Dependent STATES:

1:	Uc 'Uc Cs 40%'	=	208835.31 V	-174.80 °
----	----------------	---	-------------	-----------

MEASUREMENTS:

1:	'U v2	' =	8824.81 V	-84.81 °
2:	'U v1	' =	208835.31 V	-174.80 °
3:	'I IMOV2'	=	0.00 A	0.00 °
4:	'I IMOV1'	=	0.00 A	0.00 °