



TESIS - TE185401

**ANALISIS DETEKSI LOKASI GANGGUAN PADA
SISTEM DISTRIBUSI 20 kV MENGGUNAKAN
METODE INJEKSI SINYAL IMPULSE YANG
DIPELAJARI DENGAN ADAPTIVE NEURO FUZZY
INFERENCE SYSTEM (ANFIS)**

MUHAMMAD BUDI RAHAYU WIDODO
07111750010011

DOSEN PEMBIMBING
Prof. Ir. Ontoseno Penangsang, M.Sc.,Ph.D
Prof. Dr. Ir. Adi Soeprijanto, MT

PROGRAM MAGISTER
BIDANG KEAHLIAN TEKNIK SISTEM TENAGA
DEPARTEMEN TEKNIK ELEKTRO
FAKULTAS TEKNOLOGI ELEKTRO DAN INFORMATIKA CERDAS
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA
2020



TESIS - TE185401

**ANALISIS DETEKSI LOKASI GANGGUAN PADA
SISTEM DISTRIBUSI 20 kV MENGGUNAKAN
INJEKSI SINYAL IMPULSE YANG DIPELAJARI
DENGAN ADAPTIVE NEURO FUZZY INFERENCE
SYSTEM (ANFIS)**

MUHAMMAD BUDI RAHAYU WIDODO
07111750010011

DOSEN PEMBIMBING
Prof. Ir. Ontoseno Penangsang, M.Sc., Ph.D
Prof. Dr. Ir. Adi Soeprijanto, MT

PROGRAM MAGISTER
BIDANG KEAHLIAN TEKNIK SISTEM TENAGA
DEPARTEMEN TEKNIK ELEKTRO
FAKULTAS TEKNOLOGI ELEKTRO DAN INFORMATIKA CERDAS
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA
2020

Halaman ini sengaja dikosongkan

LEMBAR PENGESAHAN TESIS

Tesis disusun untuk memenuhi salah satu syarat memperoleh gelar
Magister Teknik (MT)

di
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

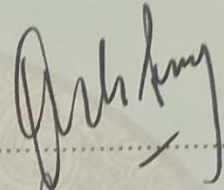
Oleh:

MUHAMMAD BUDI RAHAYU WIDODO
NRP: 0711750010011

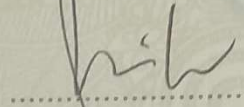
Tanggal Ujian: 03 Januari 2020
Periode Wisuda: Maret 2020

Disetujui oleh:
Pembimbing:

1. Prof.Ir. Ontoseno Penangsang, M.Sc.,Ph.D
NIP: 194907151974121001

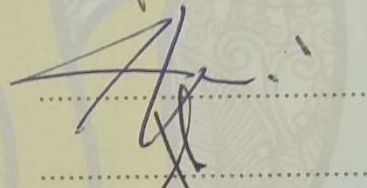


2. Prof. Dr. Ir. Adi Soeprijanto, MT
NIP: 196404051990021001

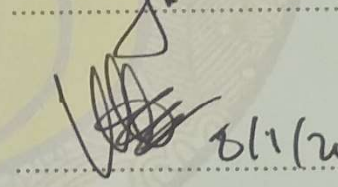


Penguji:

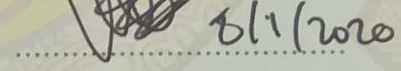
1. Dedet Candra R., ST., M.Eng.,Ph.D
NIP: 197311192000031001



2. Dr. Eng. Rony Seto Wibowo, ST., MT
NIP: 197411292000121001



3. Vita Lystianingrum B.P., ST., M.Sc., Ph.D
NIP: 198208292006042001



Kepala Departemen Teknik Elektro
Fakultas Teknologi Elektro dan Informatika Cerdas



Dedet Candra R., ST., M.Eng., Ph.D
NIP: 197311192000031001

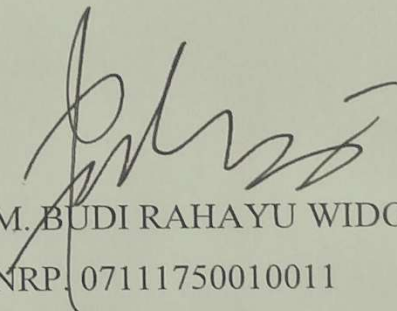
Halaman ini sengaja dikosongkan

PERNYATAAN KEASLIAN TESIS

Dengan ini saya menyatakan bahwa isi keseluruhan Tesis saya dengan judul **“ANALISIS DETEKSI LOKASI GANGGUAN PADA SISTEM DISTRIBUSI 20 kV MENGGUNAKAN METODE INJEKSI SINYAL IMPULSE YANG DIPELAJARI DENGAN ADAPTIVE NEURO FUZZY INFERENCE SYSTEM (ANFIS)”** adalah benar-benar hasil karya intelektual mandiri, diselesaikan tanpa menggunakan bahan-bahan yang tidak diijinkan dan bukan merupakan karya pihak lain yang saya akui sebagai karya sendiri.

Semua referensi yang dikutip maupun dirujuk telah ditulis secara lengkap pada daftar pustaka. Apabila ternyata pernyataan ini tidak benar, saya bersedia menerima sanksi sesuai peraturan yang berlaku.

Surabaya, 07 Desember 2019



M. BUDI RAHAYU WIDODO
NRP. 07111750010011

Halaman ini sengaja dikosongkan

ANALISIS DETEKSI LOKASI GANGGUAN PADA SISTEM DISTRIBUSI 20 kV MENGGUNAKAN METODE INJEKSI SINYAL IMPULSE YANG DIPELAJARI DENGAN ADAPTIVE NEURO FUZZY INFERENCE SYSTEM (ANFIS)

Nama mahasiswa : MUHAMMAD BUDI RAHAYU WIDODO
NRP : 07111750010011
Pembimbing : 1. Prof. Dr. Ir. Ontoseno Penangsang, M.Sc.,Ph.D
2. Prof Dr. Ir. Adi Soeprijanto, MT

ABSTRAK

Tugas akhir ini membahas mengenai metode baru pendeteksian lokasi gangguan yang berbasis domain waktu. Dengan memberikan injeksi tegangan impulse pada sistem kelistrikan 20 Kv setiap detiknya di masing-masing fasa, maka akan diperoleh gambar respon sistem pada kondisi normal. Pada saat terjadi gangguan, maka respon tegangan impulse yang diinjeksikan akan berubah sehingga diperoleh gambar baru. Kemudian dilakukan perbandingan antara respon sebelum dan setelah gangguan, sehingga akan diketahui waktu dimana kedua respon tersebut berpisah satu dengan yang lain, yang selanjutnya dijadikan dasar perhitungan untuk penentuan lokasi gangguan. Selanjutnya, hasil perbedaan waktu dan jarak ini akan dilakukan *learning* menggunakan Adaptive Neuro Fuzzy Inference System (ANFIS) untuk mendapatkan lokasi gangguan berada. Simulasi dilakukan menggunakan MATLAB 2016a, dengan beberapa kondisi diantaranya: memvariasi jenis gangguan (fasa ke tanah, fasa-fasa, dua fasa ke tanah, dan tiga fasa ke tanah), besar resistansi gangguan (5-300 ohm), resistansi *ground* (100-500 ohm), dan letak lokasi gangguan. Dari hasil simulasi diperoleh fakta bahwa nilai resistansi gangguan dan resistansi ground tidak mempengaruhi hasil deteksi lokasi gangguan dengan metode impulse. Penggunaan ANFIS menunjukkan perbaikan error lokasi, misalnya untuk gangguan 3 fasa ketanah pada jarak 1.853,35 km, error jarak mencapai 0.73% (13.49 m) yang sebelumnya errornya adalah 3.19% (59.12 m).

Kata kunci: Sistem Kelistrikan 20 kV, Deteksi lokasi gangguan, Injeksi tegangan *impulse*, *Adaptive Neuro Fuzzy Inference System*(ANFIS).

Halaman ini sengaja dikosongkan

***ANALISYS OF FAULT LOCATION DETECTION ON 20 kV
ELECTRICAL DISTIBUTION SYSTEM USING IMPULSE
VOLTAGE INJECTION LEARNED BY ADAPTIVE NEURO
FUZZY INFERENCE SYSTEM (ANFIS)***

Name : MUHAMMAD BUDI RAHAYU WIDODO
NRP : 07111750010011
Supervisor : 1. Prof. Dr. Ir. Ontoseno Penangsang, M.Sc.,Ph.D
2. Prof Dr. Ir. Adi Soeprijanto, MT

ABSTRACT

This thesis described a new method for fault location detection in the time domain. This method works by injecting a train of impulse voltage in 20 kV electrical distribution system from the beginning of the feeder each phase in every second via a coupling capacitor. The part of signal reflected by the network during normal conditions will be recorded by the device. When fault happened, there is a new discontinuity or mismatch impedance form the network, so the reflection response of the network will change as well. The algorithm is comparing the impulse response before and after fault to obtain time difference between the signals. The location of the fault can be calculated using a simple mathematic equation. In this thesis, the time difference is learned by an Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System (ANFIS) to determine distance. The simulation will be done using MATLAB r2016a and will be used some conditions such as varying the type of the fault, value of fault resistance (5-300 Ω), ground resistance (100-500 Ω) and location of fault. Form the simulation result can be concluded that the value of fault resistance and fault resistance do not affect on the result of distance estimation which uses an impulse injection method. Application of ANFIS show that there is an improvement, for example: at distance 1.853,35 km, which is applied three phases has error distance about 0.73% (13,49 m). the error distance that use previous method has error about 3.19% (59.13 m).

Key words: 20 kV Distribution system, Fault location detection, Impulse voltage injection, , Adaptive Neuro Fuzzy Inference System (ANFIS).

Halaman ini sengaja dikosongkan

KATA PENGANTAR

Alhamdulillah, segala pujian hanya milik Allah, Tuhan semesta alam, semua yang ada dan tercipta termasuk thesis ini adalah karena-Nya. Tidak ada dan jatuh di bumi ini, melainkan dia mengetahuinya. Sholawat serta salam kepada manusia terbaik dan suri teladan kita Nabi Muhammad Salallahu Alaihi Wassalam, yang telah membawa kita umat manusia dari jalan yang buruk menuju jalan kebaikan. Terima kasih kepada seluruh keluarga, kedua orang tua saya, *Drs. H. Suhardi, M.pd* dan *Dra. Warinten*, istri saya tercinta *Ardana Putri Farahdiansari*, ketiga anak saya *Nashita Pradnyaputri Atha Widodo*, *M. Sakhkhara Prabu Antares Widodo*, dan *Fatiha Rizqy Ashana Widodo* yang selalu mensupport dan mendoakan. Terima kasih kepada para pembimbing kami *Prof. Ontoseno Penangsang* dan *Prof. Adi Soeprijanto* yang membimbing dan memberikan masukan dalam penelitian ini. Terima kasih juga untuk sahabat kami baik di PDAM Surya Sembada kota Surabaya maupun kampus ITS yang telah banyak membantu.

Thesis ini adalah tentang pendeteksian lokasi gangguan pada sistem distribusi 20 kV, dengan menggunakan injeksi tegangan impulse ke jaringan melalui kapasitor *coupling*. Dengan membandingkan respon impulse sebelum dan setelah gangguan, maka akan diperoleh perbedaan waktu kedua respon. Kemudian dilakukan perhitungan jarak lokasi gangguan terjadi dan sebagai pembanding hasil perbedaan waktu dan lokasi dimana gangguan terjadi ini dilearning menggunakan *Adaptive Neuro Fuzzy (ANFIS)* dan disimulasikan menggunakan MATLAB r2016a.

Tentu hasil penulisan tesis ini masih jauh dari sempurna, sehingga kritik dan saran sangat kami nantikan. Akhirnya saya berdoa agar apa yang saya tulis ini dapat memberikan manfaat kepada seluruh civitas akademika juga para praktisi industri yang memiliki kepentingan yang berhubungan dan tema thesis ini, dan saya mohon maaf apabila ada kesalahan dalam penulisan tesis ini.

Surabaya, 07 Desember 2019

Penulis

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN TESIS.....	1
PERNYATAAN KEASLIAN TESIS.....	3
ABSTRAK.....	5
<i>ABSTRACT</i>	7
KATA PENGANTAR.....	9
DAFTAR ISI.....	11
DAFTAR GAMBAR.....	13
DAFTAR TABEL.....	17
BAB 1 PENDAHULUAN.....	19
1.1 Latar Belakang.....	19
1.2 Rumusan Masalah.....	21
1.3 Tujuan.....	22
1.4 Batasan Masalah.....	22
1.5 Kontribusi.....	22
BAB 2 KAJIAN PUSTAKA.....	23
2.1 Kajian Penelitian Terkait.....	24
2.2 Teori Dasar.....	26
2.2.1 Sistem Distribusi [1,4,8];.....	27
2.2.2 Analisis Aliran Daya Dengan Metode Backward Forward [1,4]....	30
2.2.3 Komponen Simetris [10,24].....	33
2.2.4 Tipe Gangguan [10,20,24,25].....	38
2.2.5 Impedansi Sistem Distribusi [10].....	46
2.2.6 Respon Impulse [6, 13,14, 15,16,17,18].....	48
2.2.7 Adaptive Neuro Fuzzy (ANFIS) [12].....	53
BAB 3 METODE PENELITIAN.....	61
3.1 Metode Injeksi Tegangan Impulse [6].....	62
3.2 Pemodelan Sistem.....	65
3.2.1 Pemodelan Impulse.....	65
3.2.2 Pemodelan Sistem Kelistrikan 20 kV.....	67

BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN	77
4.1 Impulse Injector.....	77
4.2 Model Sistem Distribusi 20 kV dan Study Case.	80
4.3 Hasil percobaan dengan bervariasi jenis gangguan, dan resistansi Fault (R_F).....	82
4.3.1 Study Case dengan Variasi Fault Resistance (R_F).....	82
4.3.2 Study Case dengan Variasi Ground Resistance (R_G)	89
4.4 Implementasi Adaptive Neuro Fuzzy (ANFIS).....	91
BAB 5 KESIMPULAN	103
DAFTAR PUSTAKA.....	105

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1 Sistem Pendistribusian Listrik Mulai dari Pembangkit.....	27
Gambar 2. 2 Sistem Distribusi Radial.....	28
Gambar 2. 3 Sistem Distribusi Radial <i>Double Feeder</i>	28
Gambar 2. 4 Sistem Distribusi Ring	29
Gambar 2. 5 Sistem Distribusi Spindel.....	29
Gambar 2. 6 Sistem Distribusi Cluster.....	30
Gambar 2. 7 Sistem Distribusi Radial 20 kV.....	31
Gambar 2. 8 <i>Fasor Positif Sequence “1”</i>	33
Gambar 2. 9 <i>Fasor Negative Sequence “2”</i>	34
Gambar 2. 10 <i>Fasor Zero Sequence “0”</i>	34
Gambar 2. 11 Operator “a”	35
Gambar 2. 12 Gangguan Satu Fasa ke Tanah	39
Gambar 2. 13 Hubungan Jaringan Urutan untuk Gangguan Satu Fasa ke Tanah.	40
Gambar 2. 14 Gangguan 2 Fasa	41
Gambar 2. 15 Gangguan 2 Fasa ke Tanah	43
Gambar 2. 16 Gangguan Tiga Fasa.....	45
Gambar 2. 17 <i>Single Line Diagram (SLD)</i> Jaringan Distribusi 20 kV	46
Gambar 2. 18 Respon Tegangan Impulse Exponensial Ganda.....	49
Gambar 2. 19 Skema Rangkaian <i>Switching</i> Pembangkit Impulse	49
Gambar 2. 20 Injeksi impulse dan refleksi [18].....	50
Gambar 2. 21 Proses Transmisi Sinyal	52
Gambar 2. 22 Editor ANFIS	54
Gambar 2. 23 Loading Data Input Output pada Anfis Editor.....	55
Gambar 2. 24 <i>Generate FIS</i> secara otomatis	56
Gambar 2. 25 Struktur ANFIS	56
Gambar 2. 26 Hasil Training FIS.....	57
Gambar 2. 27 Membership Function FIS hasil Pembuatan dengan Anfis.....	58
Gambar 2. 28 Rule Base Dan Membership Ouput.....	58

Gambar 3. 1 Diagram Alir Penelitian.....	61
Gambar 3. 2 Injeksi Sinyal Impulse Pada Sistem Distribusi 20 kV	62
Gambar 3. 3 Respon Sinyal Sebelum dan Setelah Gangguan [6]	62
Gambar 3. 4 Impulse Generator	65
Gambar 3. 5 Respon Impulse dalam Periode 1 Second.....	66
Gambar 3. 6 Single Line diagram Sistem Distribusi 20 kV Deltasari.....	67
Gambar 3. 7 <i>Three Phase Source</i>	Error! Bookmark not defined.
Gambar 3. 8 Respon Tegangan dan Arus GI 150 kV	70
Gambar 3. 9 Parameter <i>Three Phase Transformator</i> Error! Bookmark not defined.	
Gambar 3. 10 Respon Arus Dan Tegangan Pada Sisi Sekunder	71
Gambar 3. 11 <i>Three Phase Eries RLC Load</i>	Error! Bookmark not defined.
Gambar 3. 12 <i>Circuit Breaker</i>	72
Gambar 3. 13 <i>Logic Relay Proteksi</i>	73
Gambar 3. 14 <i>There Phase Fault</i>	74
Gambar 3. 15 <i>Three phase PI Section Line</i>	75
Gambar 3. 16 <i>Three Phase VI Measurement</i>	76
Gambar 4. 1 Rangkaian Max Impulse Generator Two Stage	77
Gambar 4. 2 <i>Coupling Capacitor</i>	78
Gambar 4. 3 Respon tegangan impulse	78
Gambar 4. 4 Respon tegangan impulse genrator.....	79
Gambar 4. 5 Respon Jaringan terhadap tegangan impulse.....	79
Gambar 4. 6 Study Case Impulse Injection	80
Gambar 4. 7 Model Sistem Distribusi 20 kV	81
Gambar 4. 8 Respon Tegangan Line To Line, Yang Telah Diberikan Injeksi.....	82
Gambar 4. 9 Respon Tegangan Impulse LG, R_F 5 ohm, 1.8 km.....	82
Gambar 4. 10 Respon Tegangan Impulse, LG Fault , R_F 300 ohm, 1.8 km.....	83
Gambar 4. 11 Respon Tegangan Jala-Jala, LL Fault, R_F 5 ohm, 1.8 km	84
Gambar 4. 12 Respon tegangan impulse, LL Fault, R_F 5 ohm, 1.8 km	84
Gambar 4. 13 Respon Tegangan Jala-jala, LL Fault, R_F 300 ohm, 1.8 km.....	85
Gambar 4. 14 Respon Tegangan Impulse, LL Fault, R_F 300 ohm, 1.8 km	85
Gambar 4. 15 Respon Tegangan Impulse, LLLG Fault, R_F 5 ohm, 1.8 km	86

Gambar 4. 16 Respon Tegangan Impulse, LL Fault, R_F 5 ohm, 1.8 km.....	87
Gambar 4. 17 Respon Tegangan Impulse, LLLG Fault, R_F 300 ohm, 1.8 km.....	88
Gambar 4. 18 Respon Tegangan Impulse, LL Fault, R_F 5 ohm, 1.8 km.....	88
Gambar 4. 19 Perbandingan Error Akibat Perubahan R_F dan R_G	91
Gambar 4. 20 Komparasi Respon Sinyal.....	91
Gambar 4. 21 Skema Learning dengan ANFIS.....	92
Gambar 4. 22 Data Tranining.....	93
Gambar 4. 23 Error dan Hasil training FIS.....	93
Gambar 4. 24 Struktur ANFIS.....	94
Gambar 4. 25 Fungsi <i>Membership Input 1 (Maximum Error)</i>	94
Gambar 4. 26 <i>Membership Function</i> untuk Input R_F	95
Gambar 4. 27 <i>Mapping Data Training</i>	98
Gambar 4. 28 <i>Error Training Data</i> 1.2×10^{-5}	98
Gambar 4. 29 Hasil uji coba dengan data training.....	98
Gambar 4. 30 Struktur ANFIS penentuan lokasi gangguan.....	99
Gambar 4. 31 <i>Membership Function</i> untuk R_F	99
Gambar 4. 32 <i>Membership Function</i> untuk Perbedaan Waktu (Δt).....	100
Gambar 4. 33 <i>Membership Function Ouput</i> (9 output).....	100
Gambar 4. 34 <i>Rule base</i>	101

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR TABEL

Tabel 3. 1 Parameter Tegangan Impulse [6]	65
Tabel 3. 2 Nilai Parameter Kapasitor dan Resistor	66
Tabel 3. 3 Tahanan dan reaktansi penghantar AAAC pada tegangan 20 kV.....	68
Tabel 3. 4 Data Impedansi saluran pada jaringan	68
Tabel 3. 5 Data Trafo dan Beban	68
Tabel 3. 6 Data Trafo dan Beban Lanjutan	69
Tabel 3. 7 Electric Switch	69
Tabel 3. 8 Data Penyulang dan trafo GI Deltasari	69
Tabel 3. 9 Contoh data SPLN 64 kabel AL 3 x 240 mm ² [10]	74
Tabel 4. 1 Parameter Impulse Generator	77
Tabel 4. 2 Hasil Simulasi Untuk Variasi R _F dan Jenis Gangguan (1,8 km)	88
Tabel 4. 3 Hasil Simulasi Untuk Variasi R _F dan Jenis Gangguan (2,18 km)	89
Tabel 4. 4 Hasil Simulasi Untuk Variasi R _F dan Jenis Gangguan (3,08 km)	89
Tabel 4. 5 Hasil Simulasi dengan Variasi Ground resistance	90
Tabel 4. 6 Jarak Hasil Perhitungan Dan Error Jarak Dengan Variasi R _G	90
Tabel 4. 7 <i>Data Learning For Time Different</i>	92
Tabel 4. 8 Data Training untuk Penentuan Lokasi Gangguan	95
Tabel 4. 9 Data Training untuk Penentuan Lokasi Gangguan lanjutan (1).....	96
Tabel 4. 10 Data Training untuk Penentuan Lokasi Gangguan lanjutan (2).....	97
Tabel 4. 11 Hasil Menggunakan ANFIS	101
Tabel 4. 12 Hasil Penggunaan Metode Injeksi Impulse.....	102

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Sistem distribusi adalah salah satu bagian penting dari proses penyaluran tenaga listrik. Sistem distribusi udara adalah topologi yang paling banyak digunakan di Indonesia. Kontinuitas penyaluran energi listrik dari hulu ke hilir tentu sangat dipengaruhi oleh banyak faktor, mulai dari tercukupinya suplai daya, saluran transmisi dan distribusi, sistem proteksi, kualitas daya dan faktor *power*, serta sangat dipengaruhi pula oleh sedikit banyaknya gangguan listrik yang terjadi.

Gangguan tentu hal yang tidak dapat dihindarkan terlebih kabel udara, dimana banyak sekali faktor yang dapat menimbulkan gangguan (faktor alam: hujan, pohon, suhu; faktor intern: penuaan alat; faktor *human error*: kesalahan operasi atau *maintenance*), sehingga frekuensi terjadinya gangguan yang berakibat pemadaman tentu akan mengurangi performa kontinuitas suplai listrik yang secara teori mengharuskan terus kontinu beroperasi sesuai dengan jumlah kebutuhan beban menjadi kurang baik. Terjadinya gangguan mungkin tidak dapat dihindari, namun resiko akibat gangguan dapat diminalkan dengan sistem proteksi yang handal, dengan mengkombinasikan relay-relay yang ada, sehingga besarnya efek gangguan dapat diminalkan (diisolasi)[8].

Selain koordinasi proteksi yang bagus, tentunya penemuan lokasi gangguan tentu menjadi hal yang sangat penting, terutama pada sistem transmisi dan distribusi yang jaraknya sangat jauh (puluhan atau ratusan meter). Tentu apabila pencarian dilakukan secara manual dan tidak menggunakan teknik tertentu akan membutuhkan waktu yang sangat lama, sementara ketika listrik padam maka pelanggan tidak mendapatkan suplai listrik dan tentu saja PLN merugi karena listrik tidak terjual. Pendeteksian lokasi gangguan harus dilakukan secara cepat sehingga proses *recovery* atau restorasi jaringan distribusi listrik dapat segera dilakukan. Jika lokasi gangguan cepat ditemukan maka putusan atau solusi terhadap gangguan lebih longgar untuk dilakukan, dan tentu saja penghematan dari segi biaya adalah pertimbangan utama.

Pada prakteknya ketika terjadi gangguan dilapangan, proses pencarian lokasi gangguan masih mengandalkan pengalaman operator dan alat lokalisir gangguan masih manual atau semiotomatis, sehingga waktu yang dibutuhkan untuk menemukan lokasi gangguan cukup lama, dan tentunya proses *recovery* dan rekonfigurasi sistem membutuhkan waktu yang cukup lama [6].

Ada banyak metode yang telah diteliti dan dikembangkan untuk mendeteksi dan menemukan lokasi gangguan, diantaranya yaitu Teknik Impedansi [1,3,6,7,10]. Teknik ini cukup akurat dan membutuhkan biaya yang murah, hanya saja kita butuh untuk memodelkan impedansi sistem (urutan positif, negatif, dan *zero*) dan menghitung arus gangguan dengan variasi titik gangguan sesuai jenis gangguan yang terjadi (satu fasa (L-G), dua fasa (L-L-G), atau tiga fasa ke tanah(L-L-L)), sehingga kita membutuhkan data detail dari sistem, dan ketika terjadi restorasi, maka data harus dihitung ulang untuk mendapat hasil yang tepat.. Sedangkan *knowledge base* atau kecerdasan buatan, misalnya *Fuzzy*[3,12,19], *Neural Network (NN)*[3,12,21], *Adaptive Neuro Fuzzy (ANFIS)* [2,5,12], *Genetic Algorithm*[12,26] dan lain sebagainya juga sering digunakan untuk deteksi gangguan. Pada intinya semua algoritma ini melakukan *learning* dari sistem, mulai dari arus gangguan (I_f) dan tegangan gangguan(V_f) di setiap titik,/bus, sehingga semakin sedikit inputan atau *sample* percobaan, maka hasil yang diperoleh tidak akan akurat dan sebaliknya semakin banyak data learning, maka hasilnya semakin bagus.

Teknik yang lain adalah Gelombang Berjalan (*Traveling wave*) [6,10,11], yakni dengan memanfaatkan gelombang impulse yang ditumbulkan oleh titik gangguan, dimana gelombang tersebut merambat ke ujung-ujung saluran.. Metode ini memiliki akurasi yang tinggi dalam pendeteksian gangguan, namun kelemahannya adalah membutuhkan *sample time* yang tinggi, karena orde sinyal berjalan ini sangat kecil ditambah lagi gelombang berjalan hasil *short circuit* secara *magnitude* (arus dan tegangan) kecil sehingga mempengaruhi pengamatan gelombang berjalan, karena memang yang diamati adalah gelombang impulse yang ditimbulkan oleh gangguan sistem. Biasanya *traveling wave* ini dianalisis dengan *wavelet transform* [6,9,21,22] atau *park transform* [2], untuk mengetahui dengan jelas waktu kedatangan gelombang impulse tiap ujung. Namun kelemahannya

adalah masih terpengaruh oleh besarnya magnitude dari arus dan tegangan, sehingga tidak independent terhadap resistansi gangguan.

Pada thesis ini akan digunakan metode injeksi tegangan impulse [6, 13,14, 15,16,17,18], yakni dengan menginjeksikan tegangan impulse dengan frekuensi dan *magnitude* tertentu pada sistem distribusi 20 kV. Sinyal impulse ini diinjeksikan setiap detiknya pada sistem di masing-masing fasa melalui kapistor coupling, kemudian respon impulse hasil refleksi pada sistem direkam. Ketika gangguan terjadi, maka akan diperoleh respon impulse yang baru, sehingga akan terjadi perbedaan antara respon tegangan impulse normal dan ketika ada gangguan. Dari perbedaan respon impulse ini, akan diperoleh perbedaan waktu (Δt), yang diukur mulai dari impulse pertama diinjeksikan sampai dengan ketika kedua respon saling berpisah satu dengan yang lain [6]. Keunggulan injeksi impuls ini adalah independent, tidak terpengaruh oleh magnitude tegangan dan arus gangguan yang terjadi, resistansi gangguan dan resistansi ground sehingga cocok untuk kabel bawah tanah maupun kabel udara. Setelah Δt ditemukan, maka dengan algoritma atau perhitungan tertentu, akan didapatkan dimana lokasi gangguan berada. Di dalam prakteknya penentuan time difference (Δt) cukup sulit, sehingga dalam tesis ini digunakan ANFIS untuk melearning Δt , untuk memperoleh estimasi gangguan yang lebih akurat.

1.2 Rumusan Masalah

Dari latar belakang yang diuraikan diatas, maka dapat kita rumuskan beberapa masalah yang akan dibahas, antara lain :

1. Bagaimana cara kerja metode Injeksi Impulse untuk menentukan lokasi gangguan?
2. Bagaimana memodelkan sistem distribusi 20 kV dan melakukan analisis deteksi lokasi gangguan dengan metode injeksi impulse pada MATLAB?
3. Bagaimana aplikasi ANFIS dalam meningkatkan performa dari teknik injeksi impulse?

1.3 Tujuan

Adapun tujuan dari penulisan dari Tesis ini antara lain:

1. Melakukan analisis dan simulasi metode Injeksi Sinyal Impulse dan ANFIS untuk mendeteksi lokasi gangguan pada sistem distribusi 20 kV menggunakan MATLAB r2016a.
2. Menghitung tingkat akurasi pendeteksian ganggun dengan menghitung error estimasi lokasi gangguan, sehingga dapat diketahui apakah mampu meningkatkan pencarian lokasi dengan cepat dan akurat yang berdampak pada kontinuitas supali listrik kepada pelanggan.

1.4 Batasan Masalah

Batasan masalah yang kami gunakan dalam Tesis ini antara lain:

1. Sistem Distribusi yang digunakan dalam penelitian ini adalah sebagian dari Sistem Distribusi Udara 20 kV, Deltasari, Surabaya.
2. Jaringan kabel yang digunakan disumsikan sama yakni menggunakan AAAC diameter 150 mm, dengan impedansi sesuai dengan SPLN 1985.
3. Jenis gangguan yang yang dipakai dalam penelitan ini adalah Gangguan 1 Fasa (L-G), 2 Fasa Kestanah (L-L-G) dan 3 fasa ke tanah (L-L-L-G).
4. Kondisi yang akan dibahas dalam Tesis ini adalah dengan memvariasikan lokasi gangguan, resistansi gangguan dan resistansi ground.
5. Software yang digunakan untuk analysis adalah MATLAB r2016a

1.5 Kontribusi

Adapun kontribusi yang diharapkan dalam penelitian ini adalah:

1. Dapat memberikan gambaran analisis penentuan lokasi gangguan pada sistem distribusi 20 kV udara, dengan menggunakan teknik injeksi impulse
2. Pengaplikasian ANFIS untuk melakukan learning error jarak untuk perbaikan akurasi dari pendeteksian gangguan.
3. Sebagai rujukan ntuk penelitan-penelitian dimasa yang akan datang, khususnya untuk adik-adik kami yang sedang mengerjakan Skripsi atau Thesis.

BAB 2

KAJIAN PUSTAKA

Gangguan adalah merupakan kondisi abnormal pada sistem, yang berupa lonjakan arus pada sistem, *drop* tegangan, yang berakibat pada gagalnya fungsi peralatan dan *black out* pada sistem. Gangguan ini, dapat terjadi diseluruh titik atau sepanjang sistem, sehingga akan selalu terjadi. Tolok ukur kehandalan sistem diukur dari seberapa sering sistem mengalami kegagalan (mati) dalam kurun periode tertentu, semakin sering maka kehandalan sistem dianggap buruk. Gangguan pada sistem memang tidak dapat dihindari, namun dapat diminimalkan terjadinya dan dampaknya pada keseluruhan sistem. Oleh karena itu, sistem proteksi yang handal adalah hal wajib yang diperlukan oleh sebuah sistem tenaga listrik, dimana gangguan dapat dilokalisir sehingga tidak berimbas pada sistem yang lain. Pada sistem kecil mungkin penemuan lokasi gangguan tidak menjadi kendala utama, namun pada sistem yang besar, yang memiliki sistem distribusi yang panjang, tentunya penemuan lokasi gangguan menjadi hal yang penting, mengingat kebutuhan pelayanan listrik yang kontinyu. Penemuan lokasi yang tepat tentu akan sangat bermanfaat baik dari sisi teknis (keputusan resotransi yang cepat) dan ekonomis (penjualan listrik dan juga pelayanan yang prima) [6].

Pada sistem tenaga listrik, gangguan dikategorikan menjadi 4 yakni, gangguan seri (*series*), gangguan parallel (*shunt*), gangguan simetris dan gangguan asimetris. Gangguan series ini terjadi ketika jalur mengalami gangguan namun bukan karena terhubung singkat satu dengan yang lain atau dengan *ground*, namun lebih karena *open circuit* pada satu atau dua kabel, misalnya terputus, CB terbuka dan lain sebagainya. Sedangkan gangguan *Shunt* (parallel) terjadi apabila terjadi hubung singkat antara satu kabel dengan lainnya, atau dengan *ground*. Gangguan shunt ini sendiri dikategorikan menjadi 2 yakni: simetris, misalnya gangguan 3 Phase (LLL); gangguan asimetris (*Line to Ground* (LG), *Line to Line* (LL), *Line to Line to Ground* (LLG) [3].

Setelah mengetahui, jenis-jenis gangguan selanjutnya adalah mencari tahu bagaimana cara untuk mendeteksi lokasi dimana gangguan tersebut terjadi. Secara

umum metode deteksi gangguan digolongkan menjadi 2 (dua) kategori, pertama berdasarkan komponen frekuensi daya (tegangan, arus, impedansi), dan kedua berdasarkan sinyal-sinyal transient (sinyal gangguan) pada frekuensi yang lebih tinggi [22]. Sinyal transient ini berkenaan dengan gelombang berjalan *traveling wave* dengan kecepatan tinggi (*ultra high speed fault detection*).

2.1 Kajian Penelitian Terkait

Pada [3,6] beberapa metode yang digunakan untuk mendeteksi lokasi gangguan (*fault location detection*) diantaranya menggunakan metode:

1. Metode Impedansi [1,3,7,10]
2. Gelombang berjalan (Traveling wave) dan transformasi wavelate [6,10,11,21,22,]
3. *Artificial intelligent(AI): Fuzzy, NN, ANFIS, GA, etc* [2,5,12,19,26]
4. Analisis statistik [6]
5. *Distribution base methode* (sensor)[6]
6. *Hybrid methode* (kombinasi metode diatas) [6]

Metode impedansi yang cukup dikenal dan mudah untuk dilakukan, contohnya adalah metode Takagi dan *simple reactance*. Pada metode ini dilakukan pengukuran arus sebelum dan setelah terjadi gangguan, diseluruh titik, dengan memanfaatkan nilai impedansi per kilometer (urutan positif, negatif, dan zero) dari saluran kabel, dimana nilai impedansi akan dihitung mulai sampai dengan jarak lokasi gangguan terjadi [1,3,6]. Metode ini memiliki kelemahan ketika digunakan pada jaringan yang bercabang, atau nilai resistansi *fault* besar maka nilai dari arus nominal dan arus gangguan adalah sama, maka metode ini tidak mampu untuk memberikan informasi lokasi gangguan pada titik/ cabang yang mana, karena data arus gangguannya sama [3,6]. Para peneliti menggunakan beberapa cara untuk mengatasi ini, salah satunya adalah dengan pengukuran arus per jaringan [1,6,7,10]. Namun solusi ini membutuhkan informasi jaringan secara lengkap untuk menentukan lokasi gangguan.

Metode lain yang banyak digunakan adalah teori gelombang berjalan (*traveling wave*) [6,10,11] dan transformasi *wavelate*[6,9,21,22]. Kedua metode

merupakan katagori analisis gelombang transient berfrekuensi tinggi (*ultra high frequency fault detection*). *Wavelate transform* ini mirip dengan transformasi *fourier*, hanya saja pada transformasi *fourier* tidak terjadi dalam domain waktu sehingga tidak dapat mengetahui waktu gangguan terjadi [6,10,11]. *Wavelate transform* memiliki akurasi yang tinggi, namun membutuhkan *sampling rate* yang tinggi dan waktu sinkronisasi di masing-masing cabang, sehingga ketika diimplementasikan membutuhkan biaya yang sangat mahal [6,9,21,22]. Selain hal itu, metode ini memiliki kelemahan untuk membedakan gelombang dari lokasi gangguan atau dari ujung jaringan. Kelemahan lain adalah, ketika resistansi *fault* besar, maka akan sangat sulit untuk mengetahui gelombang impulse dari gangguan.

Metode kecerdasan buatan yang biasa digunakan adalah misalnya *Fuzzy*[3,12,19], *Neural Network (NN)*[3,12,21], *Adaptive Neuro Fuzzy (ANFIS)* [2,5,12], *Genetic Algorithm*[12,26]. Metode ini secara biaya yang murah, namun kelemahan metode ini adalah membutuhkan akurasi dan waktu *training*, untuk mempertimbangkan seluruh kemungkinan gangguan di setiap cabang jaringan sistem distribusi (butuh sample yang banyak) [3,12].

Pada jaringan distribusi, juga digunakan sensor-sensor pendeteksi gangguan, atau dikenal dengan *distribution base method*. Kelemahannya adalah sensor terpengaruh oleh arus kapasitif dan *in rush current* pada trafo dan kabel jaringan [6]. Pada prakteknya saat ini, banyak juga dilakukan pendeteksian langsung pada jaringan distribusi, yakni dengan memasang sensor-sensor pendeteksi gangguan, atau dikenal *distribution base metode*, dengan tujuan akurasi pendeteksian. Namun metode ini memiliki kelemahan, yakni sensor terpengaruh oleh arus kapasitif dan *in-rrush current* pada trafo dan kabel jaringan [6].

Untuk meningkatkan perfoma, metode *hybrid* cukup banyak dikembangkan [6]. Dalam *paper* [2] tersebut dijelaskan mengenai pendeteksi gangguan menggunakan gelombang berjalan, yang dinalisis menggunakan *transformation park* dan *ANFIS* untuk perhitungan waktu kedatangan. Dari selisih waktu untuk masing-masing ujung akan dipelajari dan diperhitungkan menggunakan ANFIS, sehingga diperoleh jarak prediksi gangguan [2]. Namun metode ini masih tergantung besar arus gangguan, sehingga pada saat resistansi jaringan besar,

seperti dimana terjadi kasus arus gangguan sama dengan arus nominal, maka gangguan tersebut tidak dapat terdeteksi [2].

Dari keseluruhan metode diatas, sebenarnya telah mengalami banyak sekali peningkatan, dibandingkan dulu yang pada awalnya masih mengandalkan tenaga operator yang berpengalaman. Jadi ketika gangguan terjadi pada titik yang tidak diketahui, kemudian mencari data dari orang lapangan estimasi gangguan secara lokal, kemudian dari laporan tersebut dilakukan pencarian secara manual [6,18]. Kemudian dalam perkembangannya bermunculan berbagai teknik seperti yang diceritakan diatas.

Saat ini metode-metode modern telah banyak dikembangkan, diantaranya adalah dengan metode injeksi impulse yang meliputi pulse reflection methode dan audio frequency methode. Metode refleksi [6,18] Secara prinsip operasi metode ini dilakukan dengan menginjeksikan tegangan DC pada kabel yang akan di test. Pulsa akan berjalan sepanjang kabel hingga menemukan kesalahan impedansi seperti : sambungan, tee box, open circuit atau short circuit. Perubahan impedansi ini mengakibatkan pemantulan (refleksi), yang kembali pada ujung kabel dan diterima oleh alat location detector. Selanjutnya akan dibandingkan kondisi normal dengan kondisi terdapat gangguan, dan akan diperoleh perbedaan waktu dimana keuda sinyal berpisah satu dengan yang lain dengan pertama sinyal impulse diinjeksikan. Maka lokasi gangguan dapat dihitung dengan persamaan gelombang ($s=Vt/2$). Dimana V adalah kecepatan gelombang dalam progapagis udara yang nilainya mendekati kecepatan cahaya.

2.2 Teori Dasar

Di dalam penelitian ini akan dibahas mengenai pendeteksian lokasi gangguan pada sistem distribusi 20 kV, dengan menggunakan metode Injeksi Tegangan Impulse. Tegangan impulse diinjeksikan pada jaringan setiap detiknya dan disaat yang bersamaan dilakukan perekaman terhadap respon impulse *pre-fault* dan *after fault* [6]. Respon dari dua keadaan tersebut dibandingkan kemudian diketahui waktu dimana terjadi perbedaan tersebut, kemudian lakukan perhitungan lokasi gangguannya. Untuk dapat memahami secara utuh mengenai anaislsi

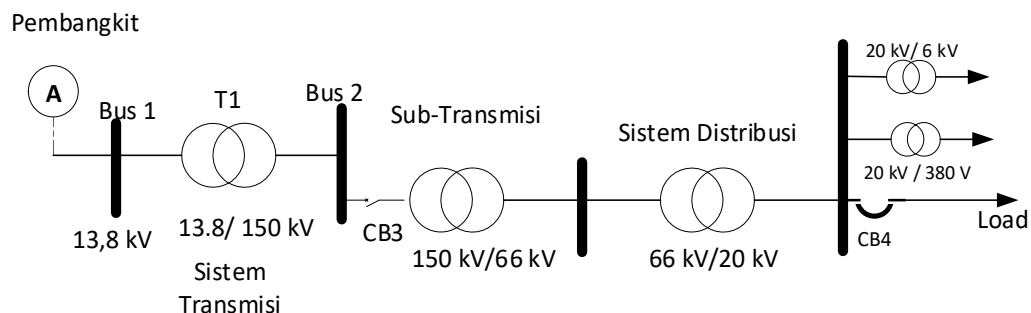
gangguan menggunakan metode injeksi impulse ini, maka ada beberapa teori yang harus kita pelajari, diantaranya:

1. Sistem Distribusi [1,4,8];
2. Study Aliran Daya untuk sistem radial [1,4];
3. Komponen Simetris [10,12, 20,24];
4. Analisis gangguan pada sistem tenaga listrik [10,12, 20,24];
5. Impedansi sistem Distribusi [8];
6. Impulse dan karakteristiknya [6,13,14,15,16,17,18];
7. *Adaptive Neuro Fuzzy (ANFIS)* [2,5,12].

Selain tujuh poin diatas, kita juga perlu mengenal dan belajar beberapa software terkait analisis ETAP dan MATLAB, dimana software-software tersebut diharapkan mampu membantu kita dalam melakukan analisis, atau setidaknya memberikam komparasi terhadap hasil yang ingin disimulasikan.

2.2.1 Sistem Distribusi [1,4,8];

Dalam penyelaruan energi listrik mulai dari tempat produksi listrik hingga ke pelanggan, ada dua bagian yang kita kenal sebagai sistem transmisi dan sistem distribusi. Sistem transmisi merupakan istilah yang digunakan oleh PLN untuk semua jaringan yang dari tempat produksi hingga ke Gardu Induk, sedangkan saluran distribusi adalah semua saluran mulai dari gardu induk hingga ke konsumen. Pada Jaringan Sistem Distribusi ini level tegangan yang digunakan adalah 20 kV, 12 kV, 6 kV atau 380 V. Penggunaan tegangan berbeda didasarkan pada Panjang saluran pada suatu sistem dengan tujuan untuk mengurangi rugi-rugi pada saluran.



Gambar 2. 1 Sistem Pendistribusian Listrik Mulai dari Pembangkit

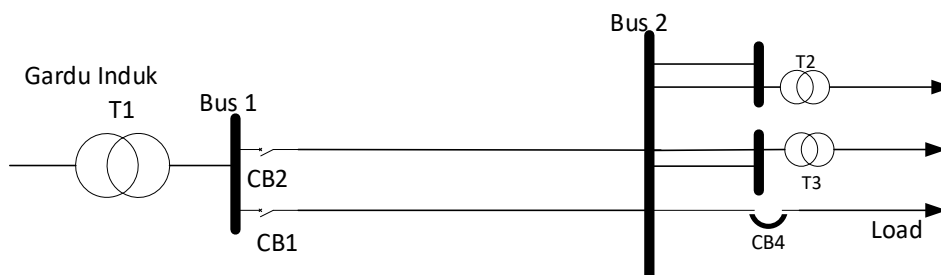
2.2.1.1 Sistem Distribusi Radial [1,4]

Berikut ini adalah topologi dari sistem radial, dimana sistem distribusi 20 kV banyak yang menggunakan tipe ini



Gambar 2. 2 Sistem Distribusi Radial

Keuntungannya, jika terjadi gangguan di T2 maka proteksi yang trip hanya di T2 dan tidak mempengaruhi beban dilainnya. Sedang kekurangannya adalah, ketika T2 padam, maka konsumen yang di suplai oleh T2 tidak mendapat sumber dari lainnya. Untuk mengatasi hal ini, biasanya digunakan *feeder* tambahan yang dipasang paralel, namun tentu saja secara ekonomis akan menghaiskan banyak uang.

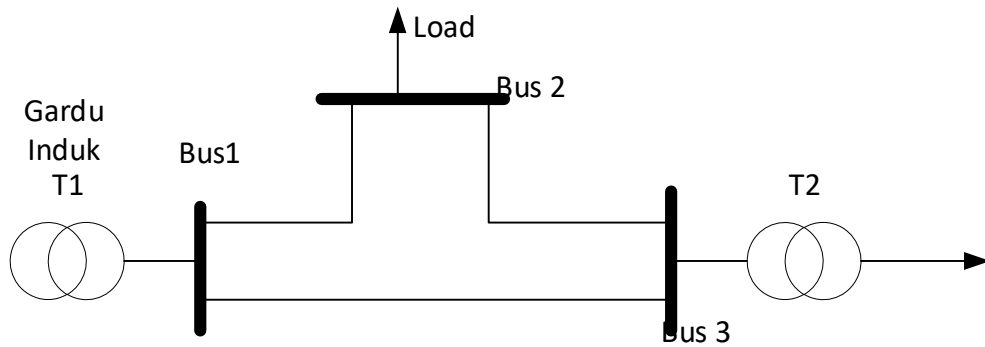


Gambar 2. 3 Sistem Distribusi Radial *Double Feeder*

2.2.1.2 Sistem Distribusi Loop/ Ring [1,4]

Sistem ring ini adalah yang paling favorit dikalangan praktisi,. Pada sistem ini bus saling terhubung, sehingga beban mendapat dua atau lebih sumber yang berbeda, sehingga kontinuitas suplai listrik lebih terjamin, apabila terjadi gangguan. Selain itu topologi ini juga hemat dalam hal penggunaan kabel transmisi. Kekurangannya adalah ketika terjadi

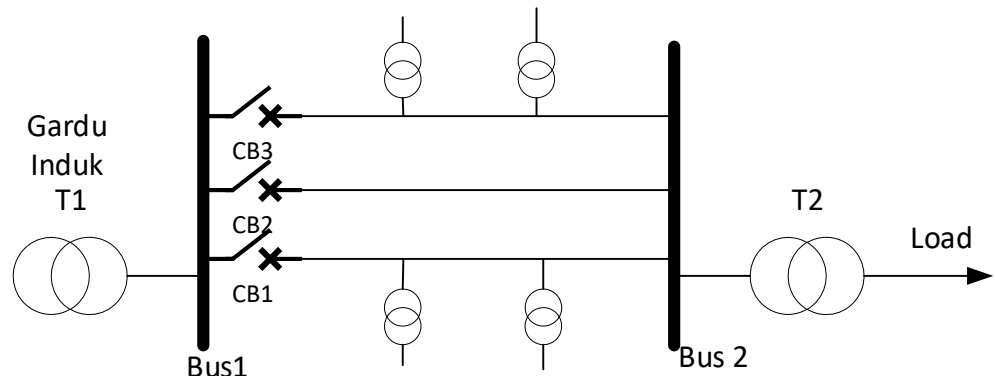
gangguan, maka arus gangguan di bus merupakan akumulasi dari seluruh koneksi, sehingga arus gangguan menjadi lebih besar dibandingkan dengan sistem radial. Proteksi harus bekerja sangat cepat, agar konsumen tidak terganggu, karena arus gangguan yang besar.



Gambar 2. 4 Sistem Distribusi Ring

2.2.1.3 Sistem Distribusi Spindel [1,4]

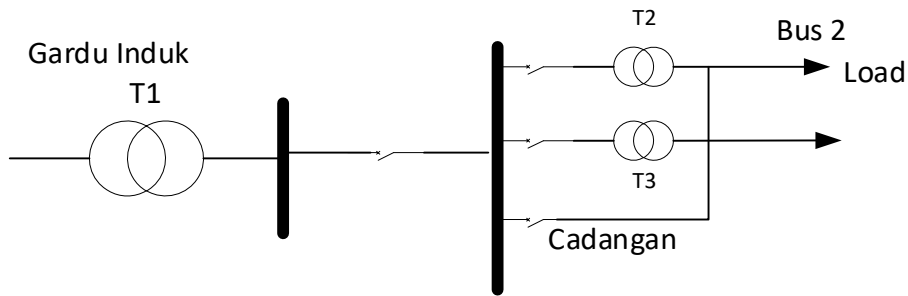
Topologi spindel ini adalah gabungan antara ring dan radial.



Gambar 2. 5 Sistem Distribusi Spindel

2.2.1.4 Sistem Distribusi Cluster [1,4]

Jenis topologi cluster ini, mirip radial hanya saja ada penyulang cadangan yang akan difungsikan ketika ada gangguan di sisi penyulang utama.



Gambar 2. 6 Sistem Distribusi Cluster

Dalam kasis sistem distribusi 20 kV yang digunakan dalam buku ini, adalah sistem distribusi udara dengan topologi radial. Pemilihan ini dilakukan karena merupakan jenis topologi yang paling banyak digunakan di Indonesia.

2.2.2 Analisis Aliran Daya Dengan Metode Backward Forward [1,4]

Salah satu metode yang digunakan untuk analisis sistem distribusi radial adalah sistem backward Forward, ini sedikit berbeda dengan metode yang digunakan untuk sistem *loop* atau *network*, hal karena memang sistem radial ini memiliki karakter topologi yang berbeda.

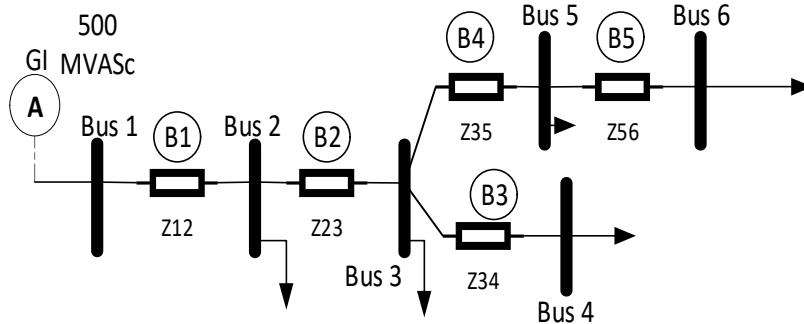
Metode Backward Forward ini menggunakan karakteristik percabangan. Selain hal itu, matrik impedansi Z_{br} dan injeksi arus pada jaringan dijadikan referensi untuk perhitungan. Metode Backward Forward ini memiliki keunggulan dibanding dengan metode lain dari sisi akurasi dan efisiensi. Metode ini merujuk pada teori Grap yang diperkenalkan oleh Leonhard Euler pada tahun 1736 dimana teori ini mengacu pada node dan elemen yang menghubungkan antara node.

Metode ini diawali dengan mencari arus setiap saluran menggunakan persamaan daya:

$$I_i = \left(\frac{P_i + jQ_i}{V_i} \right)^* \quad (2.1)$$

Keterangan:

- P_i = Daya aktif pada bus ke-i
- Q_i = Daya reaktif bus ke-i
- V_i = Tegangan bus ke-i
- I_i = Arus bus ke i



Gambar 2. 7 Sistem Distribusi Radial 20 kV

Jika persamaan arus pada jaringan disimbolkan B1, B2, B3, B4 dan B5, maka kita dapat tuliskan persamaan *backward forward* untuk arus sebagai berikut:

$$\begin{aligned}
 B5 &= I_6 \\
 B4 &= I_5 + I_6 \\
 B3 &= I_4 \\
 B2 &= I_3 + I_4 + I_5 + I_6 \\
 B1 &= I_2 + I_3 + I_4 + I_5 + I_6
 \end{aligned}
 \tag{2. 2}$$

Atau kita dapat tuliskan dalam bentuk matriks injeksi arus *atau Matrix Bus Injection to Branch Current* (BIBC) sebagai berikut:

$$\begin{bmatrix} B1 \\ B2 \\ B3 \\ B4 \\ B5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_2 \\ I_3 \\ I_4 \\ I_5 \\ I_6 \end{bmatrix}$$

Pesamaan diatas dapat dituliskan dalam bentuk lebih sederhana sebagai berikut:

$$[B_i] = [BIBC][I_i]
 \tag{2. 3}$$

Keterangan:

I_i = Arus dari bus - i

B_i = Persamaan arus bus ke- i

BIBC = Matrix Bus Injection to brachn current

Selanjutnya kita perhatikan drop tegangan antar node berdekatan adalah:

$$\begin{aligned}
V_1 - V_2 &= I_{12}Z_{12} = B1Z_{12} \\
V_1 - V_3 &= I_{12}Z_{12} + I_{23}Z_{23} = B1Z_{12} + B2Z_{23} \\
V_1 - V_4 &= I_{12}Z_{12} + I_{23}Z_{23} + I_{34}Z_{34} = B1Z_{12} + B2Z_{23} + B3Z_{34} \\
V_1 - V_5 &= I_{12}Z_{12} + I_{23}Z_{23} + I_{35}Z_{35} = B1Z_{12} + B2Z_{23} + B4Z_{35} \\
V_1 - V_6 &= I_{12}Z_{12} + I_{23}Z_{23} + I_{35}Z_{35} + I_{56}Z_{56} = B1Z_{12} + B2Z_{23} + B4Z_{35} + B5Z_{56}
\end{aligned} \tag{2.4}$$

Dapat kita tuliskan dalam bentuk matriks *Branch Current to Branch Voltage*

$$\begin{bmatrix} V_1 - V_2 \\ V_1 - V_3 \\ V_1 - V_4 \\ V_1 - V_5 \\ V_1 - V_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{12} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ Z_{12} & Z_{23} & 0 & 0 & 0 \\ Z_{12} & Z_{23} & Z_{34} & 0 & 0 \\ Z_{12} & Z_{23} & 0 & Z_{35} & 0 \\ Z_{12} & Z_{23} & 0 & Z_{35} & Z_{56} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} B1 \\ B2 \\ B3 \\ B4 \\ B5 \end{bmatrix}$$

Atau secara sederhana dapat dinyatakan dalam bentuk persamaan berikut:

$$[\Delta V] = [BCBV][B] \tag{2.5}$$

Kita dapat substitusikan persamaan arus yang telah dinyatakan dalam bentuk matrik BIBC:

$$\begin{bmatrix} V_1 - V_2 \\ V_1 - V_3 \\ V_1 - V_4 \\ V_1 - V_5 \\ V_1 - V_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{12} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ Z_{12} & Z_{23} & 0 & 0 & 0 \\ Z_{12} & Z_{23} & Z_{34} & 0 & 0 \\ Z_{12} & Z_{23} & 0 & Z_{35} & 0 \\ Z_{12} & Z_{23} & 0 & Z_{35} & Z_{56} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_2 \\ I_3 \\ I_4 \\ I_5 \\ I_6 \end{bmatrix}$$

Atau dapat kita tulis dalam bentuk sederhana,

$$[\Delta V] = [BCBV][BIBC][I] \tag{2.6}$$

Tegangan akhir dapat dicari dengan persamaan 1 secara berulang, tetapi nilai dari V_i diubah menjadi:

$$V_i = V'_i - \Delta V \tag{2.7}$$

Keterangan:

- V_i = Tegangan bus ke- i
- V'_i = Tegangan bus ke- i lama
- ΔV = Drop tegangan bus
- $BCBV$ = Matix bus *branch current branch voltage*
- $BIBC$ = Matrix bus *branch injection to branch current*

2.2.3 Komponen Simetris [10,24]

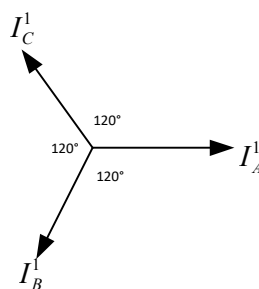
Gangguan adalah kegagalan penyaluran listrik akibat gangguan dari internal maupun eksternal. Gangguan dari dalam sistem contohnya: tegangan dan arus tidak normal (*unbalance*), pemasangan device yang tidak baik, penuaan peralatan. Gangguan dari luar sendiri misalnya galian, hujan, petir, pohon tumbang, dan juga hewan. Gangguan ini dapat bersifat sementara dan juga dapat bersifat permanen.

Pada sistem tenaga listrik biasanya digunakan pendekatan satu fasa dalam hal analisis, karena kemudahannya. Pada sistem 3 fasa seimbang, digambarkan dengan fasor yang terpisah sebesar 120° antar urutan fasa (fasa A, fasa B, dan fasa C). Saat terjadi gangguan (*fault*) maka kesimetrisan ini akan hilang, menjadi bentuk yang tidak simetris, sehingga dibutuhkan transformasi kedalam bentuk komponen simetris untuk melakukan analisis per fasa, yakni yang kita kenal sebagai urutan positif (“1”, *Positive Sequence*), urutan negatif (“2”, *Negative Sequence*) dan urutan nol (“0”, *Zero Sequence*).

2.2.3.1 Positive Sequence, Negative Sequence, and Zero Sequence

a. Positive Sequence

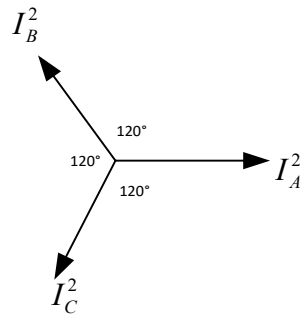
Terdiri dari 3 buah fasor yang sama besarnya dan terpisah sebesar 120° , dengan arah putaran searah jarum jam / sama dengan fasor aslinya (abc).



Gambar 2. 8 Fasor Positif Sequence “1”

b. Negative Sequence

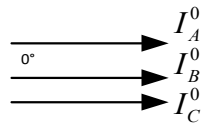
Terdiri atas 3 buah fasor yang sama besarnya dan terpisah sebesar 120° , namun berlawanan arah dengan fasor aslinya (acb).



Gambar 2. 9 Fasor Negative Sequence “2”

c. Zero Sequence

Terdiri dari tiga fasor yang besarnya sama, dan satu fasor terletak pada fasa 0° .



Gambar 2. 10 Fasor Zero Sequence “0”

Dengan fasor-fasor yang ada diatas, maka kita dapat jabarkan arus dan tegangan fasa dalam komponen simetri, yakni sebagai berikut:

$$\begin{aligned}
 I_A &= I_A^0 + I_A^1 + I_A^2 \\
 I_B &= I_B^0 + I_B^1 + I_B^2 \\
 I_C &= I_C^0 + I_C^1 + I_C^2
 \end{aligned}
 \tag{2. 8}$$

Atau dapat dinyatakan dalam bentuk matriks

$$\begin{bmatrix} I_A \\ I_B \\ I_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_A^0 \\ I_B^0 \\ I_C^0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} I_A^1 \\ I_B^1 \\ I_C^1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} I_A^2 \\ I_B^2 \\ I_C^2 \end{bmatrix}
 \tag{2. 9}$$

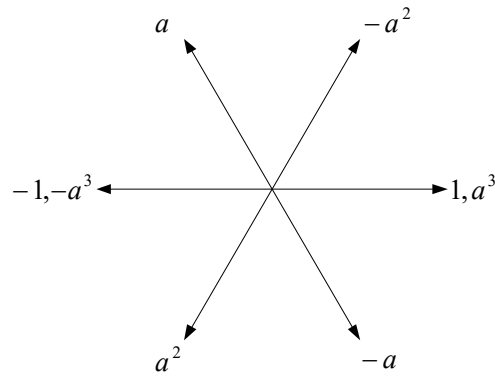
Hal pertama yang perlu kita perhatikan adalah, bahwa nilai dari *Zero Sequence* adalah sama yakni,

$$I_A^0 = I_B^0 = I_C^0
 \tag{2. 10}$$

Keterangan :

I_A, I_B, I_C = Arus fasa A, B dan C
 I^0, I^1, I^2 = Arus fasa urutan zero, positif dan negative

Sedang untuk urutan positif dan negatif, sebenarnya secara *magnitude* sama, namun hanya terpisahkan sejauh satu sama lain yakni 120° . Untuk kemudahan dalam pemahaman, kita akan gambarkan sebuah operator A, dimana kita akan merekasaya persamaan 9 untuk dinyatakan semua elemen dalam arus fasa A,



Gambar 2. 11 Operator “a”

Dari gambar di atas, maka dapat kita definisikan nilai operator “a” tersebut,

$$a = 1\angle 120^\circ \quad (2.11)$$

dapat kita nyatakan dalam bentuk kompleks (x+jb):

$$a = 1\angle 120^\circ = -0.5 + j0.866$$

$$a^2 = (1\angle 120^\circ)(1\angle 120^\circ) = 1\angle 240^\circ = 0.5 + j0.866$$

$$a^3 = (1\angle 120^\circ)(1\angle 120^\circ)(1\angle 120^\circ) = 1\angle 0^\circ = 1 + j0$$

Sehingga kita dapatkan

$$1 + a + a^2 = 0 \quad (2.12)$$

Dengan operator “a” ini, kita dapat didefinisikan kembali persamaan arus fasa dengan menyatakan semua persamaan dalam arus fasa A, yakni:

$$\begin{aligned} I_A &= I_A^0 + I_A^1 + I_A^2 \\ I_B &= I_A^0 + a^2 I_A^1 + a I_A^2 \\ I_C &= I_A^0 + a I_A^1 + a^2 I_A^2 \end{aligned} \quad (2.13)$$

Atau kita dapat nyatakan dalam bentuk matriks

$$\begin{bmatrix} I_A \\ I_B \\ I_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_A^0 \\ I_A^1 \\ I_A^2 \end{bmatrix} \text{ atau sederhananya adalah } I_{ABC} = AI^{012} \quad (2.14)$$

Dari persamaan 14 kita dapat membaliknyanya untuk mencari nilai arus urutan yakni

$$I^{012} = A^{-1} I_{ABC} \quad (2.15)$$

Dengan nilai dari inverst matriks A, A^{-1} sebagai berikut

$$A^{-1} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \quad (2.16)$$

Maka didapatkan persamaan baru untuk arus urutan 1,2, dan 0 adalah :

$$\begin{bmatrix} I_A^0 \\ I_A^1 \\ I_A^2 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_A \\ I_B \\ I_C \end{bmatrix} \quad (2.17)$$

Atau komponen simetrisnya dapat dinyatakan,

$$\begin{aligned} I_A^0 &= \frac{1}{3}(I_A + I_B + I_C) \\ I_A^1 &= \frac{1}{3}(I_A + aI_B + a^2I_C) \\ I_A^2 &= \frac{1}{3}(I_A + a^2I_B + aI_C) \end{aligned} \quad (2.18)$$

Dengan cara yang sama kita dapat mencari nilai transformasi dari tegangan pase kedalam bentuk urutan 0, 1 dan 2

$$\begin{aligned} V_A &= V_A^0 + V_A^1 + V_A^2 \\ V_B &= V_A^0 + a^2V_A^1 + aV_A^2 \\ V_C &= V_A^0 + aV_A^1 + a^2V_A^2 \end{aligned} \quad (2.19)$$

Atau dapat dinyatakan dalam bentuk matriks

$$V_{ABC} = AV^{012} \quad (2.20)$$

Keterangan:

- I^{012} = Arus urutan nol, positif dan negatif
- I^{ABC} = Arus fasa A, B dan C
- V_{ABC} = Tegangan fasa A, B dan C
- V^{012} = Tegangan urutan nol, positif dan negative
- a = Operator ($1 < 120^\circ$)

Sehingga, apabila dibalik untuk mencari nilai dari tegangan urutan 0,1 dan 2 adalah

$$\begin{bmatrix} V_A^0 \\ V_A^1 \\ V_A^2 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_A \\ V_B \\ V_C \end{bmatrix} \quad (2.21)$$

atau dinyatakan dengan,

$$\begin{aligned} V_A^0 &= \frac{1}{3}(V_A + V_B + V_C) \\ V_A^1 &= \frac{1}{3}(V_A + aV_B + a^2V_C) \\ V_A^2 &= \frac{1}{3}(V_A + a^2V_B + aV_C) \end{aligned} \quad (2.22)$$

2.2.3.2 Daya Kompleks Komponen Simetris

Daya tiga fasa, dapat dinyatakan sebagai penjumlahan daya per fasa, atau secara matematis dapat dituliskan,

$$S = P + jQ = V_A I_A^* + V_B I_B^* + V_C I_C^* \quad (2.23)$$

Persamaan ini dapat dinyatakan dalam bentuk vector,

$$S = \begin{bmatrix} V_A & V_B & V_C \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_A \\ I_B \\ I_C \end{bmatrix}^* = \begin{bmatrix} V_A \\ V_B \\ V_C \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} I_A \\ I_B \\ I_C \end{bmatrix}^* \quad (2.24)$$

Dengan melakukan rekayasa matriks, maka kita akan cari hubungan daya per phase dengan daya pada urutan

$$\begin{aligned} S &= [V_{ABC}]^T \cdot [I_{ABC}]^* \\ &= [A \cdot V^{012}]^T [A \cdot I^{012}]^* \\ &= [V^{012}]^T \cdot A^T \cdot A^* \cdot [I^{012}]^* \end{aligned} \quad (2.25)$$

Keterangan:

S = Daya kompleks (*Volt-Amper*)

P = Daya aktif (*Watt*)

I_A^*, I_B^*, I_C^* = Arus fasa A, B, C *conjugate*

A^T = tansphose matix A

V^{012} = Tegangan urutan nol, pisitif dan negative

V_{ABC} = Tegangan urutan A, B dan C

Selanjutnya dapat dilakukan substitusi persamaan 25, sehingga diperoleh:

$$S = \begin{bmatrix} V_A^0 & V_A^1 & V_A^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_A^0 \\ I_A^1 \\ I_A^2 \end{bmatrix}^* = 3 \begin{bmatrix} V_A^0 & V_A^1 & V_A^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_A^0 \\ I_A^1 \\ I_A^2 \end{bmatrix}^*$$

Maka disimpulkan bahwa Daya 3 fasa tidak seimbang adalah:

$$V_{AN} I_A^* + V_{BN} I_B^* + V_{CN} I_C^* = 3(V_A^0 I_A^0) + 3(V_A^1 I_A^1) + 3(V_A^2 I_A^2) \quad (2. 26)$$

Keterangan:

V_{AN} =Tegangan fasa A, B, dan C ke netral

V_{BN} =Tegangan fasa B ke netral

V_{CN} =Tegangan fasa C ke Netral

2.2.4 Tipe Gangguan [10,20,24,25]

Terdapat 2 jenis gangguan yang terjadi pada sistem transmisi, yakni:

1. Gangguan simetris
2. Gangguan tidak simetris.

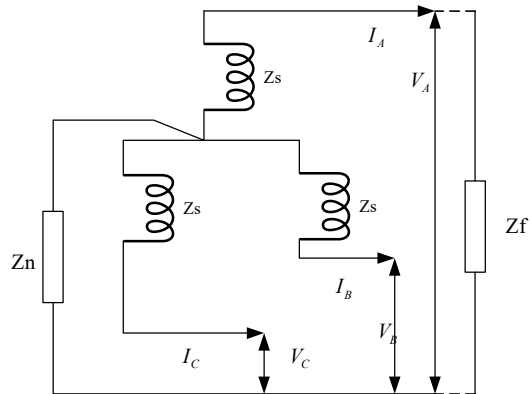
Gangguan simetris ini contohnya adalah gangguan 3 fasa (L-L-L) sedangkan gangguan non simetris ini misalnya gangguan 1 fasa ketanah (L-G), 2 fasa (L-L), dan dua fasa ke tanah (L-L-G). Sebagian besar gangguan yang ada di jaringan adalah gangguan tidak simetris atau tidak seimbang.

Sebagian tambahan, gangguan juga dapat dikategorikan sebagai,

1. shunt fault (gangguan paralel)
2. Series fault (gangguan seri)

Gangguan seri ini merupakan tipe gangguan yang terjadi pada impedansi line dan tidak melibatkan netral atau *ground*, dan tidak melibatkan phase yang lain. Tipe gangguan seri ini biasanya cirinya tegangan meningkat sedangkan arus menurun. Contoh gangguan seri ini adalah terbukanya dua atau satu buah *circuit breaker*. Sedangkan untuk gangguan paralel, cirinya adalah arusnya naik, sedangkan tegangan dan frekuensi turun. Contoh dari gangguan ini adalah semua gangguan yang melibatkan fasa dan *ground*.

2.2.4.1 Satu fasa ke tanah



Gambar 2. 12 Gangguan Satu Fasa ke Tanah

Ketika terjadi *short circuit* pada fasa A, maka arus I_a akan mengalir melalui Z_f menuju Ground, sehingga persamaan tegangan pada fasa A dan arus pada saluran adalah,

$$\begin{aligned} V_A &= I_A Z_f \\ I_B &= I_C = 0 \end{aligned} \quad (2.27)$$

Jika diuraikan dalam bentuk arus urutan maka,

$$V_A = V_A^0 + V_A^1 + V_A^2 = I_A Z_f \quad (2.28)$$

Sedangkan untuk arus urutan dapat kita uraikan

$$\begin{bmatrix} I_A^0 \\ I_A^1 \\ I_A^2 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_A = I_f \\ I_B = 0 \\ I_C = 0 \end{bmatrix}$$

Maka arus urutan kita dapatkan

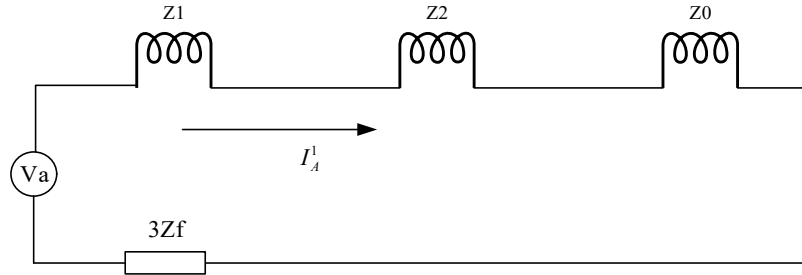
$$I_A^0 = I_A^1 = I_A^2 = \frac{I_f}{3} \text{ atau } I_f = I_A = 3I_A^1, \text{ sehingga}$$

$$V_A = 3Z_f I_A^1 = 3V_f \quad (2.29)$$

Keterangan:

- Z_f = Fault impedance
- Z_n = Neutral impedance
- Z_s = Phase Impedance

Jika kita deskripsikan dalam bentuk jaringan yang terhubung seri, maka kita dapatkan nilai dari arus hubung singkat satu fasa ke tanah adalah sebagai berikut:



Gambar 2. 13 Hubungan Jaringan Urutan untuk Gangguan Satu Fasa ke Tanah

Persamaan generator berbeban adalah:

$$\begin{aligned} V_A^0 &= 0 - Z^0 I_A^0 \\ V_A^1 &= E_A - Z^1 I_A^1 \\ V_A^2 &= 0 - Z^2 I_A^2 \end{aligned} \quad (2. 30)$$

Maka,

$$V_A = V_A^0 + V_A^1 + V_A^2 = E_A - I_A^0 (Z^0 + Z^1 + Z^2) = 3I_A^0 Z_f, \text{ sehingga}$$

$$I_A^0 = \frac{E_A}{Z^0 + Z^1 + Z^2 + 3Z_f} \quad (2. 31)$$

Atau dapat dituliskan bahwa arus gangguan pada gangguan satu fasa ke tanah adalah:

$$I_f = \frac{V_A}{Z^1 + Z^2 + Z^0 + 3Z_f} = \frac{3V_f}{Z^1 + Z^2 + Z^0 + 3Z_f} = \frac{\sqrt{3}V_{LL}}{Z^1 + Z^2 + Z^0 + 3Z_f} \quad (2. 32)$$

Pendekatan lain, dengan asumsi nilai impedansi urutan adalah sama,

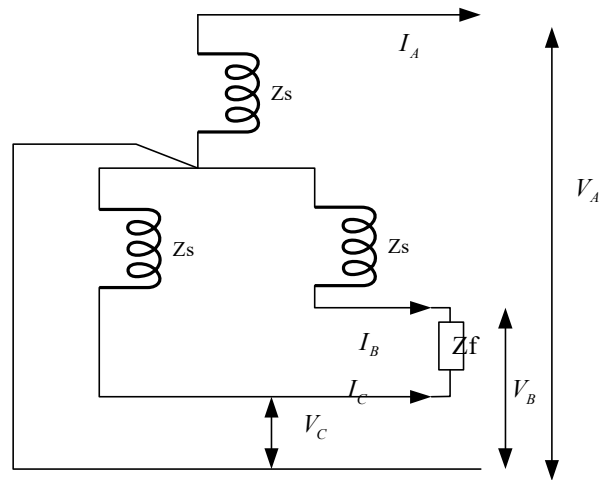
$$I_f = \frac{\sqrt{3}V_{LL}}{X^1 + X^2 + X^0} = \frac{\sqrt{3}V_{LL}}{3X^1} = \frac{V_{LL}}{\sqrt{3}X^1} = \frac{V_{LN}}{X^1} \quad (2. 33)$$

Arus gangguan satu fasa memiliki nilai yang sama dengan gangguan tiga fasa, sehingga butuh pemasangan (*Neutral grounding Resistance*) NGR untuk membatasi arus gangguan, yang dipasang pada transformer).

Keterangan:

- V_f = Tegangan gangguan
- V_{LL} = Tegangan line to line
- V_{LN} = Tegangan line to neutral
- Z^1, Z^2, Z^0 = Impedansi urutan positif, negatif dan nol
- X^1, X^2, X^0 = Reaktansi urutan positif, negatif dan nol

2.2.4.2 Dua Fasa



Gambar 2. 14 Gangguan 2 Fasa

Dengan merujuk pada gambar diatas, maka ketika terjadi gangguan dua fasa, maka yang terjadi pada arus fasa adalah:

$$\begin{aligned} I_A &= 0 \\ I_B &= -I_C \end{aligned} \quad (2.34)$$

Sedangkan pada tegangan, kita dapatkan

$$V_B - V_C = Z_f I_B \quad (2.35)$$

Sekarang kita bisa substitusikan persamaan dalam bentuk arus urutan sebagai berikut,

$$\begin{bmatrix} I_A^0 \\ I_A^1 \\ I_A^2 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ I_B \\ -I_B \end{bmatrix}$$

Sehingga,

$$\begin{aligned} I_A^0 &= 0 \\ I_A^1 &= \frac{1}{3}(a - a^2)I_B \\ I_A^2 &= -\frac{1}{3}(a - a^2)I_B \end{aligned} \quad (2.36)$$

Maka disimpulkan bahawa

$$I_A^1 = -I_A^2 \quad (2.37)$$

Sedangkan untuk persamaan tegangan kita dapat turun dari dua persamaa berikut,

$$V_B - V_C = Z_f I_B \quad (2.38)$$

dimana

$$\begin{aligned} V_A &= V_A^0 + V_A^1 + V_A^2 \\ V_B &= V_A^0 + a^2 V_A^1 + a V_A^2 \\ V_C &= V_A^0 + a V_A^1 + a^2 V_A^2 \end{aligned}$$

Sehingga diperoleh persamaan baru

$$\begin{aligned} V_B - V_C &= Z_f I_B = V_A^1(a^2 - a) + V_A^2(a - a^2) \\ V_B - V_C &= Z_f I_B = (a^2 - a)(V_A^1 - V_A^2) \end{aligned} \quad (2.39)$$

Merujuk pada persamaan generator berbeban pada persamaan 30, maka kita bisa substitusikan nilai tegangan $(V_A^1 - V_A^2)$, sehingga kita dapat tuliskan:

$$\begin{aligned} (V_A^1 - V_A^2) &= (E_A - Z^1 I_A^1) - (0 - Z^2 I_A^2) \\ (V_A^1 - V_A^2) &= E_A - I_A^1(Z^1 + Z^2) = Z_f I_B \end{aligned} \quad (2.40)$$

Sedangkan $I_A^1 = \frac{1}{3}(a - a^2)I_B$ atau $I_B = \frac{3I_A^1}{(a - a^2)}$, maka

$$\begin{aligned} E_A - I_A^1(Z^1 + Z^2) &= Z_f I_B \\ (a^2 - a)(E_A - I_A^1(Z^1 + Z^2)) &= Z_f \left(\frac{3I_A^1}{(a - a^2)} \right) \end{aligned} \quad (2.41)$$

Jika kita selesaikan persamaan 40, maka akan diperoleh persamaan arus sebagai berikut:

$$\begin{aligned} (E_A - I_A^1(Z^1 + Z^2)) &= Z_f \left(\frac{3I_A^1}{(a - a^2)(a^2 - a)} \right) \\ (a - a^2)(a^2 - a) &= 3 \\ E_A - I_A^1(Z^1 + Z^2) &= Z_f I_A^1 \end{aligned}$$

Keterangan:

E_A = Tegangan sumber fasa A

Z^1, Z^2, Z^0 = Impedansi urutan positif, negatif dan nol

Selanjutnya dapat dituliskan,

$$I_A^1 = \frac{E_A}{Z^1 + Z^2 + Z_f} \quad (2.42)$$

Karena $I_f = I_B = \frac{3I_A^1}{(a-a^2)} = -j\sqrt{3}I_A^1$, maka

$$I_f = -j\sqrt{3} \frac{V_f}{Z^1 + Z^2 + Z_f} = 0.866I_{sc3\phi} \quad (2.43)$$

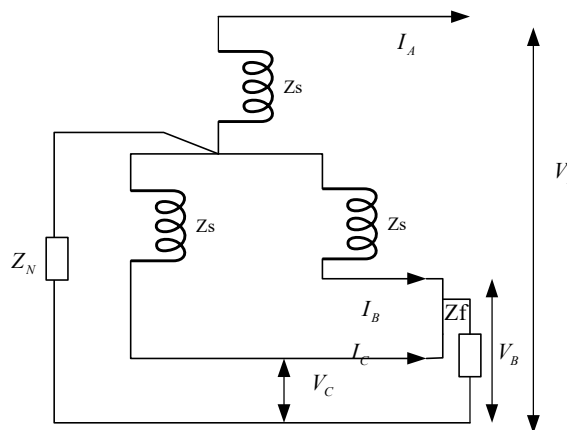
Keterangan

$I_{sc3\phi}$ = Arus short circuit 3 fasa

I_f = Arus short Circuit

V_f =Tegangan Short circuit

2.2.4.3 Dua Fasa Ketanah



Gambar 2. 15 Gangguan 2 Fasa ke Tanah

Pada kondisi gangguan dua fasa ke tanah, pada dasarnya sama dengan gangguan 2 fasa, hanya saja selain terhubung antara fasa juga terhubung dengan ground. Pada kasus gangguan ini fenomena yang terjadi adalah arus pada fasa yang tidak mengalami *short circuit* bernilai nol.

$$I_A = I_A^0 + I_A^1 + I_C^2 = 0 \quad (2.44)$$

Karena secara koneksi fasa B dan C terhubung dengan *ground*, maka secara tegangan akan sama

$$V_B = V_C = Z_f(I_B + I_C) \quad (2.45)$$

Dengan melihat persamaan arus urutan

$$\begin{bmatrix} I_A^0 \\ I_A^1 \\ I_A^2 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_A = 0 \\ I_B \\ I_C \end{bmatrix} \quad \text{dan} \quad \begin{bmatrix} I_A = 0 \\ I_B \\ I_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_A^0 \\ I_A^1 \\ I_A^2 \end{bmatrix}$$

Kita dapatkan persamaan-persamaan arus urutan sebagai berikut

$$I_A^0 = \frac{1}{3}(I_B + I_C) \quad (2.46)$$

Sehingga persamaan tegangan dapat dituliskan kembali

$$V_B = V_C = 3Z_f I_A^0 \quad (2.47)$$

Dari persamaan tegangan

$$\begin{aligned} V_A &= V_A^0 + V_A^1 + V_A^2 \\ V_B &= V_A^0 + a^2 V_A^1 + a V_A^2 \\ V_C &= V_A^0 + a V_A^1 + a^2 V_A^2 \end{aligned} \quad (2.48)$$

Jika tegangan fasa A dan B sama, maka kita dapat turunkan persamaan baru,

$$\begin{aligned} V_A^0 + a^2 V_A^1 + a V_A^2 &= V_A^0 + a V_A^1 + a^2 V_A^2 \\ a^2 V_A^1 + a V_A^2 &= a V_A^1 + a^2 V_A^2 \\ (a^2 - a) V_A^1 &= (a^2 - a) V_A^2 \\ V_A^1 &= V_A^2 \end{aligned} \quad (2.49)$$

Selanjutnya kita dapat substitusikan hasil ini pada persamaan arus urutan ,

$$\begin{aligned} V_C &= 3Z_f I_A^0 \\ V_A^0 + a V_A^1 + a^2 V_A^2 &= 3Z_f I_A^0 \\ V_A^0 + (a + a^2) V_A^1 &= 3Z_f I_A^0 \end{aligned} \quad (2.50)$$

Dengan cara yang sama, dengan melihat persamaan tegangan urutan generator pada persamaan 30, kemudian mensubstitusikan persamaan-persamaan yang ada, pada akhirnya akan diperoleh persamaan dari arus gangguan sebagai berikut:

$$I_A^0 = -\frac{E_A - Z^1 I_A^1}{Z^0 + 3Z_f}$$

$$I_A^2 = -\frac{E_A - Z^1 I_A^1}{Z^2}$$

$$I_A^1 = \frac{E_A}{Z^1 + \frac{Z^2(Z^0 + 3Z_f)}{Z^2 + Z^0 + 3Z_f}}$$
(2. 51)

Dengan persamaan akhir dari arus gangguan dua fasa ketanah adalah

$$I_f = 3I_A^0 = 3\left(-\frac{E_A - Z^1 I_A^1}{Z^0 + 3Z_f}\right)$$
(2. 52)

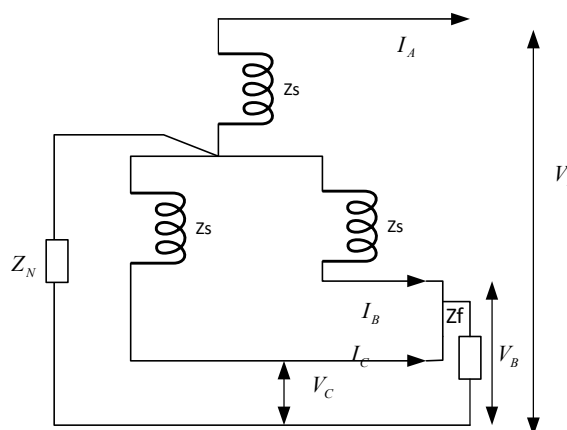
Atau dengan pendekatan lain adalah

$$I_f = \frac{V_{LL}}{X^1 + \frac{X^2 X^0}{X^2 + X^0}}$$
(2. 53)

Jika kita anggap reaktansi urutan positif, negatif dan *zero* adalah sama, maka dapat disederhanakan menjadi

$$I_f = \frac{2V_{LL}}{3X^1} = \frac{2V_{LN}}{\sqrt{3}X^1} = 1.15I_{sc3\phi}$$
(2. 54)

2.2.4.4 Tiga Fasa



Gambar 2. 16 Gangguan Tiga Fasa

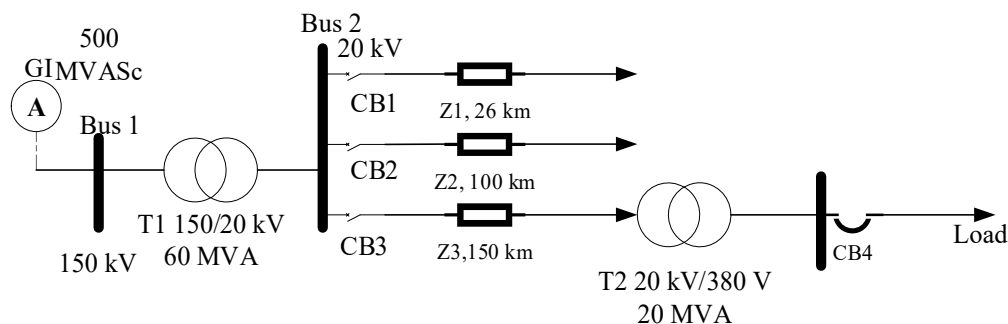
Gangguan ini jarang terjadi, namun apabila terjadi amat sangat membahayakan, karena besarnya magnitudo dari gangguan ini. Besar arus hubung singkat sama dengan arus urutan positif yakni:

$$I_f = I_A^1 = \frac{V_f}{Z^1} = \frac{V_{LN}}{Z^1} = \frac{V_{LL}}{\sqrt{3}Z^1} \quad (2.55)$$

2.2.5 Impedansi Sistem Distribusi [10]

Pada sistem distribusi primer biasanya PLN menggunakan daya 20 kV. Pada Gardu Induk pertama terjadi perurukan tegangan melalui trafo distribusi. Jaringan antara pembangkit ke gardu induk dinamakan jaringan transmisi, sedangkan jaringan antara GI ke konsumen dinamakan jaringan distribusi.

Sistem distribusi terbagi menjadi 2 yakni, sistem distribusi tegangan menengah (20 kV) dan sistem distribusi tegangan rendah (380 V). berikut adalah contoh gambar jaringan distribusi 20 kV.



Gambar 2. 17 *Single Line Diagram (SLD) Jaringan Distribusi 20 kV*

Keterangan:

GI = Gardu Induk

T = Transformator 1

CB = Circuit Breaker

Berdasarkan bentuk jaringannya, sistem distribusi dikelompokkan dalam beberapa katagori yakni, sistem radial, sistem loop, sistem network, dan sistem spindel. Pada sistem distribusi PLN yang banyak digunakan adalah sistem distribusi radial. Untuk dapat melakukan analisis hubung singkat, yang selanjutnya akan dipakai untuk menghitung dimana lokasi gangguan berasal, kita harus mengetahui atau juga melakukan kalkulasi terhadap parameter yang ada pada sistem distribusi, misalnya impedansi urutan positif, negatif dan nol.

2.2.5.1 Impedansi Urutan Sumber

Untuk menghitung impedansi urutan sumber, maka parameter yang dibutuhkan adalah daya hubung singkat 3 fasa, dan 1 fasa (MVAsc) pada sisi tegangan tinggi GI. Impedansi urutan (0,1,2) dapat dihitung dengan persamaan berikut:

$$X_s^1 = X_s^2 = \frac{kV^2}{MVA_{hs-3\emptyset}} \quad (2.56)$$

$$X_s^0 = \frac{3kV^2}{MVA_{hs-3\emptyset}} - (X_s^1 + X_s^2)$$

$$X_s^0 = \frac{3kV^2}{MVA_{hs-3\emptyset}} - 2X_s^1 \quad (2.57)$$

Dengan impedansi sumber: 0

$$\begin{aligned} Z_s^1 &= Z_s^2 = X_s^1 \\ Z_s^0 &= X_s^0 \end{aligned} \quad (2.58)$$

Keterangan:

- X_s^1 = Reaktansi urutan positif sumber
- X_s^2 = Reaktansi urutan negative sumber
- X_s^0 = Reaktansi urutan nol sumber
- $MVA_{hs-3\emptyset}$ = Daya hubung singkat 3 fasa

2.2.5.2 Impedansi Urutan Transformer

Pada perhitungan impedansi trafo, yang dipakai adalah reaktansinya, saja, karena nilai resistansi yang relatif kecil sehingga dapat diabaikan. Dalam trafo parameter yang biasanya dapat diketahui adalah Kapasitas trafo (MVA), Step tegangan misalnya 150 / 20 kV, dan juga reaktansi bocor (X%). Hal dapat dinyatakan dengan:

$$Z_T^1 = Z_T^2 = \frac{kV^2}{MVA_T} X\% \quad (2.59)$$

Keterangan:

- Z_T^1, Z_T^2 = Impedansi tranfo urutan positif dan negative
- X = Reaktansi trafo
- MVA_T = Daya kapasitas trafo

Dari persamaan diatas, impedansi urutan positif dan negatif trafo adalah sama besarnya, sedangkan impedansi urutan tranformator didasarkan pada standard PLN:

$$\begin{aligned} X_T^0 &= X_T^1 = Z_T^1 \text{ untuk } \Delta Y \\ X_T^0 &= 3X_T^1 \text{ untuk } Y_{yd} \\ X_T^0 &= 10X_T^1 \text{ untuk } YY \end{aligned} \quad (2. 60)$$

Keterangan:

ΔY = Koneksi delta-way
 Y_{yd} = Koneksi way-way-delta
 YY = Konksi way-way

2.2.5.3 Impedansi Urutan Saluran

Impedansi urutan saluran untuk urutan positif dan negatif nilainya sama besar, $Z_L^1 = Z_L^2$, sedang untuk impedansi urutan nol memiliki nilai yang berbeda. Semua nilai impedansi ini tergantung dari jenis penghantar yang digunakan, juga diameter dan panjang kabel. Parameter ini harus anda ketahui untuk dapat menyelesaikan analisis penentuan lokasi gangguan.

Bila seluruh parameter telah ada, maka impedansi saluran total dapat dihitung dengan persamaan.

$$Z_{tot} = Z_L l \quad (2. 61)$$

Keterangan

Z_{tot} = Impenansi jaringan total
 Z_L = Impendansi jaringan ohm/ km
 l = panjang jaringan

2.2.6 Respon Impulse [6, 13,14, 15,16,17,18]

2.2.6.1 Tegangan Impulse

Impulse didefinisikan suatu pulsa dengan polaritas tunggal, yang bisa diakibatkan oleh proses *switching* dan sambaran petir. Ada tiga jenis tegangan impulse yang sering digunakan yakni: tegangan impulse persegi, tegangan impulse berbentuk baji, dan tegangan impulse berbentuk eksponensial ganda.

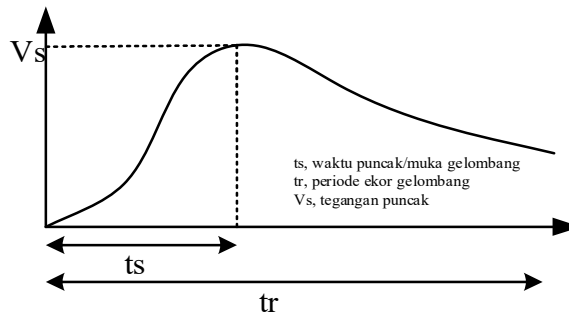
Untuk keperluan pengujian, tegangan impulse eksponensial ganda telah dibakukan menjadi tegangan standar pengujian, yang dirumuskan sebagai berikut:

$$V = V_0 (e^{-\alpha t} - e^{-\beta t}) \quad (2. 62)$$

Keterangan:

- V = Tegangan impulse output
- V_0 = Tegangan DC sumber
- α, β = Koefesien impulse

Persamaan 62 adalah gelombang impulse dengan ciri cepat menuju puncak dan kemudian turun menuju nol. Pulsa impulse ini mudah dibuat yakni dengan menetapkan nilai dari α dan β . Sebagai contoh, untuk mendapatkan bentuk gelombang impulse $1.2 \times 50 \mu s$, maka nilai dari $\alpha=0,0146$ dan $\beta=2.467$, sedangkan tegangan input adalah 1.04 V.

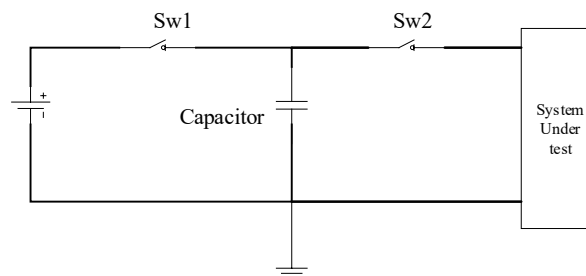


Gambar 2. 18 Respon Tegangan Impulse Exponensial Ganda.

Keterangan:

- t_s = Waktu puncak/muka gelombang/Time rise
- t_r = Periode ekor gelombang
- V_s = tegangan puncak

2.2.6.2 Impulse Generator[30]



Gambar 2. 19 Skema Rangkaian *Switching* Pembangkit Impulse

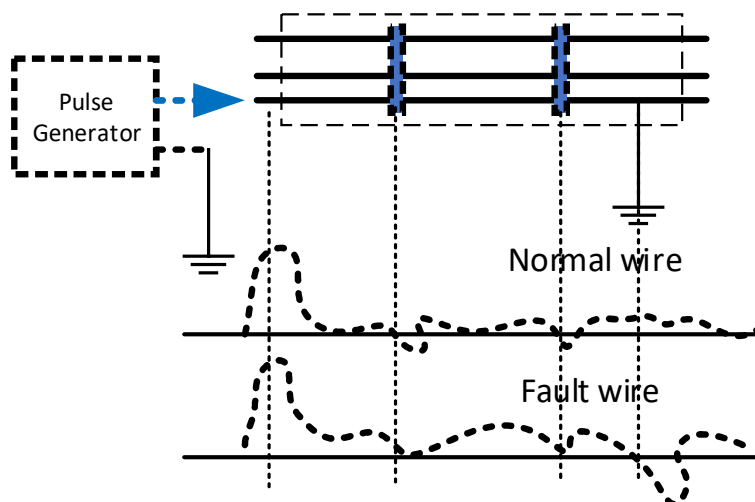
Untuk membangkitkan tegangan impulse, kita perlu membuat desain switching. Prinsip dari pembangkit tegangan impulse ini adalah sebagai berikut

1. Ketika *Switch 1* (Sw 1) aktif maka kapasitor akan *charging*, sedangkan Sw2 dalam posisi off
2. Ketika *Switch 2*(Sw(2) aktif, maka Sw1 mati, dan capacitor mengalami *discharging*.

Dengan memanfaatkan *charging* dan *discharging* dari kapasitor dengan periode tertentu, maka akan diperoleh respon impulse. Pada simulasi digunakan *ideal switch* atau dapat juga digunakan IGBT untuk hasil yang maksimal.

2.2.6.3 Respon Impulse di Jaringan

Perilaku jaringan listrik yang diberi injeksi impulse dapat dideskripsikan dengan *Persamaan Telegraph*, yang mana solusinya adalah penjumlahan dari respon *transient* dan *steadystate*, sedangkan respon *transient* sendiri merupakan penjumlahan dari gelombang awal dan gelombang pantualan.



Gambar 2. 20 Injeksi impulse dan refleksi [18]

Pada gambar 20, sinyal yang dikirim dan yang dipantulkan jika dinyatakan dalam persamaan *telegraph* adalah sebagai berikut:

$$\text{Telegraph Equation} = (\text{Transient} + \text{steadystate})$$

Transient Response = Incident wave + Re flected wave

Re flected wave $(u^-(x,t)) = \text{Incident wave } (u^+(x,t)) * \text{reflection Coefecient } (\Gamma(x,t))$

$$\left(u^-\left(t+\frac{x}{v}\right)\right)=\left(u^+\left(t-\frac{x}{v}\right)\right)*(\Gamma(x,t)) \quad (2.63)$$

$$\Gamma(x,t)=\frac{\left(u^-\left(t+\frac{x}{v}\right)\right)}{\left(u^+\left(t-\frac{x}{v}\right)\right)} \quad (2.64)$$

Dengan kata lain, sinyal kotak dapat didefinisikan sebagai:

$$\frac{H(t)-H(t-T)}{T} \quad (2.65)$$

Jika $T \rightarrow 0$, maka atau didefinikan turunan dari persamaan unit step merupakan sebuah impulse.

Keterangan:

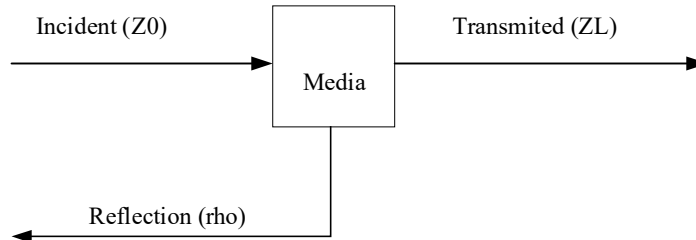
- t = Domain waktu
- x = Jarak tempuh
- v = Kecepatan tempuh
- $H(t)$ = Fungsi alih unit step
- T = Periode unit step

2.2.6.4 Time Domain Reflectometry (TDR)[27-29]

Teknik ini telah digunakan sejak tahun 1930, untuk melakukan pengujian dan karakteristik kabel dan menemukan gangguan. TDR memiliki prinsip seperti radar, pada kabel *device* TDR mengirimkan pulsa tegangan pada kabel, kemudian dengan menggunakan osiloskop akan diamati pulsa refleksi yang dihasilkan oleh sistem. Tentu tegangan pulsa yang diinjeksikan ke kabel akan mengalami perubahan bentuk, akibat impedansi dan karakteristik dari kabel, sehingga apabila ada perbedaan impedansi pada kabel yang terjadi akibat ada gangguan, maka sinyal refleksi juga akan berbeda.

Ketika sebuah pulsa tegangan diinjeksikan pada sebuah media (Z_0 ke Z_L) yang memiliki karakteristik berbeda, maka sinyal akan terbagi dua yakni

sinyal refleksi dan sinyal yang diteruskan pada media kedua. Perhatikan gambar 2.21



Gambar 2. 21 Proses Transmisi Sinyal

Pada dasarnya, sinyal bersal dari sinyal incident yang melalui Z_0 , kemudian satu sinnyal dikembalikan dan satu sinyal lagi diteruskan. Hubungan antar ketiganya dapat dituliskan:

$$\rho = \frac{V_{reflected}}{V_{Incident}} = \frac{Z_L - Z_0}{Z_L + Z_0} \quad (2. 66)$$

Koefesien refraksi (τ), yang nilainya dapat kita hitung dari persamaan berikut.

$$\tau = \rho + 1 = \frac{Z_L - Z_0}{Z_L + Z_0} + 1 = \frac{2Z_L}{Z_L + Z_0} \quad (2. 67)$$

Pada teknik TDR ini terminasi kabel yang ditest diopen diujungnya, sehingga nilai dari Z_L adalah tidak terhingga (*infinity*),sehingga nilai dari koefesien refleksi menjadi 1, hal ini berarti pada kondisi ini pulsa refleksi adalah sama dengan sinyal yang diinjeksikan dengan polaritas yang sama. Perhatikan persamaan berikut ini:

$$\rho = \frac{Z_L - Z_0}{Z_L + Z_0} = \frac{\infty - Z_0}{\infty + Z_0} = 1 \quad (2. 68)$$

Keterangan:

- ρ = Koefesien refleksi
- Z_0 = Impedansi line transmisi
- Z_L = Impendansi beban terhubung
- τ = Koefesien refraksi

Hal ini juga berarti tergantung dari kondisi pengetesan, dimana apabila beban-beban pada jaringan tidak dilepas, maka akan mengandung nilai

impedansi, yang tentunya akan mempengaruhi nilai dari koefisien refleksi, dan hal ini juga berarti terkadang sinyal ini dapat bernilai negatif atau positif tergantung impedansi jaringan.

2.2.7 Adaptive Neuro Fuzzy (ANFIS) [12]

Adaptive Neuro Fuzzy (ANFIS) adalah metode yang menggabungkan antara Fuzzy dengan Jaringan Syaraf Tiruan (JST). Fungsi *rule* pada Fuzzy diidentikkan dengan neuron pada JST. Neuron pada JST berupa bobot sedangkan pada ANFIS berupa logika Fuzzy, sedang perbedaan dengan FIS adalah pembentukan rule dari ANFIS adalah dengan proses pembelajaran (*learning*) yang mirip JST. Pada Matlab, ANFIS dapat dibuat dalam bentuk m-file atau dengan Toolbox-GUI.

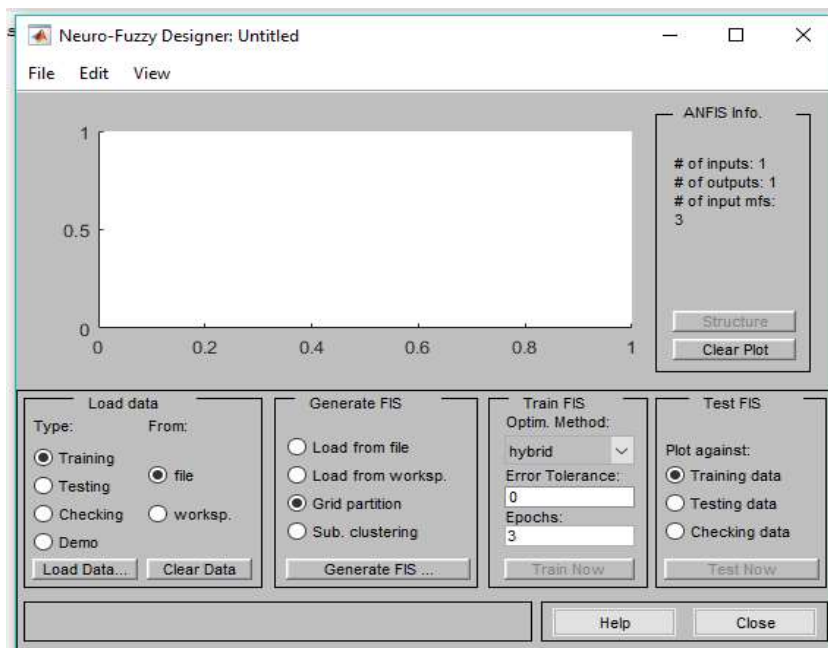
2.2.7.1 Adaptive Neuro Fuzzy (ANFIS) pada Matlab

Cara termudah untuk membuat ANFIS di Matlab adalah dengan menggunakan toolbox yang sudah berbasis GUI. Membuka Editor ANFIS di Matlab dimulai dengan mengetikkan “anfisedit” pada *command window*. Perhatikan Gambar berikut ini.

Ada beberapa poin dalam ANFIS toolbox ini,

1. Grafik Output, untuk menampilkan hasil learning terhadap target
2. *Load data*, mengambil input data dari file yang kita siapkan untuk proses pembelajaran, dapat berupa *file.dat* yang dibuat dengan notepad atau program lainnya dengan ekstensi *dat*, dan *workspace* (dari *command window*).
3. *Generate FIS*, berfungsi untuk membentuk FIS yang akan dilatih dengan jenis fungsi keanggotaan menyertainya.
4. *Train FIS*, digunakan untuk menentukan toleransi kesalahan dan jumlah iterasi/ Epoch serta metode pembelajaran yang dipakai.
5. *Structure*, untuk menampilkan gambar FIS dengan neuron-neuron pembentuknya.
6. *Test FIS*, untuk menguji hasil ANFIS hasil training.

Untuk lebih jelas, dapat dilihat pada gambar berikut ini,



Gambar 2. 22 Editor ANFIS

Pada ANFIS keberhasilan ditentukan oleh data yang menjadi sumber pembelajaran. Data terdiri dari masukan dan target pembelajaran. Data yang dimasukkan ke Editor ANFIS berupa matriks masukan dan target sekaligus, kita hanya perlu menyesuaikan kolom matriks data.

$$\begin{bmatrix} a_1 & b_1 & c_1 \\ a_2 & b_2 & c_2 \\ a_3 & b_3 & c_3 \\ \cdot & \cdot & \cdot \\ a_n & b_n & c_n \end{bmatrix}$$

Keterangan:

$a_1, a_2 \dots a_n$ = Nilai input 1

b_1, b_2, \dots, b_n = Nilai input 2

c_1, c_2, \dots, c_n = Nilai ouput

Contohnya, jika kita hendak membuat ANFIS dengan dua masukan dan satu keluaran, maka data yang dimasukkan ke editor ANFIS harus berupa matriks tiga kolom, kolom pertama dan kedua adalah kolom masukan sedangkan kolom ketiga adalah target. Jumlah baris menyatakan jumlah data yang akan dilatih, semakin banyak dan lengkap maka semakin baik.

2.2.7.1.1 Tahap-tahap proses ANFIS

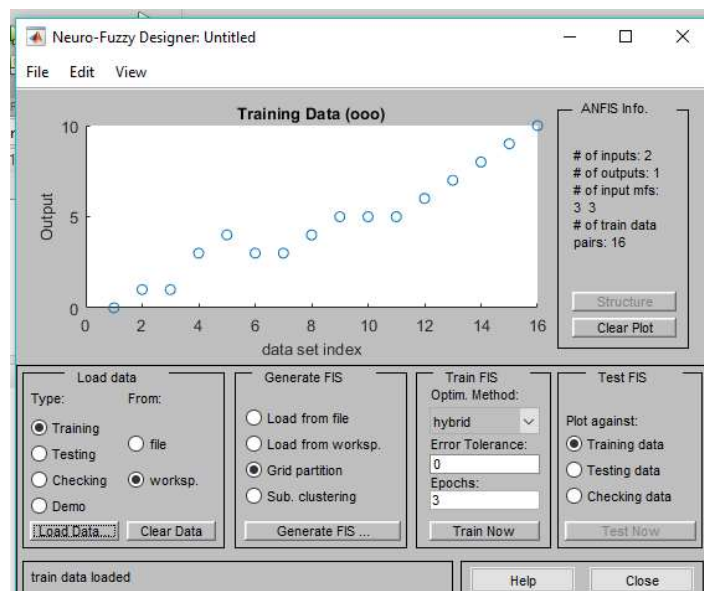
Membuat data untuk training, yakni data input dan output. Data ini adalah data hasil percobaan atau pengamatan, atau hasil perhitungan dimana korelasi input dan output coba untuk dipetakan. Data training ini dapat berupa file Excel yang di load dulu di *command window*, atau dibuat langsung di *command window*, atau juga dibuat file di aplikasi lain dengan format file.dat

Contoh: data *training di workspace*

```
train = [ 0 0 0; 1 0 1; 0 1 1
          2 1 3; 2 2 4; 1 2 3
          3 0 3; 3 1 4; 3 2 5
          4 1 5; 1 4 5; 5 1 6
          5 2 7; 5 3 8; 5 4 9
          5 5 10]
```

1. Load data training

Setelah semua data input output telah ada, maka selanjutnya adalah memload data tersebut dengan anfiseditor.



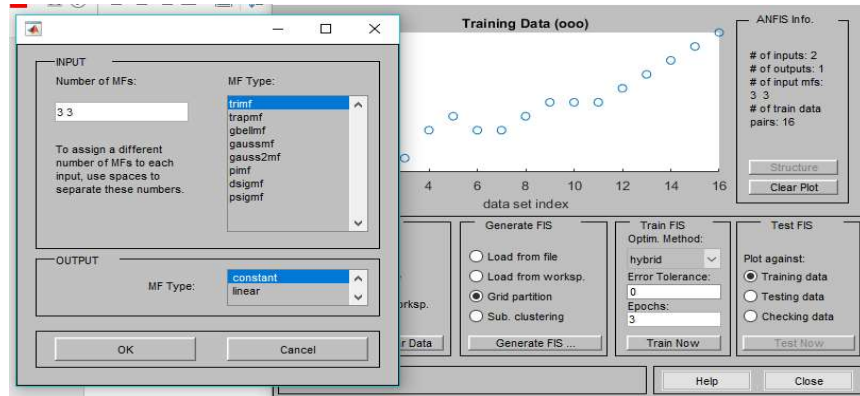
Gambar 2. 23 Loading Data Input Output pada Anfis Editor.

Pada gambar 2.23 kita dapat melihat titik-titik untuk masing-masing data input, data ini dapat kita buat langsung di workspace atau kita dapat memanggilyanya melalui file excel.

2. Generate FIS

a. Load From File

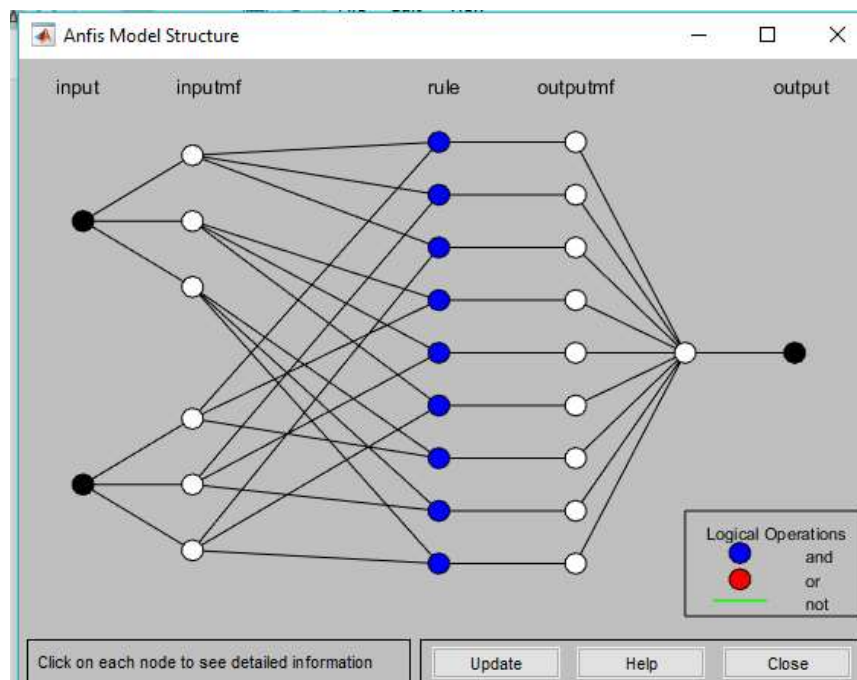
Untuk jenis load from file, artinya kita telah membuat file FIS nya terlebih dahulu secara terpisah. (Fuzzy yang dibuat haruslah tipe Sugeno)



Gambar 2. 24 Generate FIS secara otomatis

b. Otomatis

Untuk jenis otomatis, kita membuat FIS dari anfis editor. Caranya pilih *Grid partition*, dilanjutkan dengan mengklik *Generate FIS*.



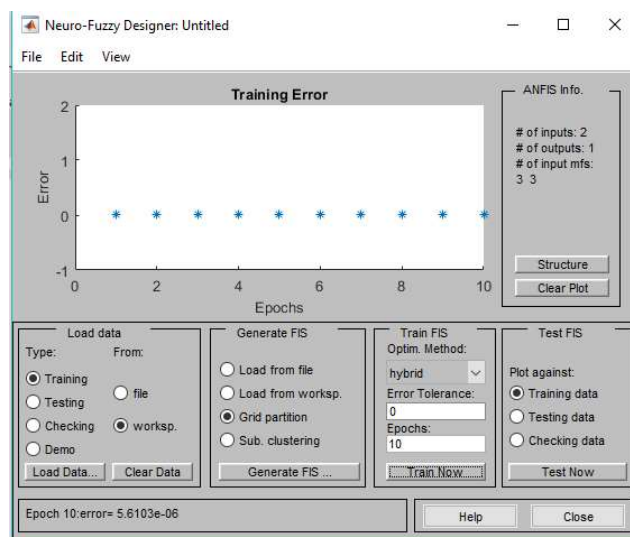
Gambar 2. 25 Struktur ANFIS

Selanjutnya akan muncul jendela isian tentang tipe fungsi keanggotaannya. Pilih missal *gbellmf* dengan masing-masing 3 fungsi , yang pada isian number MFs berisi 3 3, kemudian klik ok. Untuk melihat anfis kita kita dapat mengklik *structure*.

Telihat pada gambar struktur diatas, bahwa ada 2 buah input yang memiliki 3 buah membership function, kemudian masuk pada 9 rule base, dan memiliki 9 ouput, yang selanjutnya digenerate menjadi 1 output.

3. Train FIS

Setelah FIS berhasil di Generate, maka selanjutnya adalah melakukan pelatihan terhadap FIS tersebut, deengan kita menentukan nilai toleransi Error dan juga jumlah iterasi (Epoch). Berikut adalah contoh hasil traning dengan error 0 dan epoch 10 untuk data input ouput diatas.



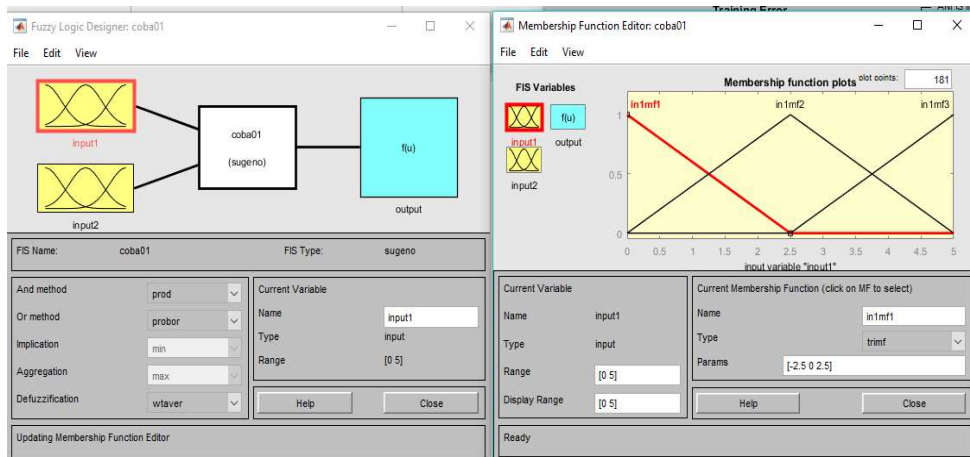
Gambar 2. 26 Hasil Training FIS.

Pada gambar diatas, nilai error menunjukkan nilai nol, hal ini berarti, hasil training menunjukkan hasil yang bagus.

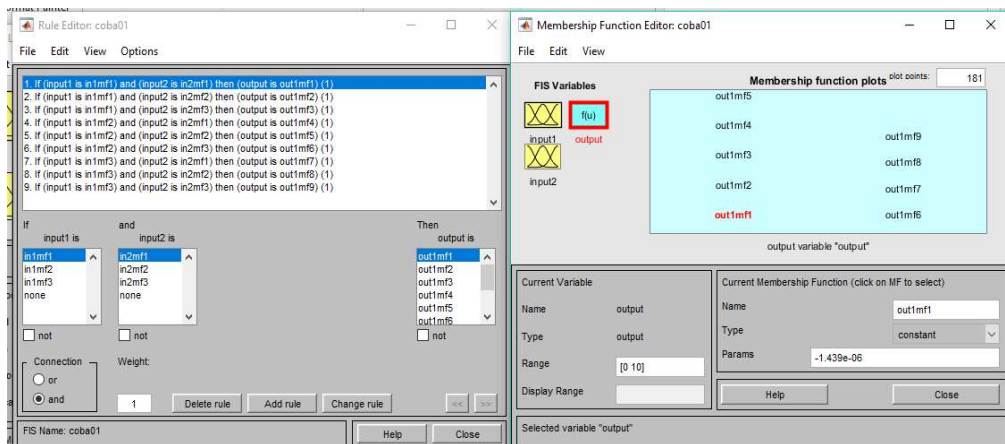
4. Test FIS

Sebelum melakukan *testing*, kita harus simpan terlebih dahulu hasil pembuatan FIS secara otomatis pada step 4 diatas, dengan cara *export to file*. Beri nama "coba01", selanjutnya kita dapat load fuzzy dengan

mengetikkan fuzzy coba01 pada *command window*. Berikut adalah FIS hasil pembuatan dengan *Anfiseditor*:



Gambar 2. 27 Membership Function FIS Hasil Pembuatan dengan ANFIS



Gambar 2. 28 Rule Base dan Membership Ouput.

Jika kita perhatikan FIS hasil dari pembuatan secara otomatis dengan *Anfiseditor* ini memiliki kemiripan dengan pola yang ditunjukkan pada Struktur ANFIS.

Pada gambar 2.27, membership function untuk input dan output masing-masing digunakan tiga buah, sedangkan rule base dan outputnya adalah linear 9 buah (gambar 2.28). range untuk input adalah 0 sampai dengan 5, sedangkan range untuk output adalah 0 s.d 10.

Selanjutnya kita perlu melakukan uji coba terhadap sistem ini, langkahnya adalah kita perlu export dulu file `coba01.fis` ke *workspace*. Selanjutnya gunakan perintah `readfis` dan `evalfis`. Contoh:

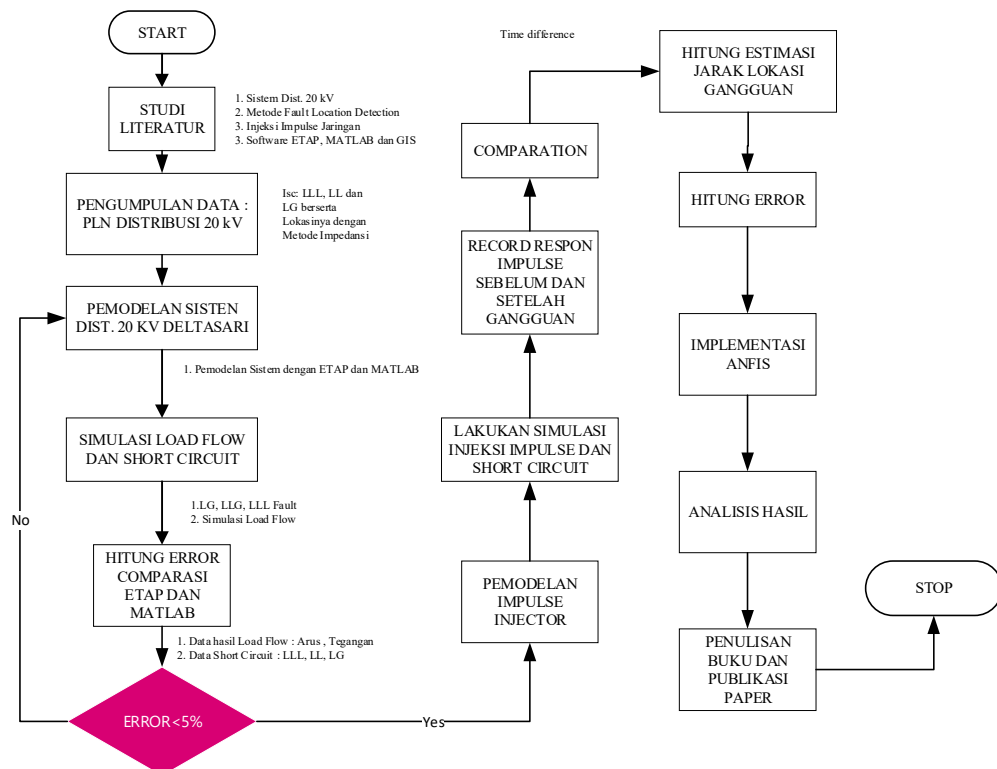
- `readfis('coba01')`
`ans =`
`name: 'coba01'`
`type: 'sugeno'`
`andMethod: 'prod'`
`orMethod: 'probor'`
`defuzzMethod: 'wtaver'`
`impMethod: 'prod'`
`aggMethod: 'sum'`
`input: [1x2 struct]`
`output: [1x1 struct]`
`rule: [1x9 struct]`
- `out=evalfis([1 1],coba01)`
`out = 2.0000`

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB 3

METODE PENELITIAN

Penelitian ini , diawali dengan melakukan studi literatur mengenai Sistem Distribusi 20 kV dan Metode *Fault Location Detection*. Melakukan pengujian sederhana pada sistem 20 kV, mulai dari melakukan perhitungan manual menggunakan metode impedansi dan simulasi (pemodelan sistem, load flow, dan analisis hubung singkat) data peper menggunakan ETAP 12.6 dan Matlab r2016a. Hasil perhitungan manual dan hasil simulasi dijadikan acuan untuk melakukan uji coba metode injeksi impulse dan ANFIS yang kemudian membandingkannya satu dengan yang lain. Setelah berhasil, selanjutnya memodelakan data dengan *software* GIS untuk dapat dilihat secara visual, untuk lebih jelas dapat dilihat pada gambar 3.1 berikut ini.

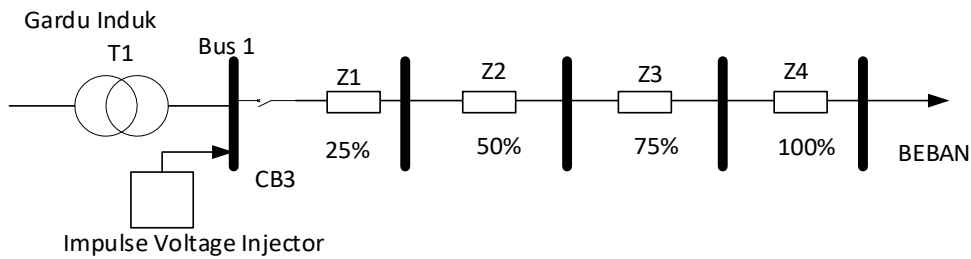


Gambar 3.1

Gambar 3. 1 Diagram Alir Penelitian

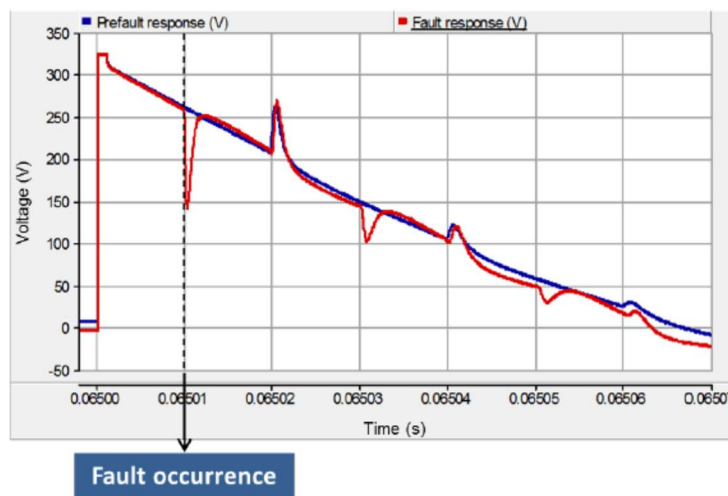
3.1 Metode Injeksi Tegangan Impulse [6]

Pada jaringan akan dipasang *Fault Location Detector*, yang berfungsi untuk menginjeksikan sinyal Impulse dengan kriteria tertentu (exp: 325V, durasi 2.5 μ s, *rump up* dan *rump down* 100 ns) pada jaringan setiap detik melalui kapasitor *coupling*, sekaligus merekam secara terus menerus respon sinyal refleksi dari impulse yang te ke jaringan terjadi ketika kondisi normal dan terjadi diskontinuitas aliran listrik, dimana response refleksi ini diukur dari titik awal jaringan. Respon sinyal yang diperoleh dilakukan komparasi antara respon sinyal sebelum dan setelah gangguan.



Gambar 3. 2 Injeksi Sinyal Impulse Pada Sistem Distribusi 20 kV

Pulsa yang diinjeksikan akan dipantulkan ketika mengenai sambungan, ujung jaringan, atau mengenai utilitas trafo, juga pada titik terjadinya gangguan. Akibat sinyal pantulan inilah, mengakibatkan perbedaan sinyal, sebagai referensi dapat dilihat di gambar 3.3 berikut ini.



Gambar 3. 3 Respon Sinyal Sebelum dan Setelah Gangguan [6]

Pada gambar 3.3 terlihat perbedaan antara sinyal sebelum dan setelah gangguan. Beberapa step yang harus dilalui dalam mengerjakan fault detection pada penelitian ini, yakni:

1. *Pre fault image* (gambar respon *impulse* sebelum gangguan), tegangan impulse diinjeksikan pada sistem yang beroperasi secara normal, maka akan terecord refleksi impulse pada keadaan normal.
2. *Fault detection* (terdeteksi gangguan pada system distribusi), gangguan dapat berupa gangguan serial seperti (kabel putus, CB terlepas, dsb) atau gangguan parallel yakni berupa short cicuit (LLL , LL, LLG atau LG).
3. *Fault image* (gambar respon *impulse* setelah gangguan terjadi)

Gambar impulse sebelum gangguan (PF) dan setelah gangguan (F) dapat dinyatakan dengan,

$$\left(u_{PF}\left(t+\frac{x}{v}\right)\right)=\left(u^+\left(t-\frac{x}{v}\right)\right)+\left(u^+\left(t-\frac{x}{v}\right)\right)\left(\Gamma_{PF}(x,t)\right) \quad (3.1)$$

$$\left(u_F\left(t+\frac{x}{v}\right)\right)=\left(u^+\left(t-\frac{x}{v}\right)\right)+\left(u^+\left(t-\frac{x}{v}\right)\right)\left(\Gamma_F(x,t)\right) \quad (3.2)$$

4. Analisis perbandingan respon signal sebelum dan sesudah gangguan (sinyal error). Dari persamaan 65 dan 66 kita dapat mencari nilai dari sinyal error yakni, $(\Delta u = u_{PF} - u_F)$ atau:

$$\Delta u = \left(u^+\left(t-\frac{x}{v}\right)\right)\left(\Gamma_{PF}(x,t) - \Gamma_F(x,t)\right) \quad (3.3)$$

Keterangan:

$u_{PF}\left(t+\frac{x}{v}\right)$ = Respon tegangan impulse sebelum gangguan

$u_F\left(t+\frac{x}{v}\right)$ = Respon tegangan impulse setelah gangguan

r_{PF} = Koefesien refleksi sebelum gangguan

r_F = Koefesien refleksi setelah gangguan

Δu = Selisih respon tegangan sebelum dan setelah gangguan (error signal)

5. Menghitung error antar sinyal

Error antar sinyal yang diinjeksikan diturunkan untuk memperoleh error sinyal diantara kedua respon impulse, yakni

$$\frac{d\Delta u}{dt} = \frac{d\left(u^+\left(t - \frac{x}{v}\right)\right)}{dt} (\Gamma_{PF}(x,t) - \Gamma_F(x,t)) \quad (3.4)$$

6. Identifikasi titik gangguan

Algoritma menghitung nilai maximum dari error signal kedua respon impulse pada persamaan 68. Nilai maksimum pertama diperoleh pada saat (Δt) ketika gangguan terjadi, dijadikan referensi waktu ketika sinyal diinjeksikan.

7. Estimasi lokasi gangguan

Estimasi lokasi gangguan dapat dirumuskan,

$$\left(d = V \frac{\Delta t}{2}\right) \quad (3.5)$$

Dimana nilai V adalah

$$v = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_r \epsilon_0 \mu_0}} \quad (3.6)$$

Keterangan:

ϵ_r = Relative permitivity medium (bernilai 1 untuk kabel udara)

ϵ_0 = Relative permitivity in free space ($8.85 \cdot 10^{-12} \text{ F/m}$)

μ_0 = Magnetic permeability on free space ($1.257 \cdot 10^{-6} \text{ Hm}$)

V = Independent of soil resistivity

D = Jarak Lokasi gangguan

Dengan nilai persamaan yang ada pada persamaan 70, maka kecepatan impulse pada jaringan adalah sebesar $2.9986 \cdot 10^8$.

Kesalahan penggunaan ϵ_r akan berpengaruh pada *error propagation speed*. Sehingga estimasi error propagasi menjadi:

$$\left(\text{Error Fault Dis.} = \frac{1}{\sqrt{1 + \Delta\epsilon_r}}\right) \quad (3.7)$$

Pada literature disebutkan bahwa error ϵ_r 10% saja akan mengakibatkan error estimasi jarak 5%. Sehingga pada kasus multi feeder, nilai dari ϵ_r harus

diinputkan dulu masing-masing ke alat locator detector untuk meminimalkan error. Atau dengan kata lain nilai dari ϵ_r lebih mudah diukur di kabel secara langsung. Error juga dapat dikurangi dengan cara meningkatkan frekuensi *sampling* pada alat

3.2 Pemodelan Sistem

Sistem dimodelkan menggunakan MATLAB r2016a, yang divalidasi juga menggunakan ETAP 12.6 secara terpisah untuk perbandingan.

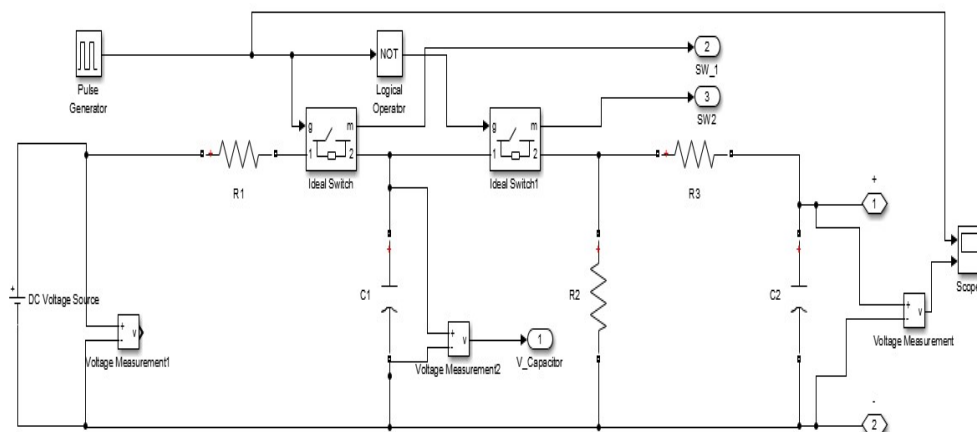
3.2.1 Pemodelan Impulse

Impulse yang digunakan untuk testing ini adalah tipe *exponensial ganda*, dimana dalam paper disebutkan bahwa tegangan impulse yang diinjeksikan memiliki spesifikasi sebagai berikut:

Tabel 3. 1 Parameter Tegangan Impulse [6]

Parameter	Nilai	Satuan
Tegangan	325	Volt
Durasi	2.5	μ s
Rump up	10	ns
Rump Down	10	ns

Rangkaian pembangkit impulse yang akan dipakai adalah tipe *switching capacitor*, dimana sumber DC digunakan untuk suplay kapasitor yang *charge* dan *discharge* secara periodic. Berikut adalah gambar rangkaian *switching* dari generator impulse



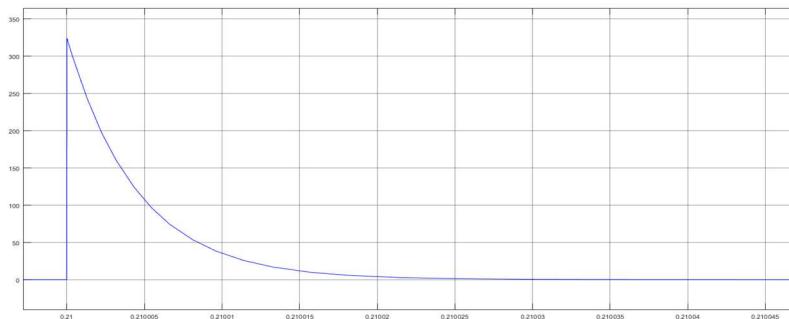
Gambar 3. 4 Impulse Generator

Untuk mendapatkan respon tegangan impulse dengan kriteria tertentu, maka kita perlu untuk menentukan nilai dari kapasitor dan juga resistor. Dari rangkaian diatas nilai resistor dan kapasitor yang digunakan adalah sebagai berikut:

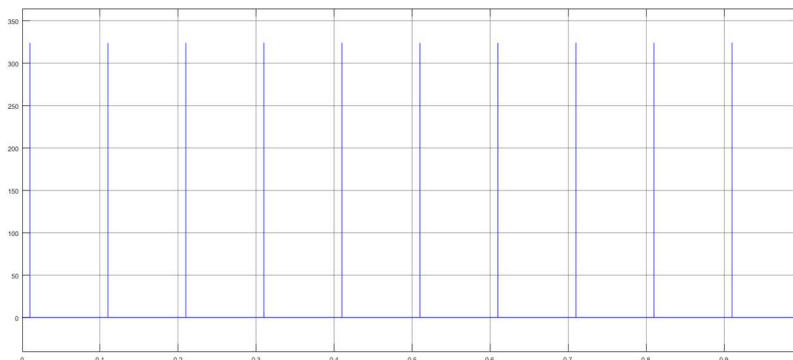
Tabel 3. 2 Nilai Parameter Kapasitor dan Resistor

Parameter	Value	Unit
C1	5.00E-08	F
C2	5.00E-11	F
R1	10	Ohm
R2	90	Ohm
R3	20	Ohm
Freq.	350	Hz
Voltage	325	V

Untuk menghasilkan respon periodik, maka dipakai pulse generator dengan *duty cycle* tertentu, dan periode tertentu, sebagai input swtichingnya, seperti ditunjukkan pada gambar 3.3.



a) respon satu sinyal Impulse



b) respon impulse dengan pulse generator $T=0.1s$, Pulse Wide 10%

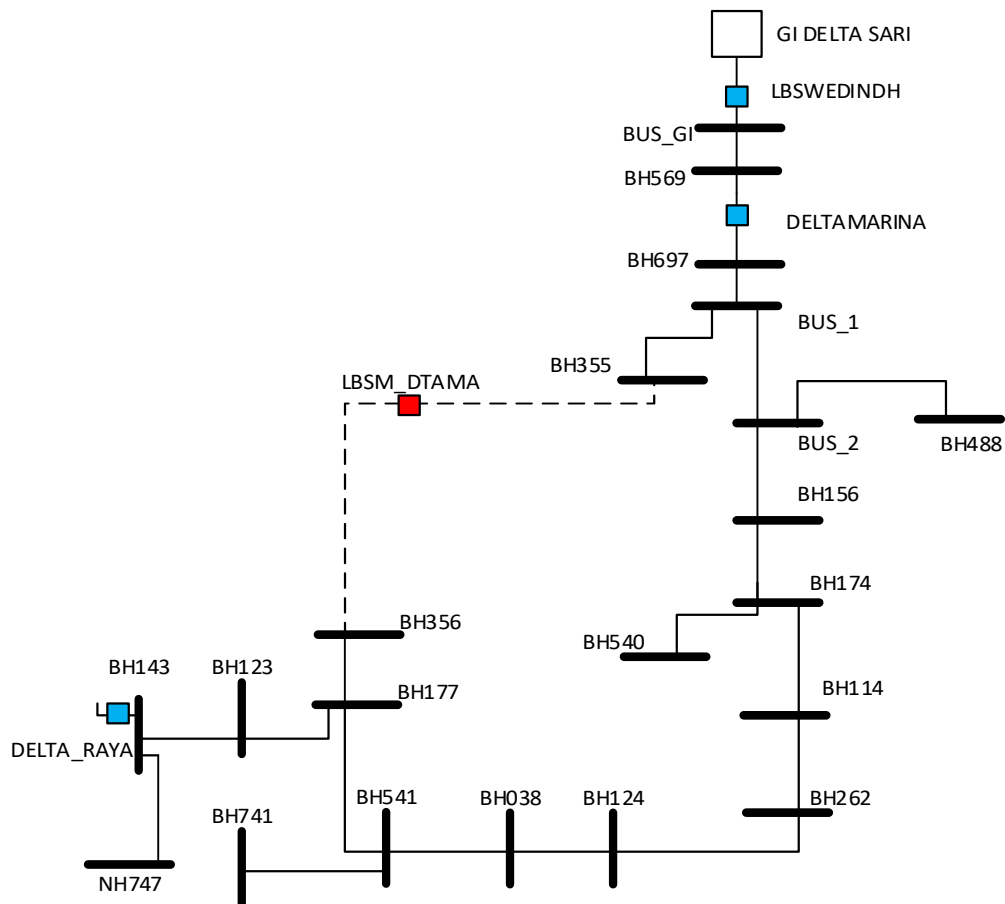
Gambar 3. 5 Respon Impulse dalam Periode 1 Second

3.2.2 Pemodelan Sistem Kelistrikan 20 kV

3.2.2.1 Data Sistem Kelistrikan 20 kV Delta Sari

Sistem kelistrikan yang dipakai adalah sistem Distribusi 20 kV Deltasari, Rungkut Dual Industri, Surabaya, Jawa Timur.

1. Single Line Diagram



Gambar 3. 6 Single Line diagram Sistem Distribusi 20 kV Deltasari

Sistem distribusi 20 kV deltasari sebenarnya terdiri dari 65 bus yang tersebar di wilayah Surabaya, tetapi dalam penelitian ini hanya diambil 19 bus saja untuk disimulasikan.

2. Data Impedansi Kabel

Untuk data kabel yang akan dipakai dalam simulasi adalah cable 1 s.d cable 21, sesuai dengan *single line diagram*. Kabel yang digunakan adalah kabel A3C dengan diameter 150 mm², 50 Hz, 20 kV dengan impedansi urutan sebagai berikut:

Tabel 3. 3 Tahanan dan Reaktansi Penghantar AAAC pada Tegangan 20 kV
sesuai SPLN 64 Tahun 1985

Luas Penampang	Type	POSITIF		ZERO	
		R/km	X/km	R/km	X/km
150 mm ²	AAAC	0.2162	0.3305	0.3631	1.618

Tabel 3. 4 Data Impedansi Saluran pada Jaringan

No	Bus	To Bus	Panjang	POSITIF		ZERO		Nama
				R	X	R	X	
1	GI Deltasari	BH569	1853.351512	0.401	0.613	0.673	2.999	Cable 1
2	BH569	BH697	327.1306466	0.071	0.108	0.119	0.529	Cable 2
3	BH697	BUS1	16.707544	0.004	0.006	0.006	0.027	Cable 3
4	BUS1	BH355	112.034678	0.024	0.037	0.041	0.181	Cable 4
5	BUS1	BUS2	88.46269728	0.019	0.029	0.032	0.143	Cable 5
6	BUS 2	BH488	42.349236	0.009	0.014	0.015	0.069	Cable 6
7	BUS 2	BH156	87.93203929	0.019	0.029	0.032	0.142	Cable 7
8	BH355	BH356	260.544278	0.056	0.086	0.095	0.422	Cable 8
9	BH156	BH174	139.1918531	0.030	0.046	0.051	0.225	Cable 9
10	BH174	BH114	113.2713114	0.024	0.037	0.041	0.183	Cable 10
11	BH174	BH540	69.391167	0.015	0.023	0.025	0.112	Cable 11
12	BH114	BH262	170.1814259	0.037	0.056	0.062	0.275	Cable 12
13	BH262	BH124	289.4188199	0.063	0.096	0.105	0.468	Cable 13
14	BH124	BH038	78.98712268	0.017	0.026	0.029	0.128	Cable 14
15	BH038	BH541	90.58519521	0.020	0.030	0.033	0.147	Cable 15
16	BH541	BH741	134.9146735	0.029	0.045	0.049	0.218	Cable 16
17	BH541	BH522	283.6011228	0.061	0.094	0.103	0.459	Cable 17
18	BH522	BH177	1	0.000	0.000	0.000	0.002	Cable 18
19	BH522	BH356	118.8480936	0.026	0.039	0.043	0.192	Cable 19
20	BH522	BH123	249.4455074	0.054	0.082	0.091	0.404	Cable 20
21	BH123	BH143	181.2109526	0.039	0.060	0.066	0.293	Cable 21

3. Data Beban

Beban yang terpasang pada masing-masing trafo tiang adalah beban seimbang tiap fasanya, dan memiliki power factor 0.9. adapun lebih detail tentang nilai beban tiap bus dapat dilihat pada tabel 3.5 berikut ini.

Tabel 3. 5 Data Trafo dan Beban

No	Nama Trafo	Daya	P (kW)			Q(kVAR)		
			R	S	T	R	S	T
1	BH262	200	45	45	45	21.79	21.79	21.79
2	BH356	160	36	36	36	17.44	17.44	17.44
3	BH143	160	36	36	36	17.44	17.44	17.44
4	BH747	50	11.25	11.25	11.25	5.45	5.45	5.45
5	BH114	160	36	36	36	17.44	17.44	17.44

Tabel 3. 6 Data Trafo dan Beban Lanjutan

No	Nama Trafo	Daya	P (kW)			Q(kVAR)		
			R	S	T	R	S	T
6	BH156	160	36	36	36	17.44	17.44	17.44
7	BH522	160	36	36	36	17.44	17.44	17.44
8	BH540	200	45	45	45	21.79	21.79	21.79
9	BH177	160	36	36	36	17.44	17.44	17.44
10	BH174	160	36	36	36	17.44	17.44	17.44
11	BH038	200	45	45	45	21.79	21.79	21.79
12	BH124	200	45	45	45	21.79	21.79	21.79
13	BH741	200	45	45	45	21.79	21.79	21.79
14	BH569	100	22.5	22.5	22.5	10.9	10.9	10.9
15	BH541	100	22.5	22.5	22.5	10.9	10.9	10.9
16	BH123	250	56.25	56.25	56.25	27.24	27.24	27.24
17	BH355	160	36	36	36	17.44	17.44	17.44
18	BH488	160	36	36	36	17.44	17.44	17.44
19	BH697	200	45	45	45	21.79	21.79	21.79

4. Data Electric Switch

Pada sistem distribusi 20 kV Deltasari ini, terdapat 9 (Sembilan) buah switch yang dioperasikan sesuai dengan kebutuhan.

Tabel 3. 7 Electric Switch

FID	XTRID	Nama	Latitude	Longitude	Kondisi
0	95925617	LBSM DTAMA	-7.359231717	112.7443336	Open OFF
1	50016130	DELTA RAYA	-7.361907524	112.7386627	Closed ON

5. Data Gardu Induk

Gardu Induk penyulang Deltasari ini memiliki spesifikasi sebagai berikut.

Tabel 3. 8 Data Penyulang dan trafo GI Deltasari

<u>Data GI DELTASARI</u>	Value	Unit
Tegangan	20	kV
MVAsc 3 ph	546.61	MVA
MVAsc 1 ph	3.66	MVA

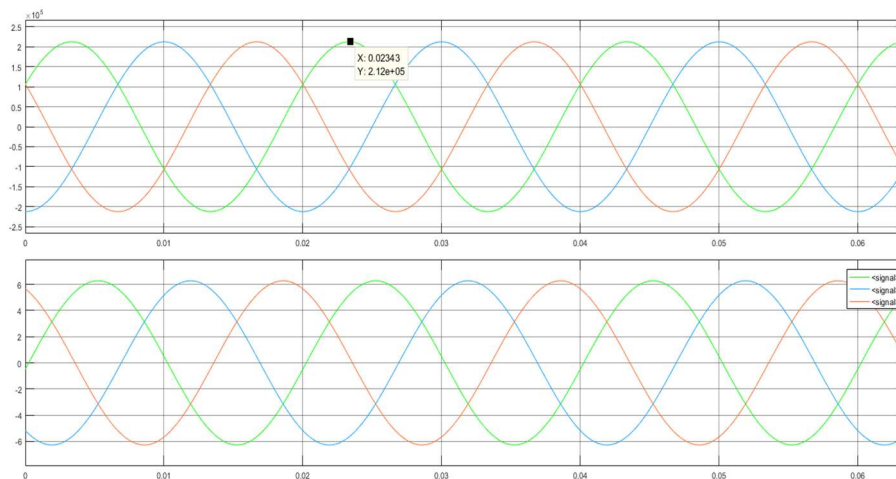
<u>DATA TRAFU TENAGA</u>	Value	Unit
daya	60	MVA
Vektor	YNyn0	
Tegangan primer	150	kV
Tegangan sekunder	20	kV
Z%	12.531	%
Pertanahan	40	ohm

3.2.2.2 Pemodelan Sistem Pada MATLAB r2016a

Secara umum ada beberapa device yang perlu untuk dimodelkan pada sistem distribusi 20 kV yang dalam hal ini , dipilih software Matlab r2016a, antara lain: Sumber 3 fasa, Transformator, Beban 3 fasa, Gangguan, *Circuit Breaker* dan *Bus Bar*.

1. Sumber 3 Fasa

Pada MATLAB kita dapat gunakan block **Three-Phase Source**. Adapun parameter yang harus diisikan ketika menggunakan block ini adalah, *Line to Neutral Voltage* [V_a V_b V_c] (V_{rms}), Sudut Fasa, *Frequency*, MVA_{Sc} , Tegangan *base* dan *X/R ratio*, dimana pengisiannya berbeda-beda sesuai dengan data di lapangan. Respon dari *three phase source* dapat dilihat pada gambar 3.8.



Gambar 3. 7 Respon Tegangan dan Arus GI 150 kV

2. Transformator

Kita dapat gunakan Three phase transformer (*two winding*) pada *library*. Kemudian kita dapat isikan nilai dari parameter trafo yakni, Winding connection (Y_g , Y_n , Y , Delta) untuk kumparan primer dan sekunder, dan tipe *core* (*three single phase transformer*, *dst*). Kemudian untuk parameter yang perlu diisikan antara lain: *Nominal power* (kVA) dan *Frequency* (Hz), *Winding parameter* (V ph-ph(V_{rms}), R (ohm), dan L

(Henry)), *Magnetization resistance* (rohms), serta *Magnetization inductance* (*Lm*) H. untuk lebih jelas dapat dilihat pada gambar 3.9.

Pengisian parameter ini tentu saja berbeda-beda setiap transformator, adapun cara perhitung dari nilai R1 dan L1 adalah sebagai berikut:

Contoh: Trafo daya, 60 MVA, frequency 50 Hz, 150/20 kV, 12.531%

$$\left(X = jZ \cdot \frac{V_S}{S} \right) = j \cdot 12531 * \frac{20kVA}{60MVA} = j0.8347ohm$$

Nilai R dapat dicari dengan cara

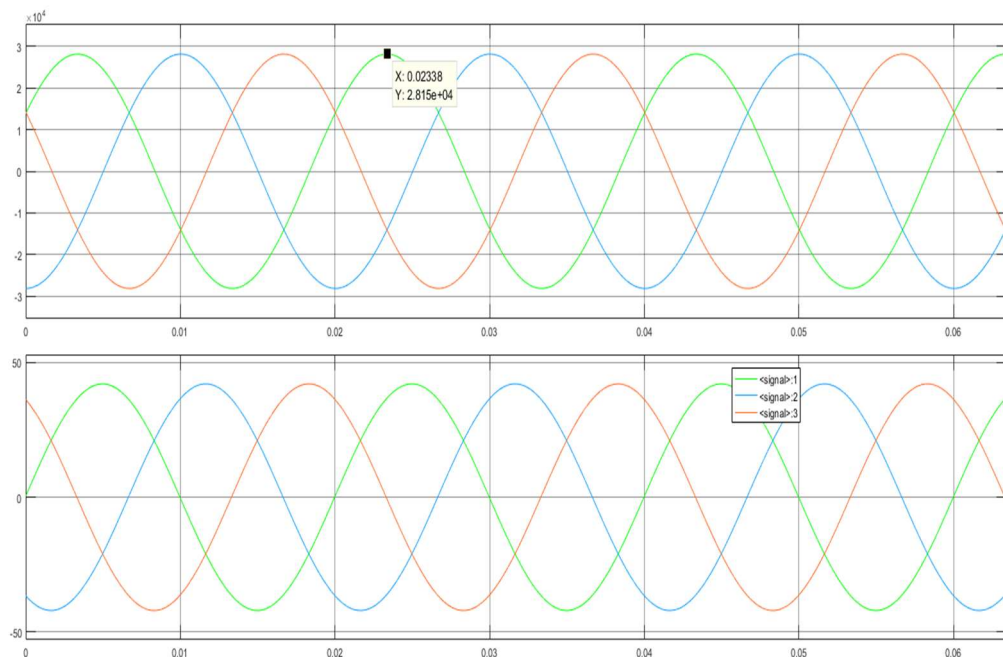
$$X_L = j0.8347ohm$$

$$L = \frac{X_L}{2\pi f} = \frac{0.8347}{314} = 0.002658H$$

$$\frac{R}{X} = 0.029(dari\ etap)$$

$$R = 0.029 * 0.8347 = 0.0242027ohm$$

Pada gambar 3.9 terlihat respon tegangan dan arus pada sisi sekunder trafo. Tegangan maksimum mencapai 28.15 kV, atau jika dikonversi ke rms adalah sebesar 19.9 kV.



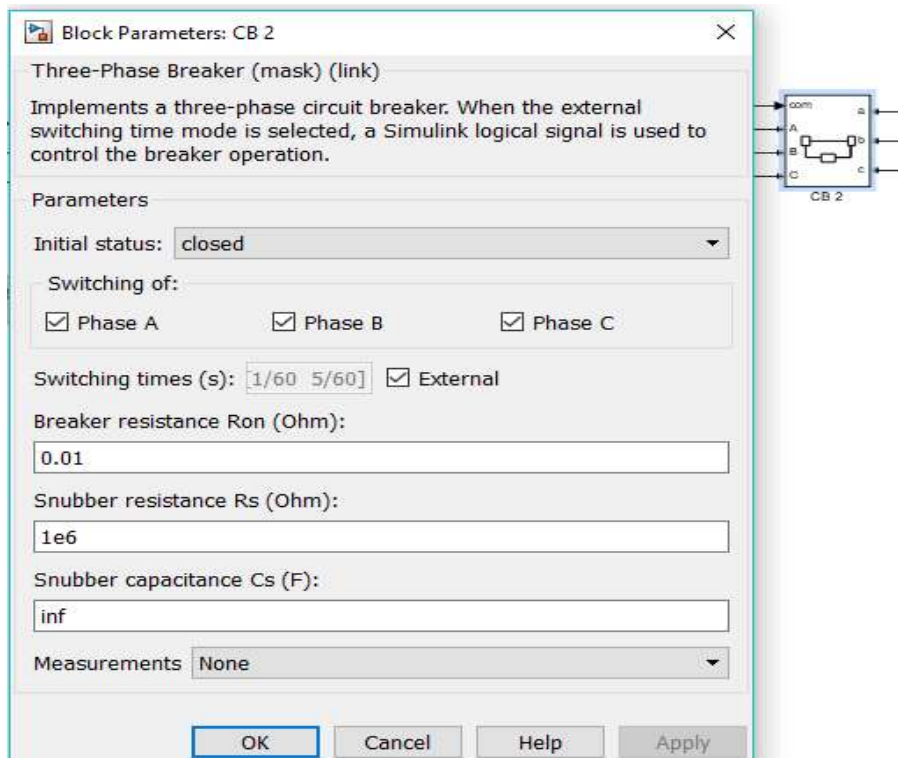
Gambar 3. 8 Respon Arus Dan Tegangan Pada Sisi Sekunder

3. Beban 3 fasa

Untuk beban tiga fasa kita dapat gunakan *three phase series RLC load* pada *library*. Kemudian kita isikan parameter-parameter yang ada, meliputi: konfigurasi grounding, Nominal phase to neutral (V_a V_b V_c) (V_{rms}), frequency, active power, inductive power per phase, capacitive power per phase.

4. Circuit Breaker

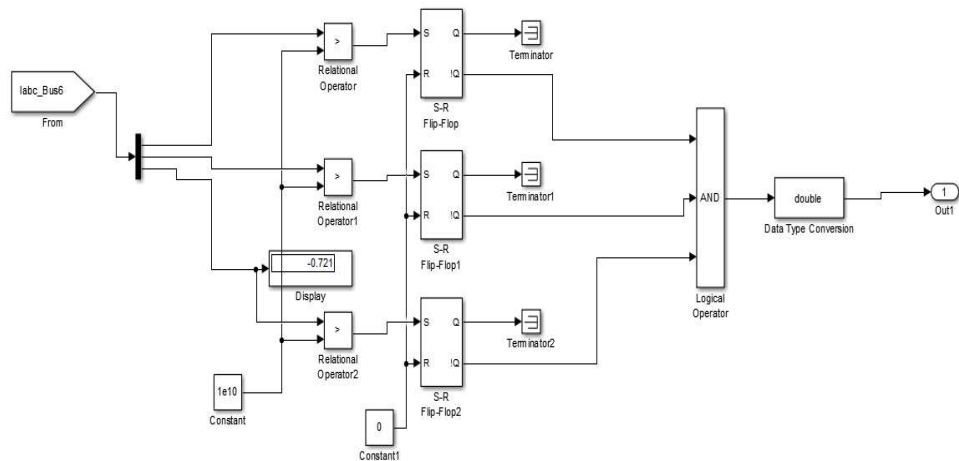
Pada *library* dapat digunakan *three phase circuit breaker*. Seperti yang terlihat pada gambar 3.11, dimana kita dapat isikan parameter meliputi: initial statu (kondisi CB awal), phase yang dilindungi (A,B,C) waktu Switching, kita dapat pakai internal maupun external. Kalau dipilih setting internal maka, setting dilakukan secara manual dengan mengisi waktu operasi CB, sedangkan jika kita hendak pakai parameter-parameter arus, real, maka kita dapat memberikan external input berupa relay. Fungsi relay adalah memerintahkan CB untuk trip ketika dideteksi arus lebih dari arus normal. Model relay dapat dilihat pada gambar 3.13.



Gambar 3. 9 *Circuit Breaker*

Parameter lain yang seperti *breaker resistance*, *snubber resistance*, *snubber capacitance* yang dibiarkan default. Untuk melihat respon relay ini, kita dapat mengaktifkan *measurement pane (voltage and current)*

Untuk sumber eksternal kita dapat gunakan relay dengan model sebagai berikut:



Gambar 3. 10 Logic Relay Proteksi

5. Gangguan

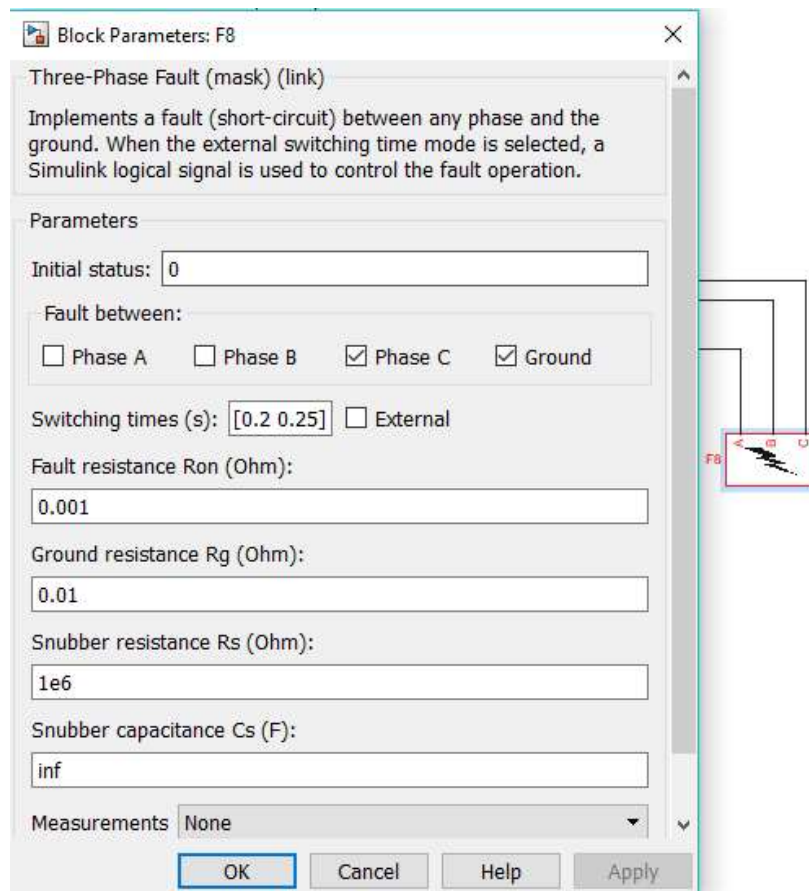
Untuk model gangguan ini, kita dapat gunakan Three Phase Fault, dimana secara isian mirip dengan *circuit breaker*, terdapat inisial status, dapat diisikan 0 atau 1, 0 berarti posisi belum ada gangguan, sedangkan 1 posisi terdapat gangguan. Kemudian tipe gangguan ini, kita dapat pilih sesuai Dengan kebutuhan:

- 3 fasa maka kita cek untuk box pilihan phase A, B dan C, dan Ground
- 2 fasa ke tanah, pilih 2 phase lain kemudian cek pilih juga ground
- 1 fasa ke tanah, pilih 1 phase dan ground, dst

Hal lain yang tidak kalah penting untuk diisi adalah *fault resistance*, dimana dalam pembagiannya adalah *low resistance*, *high resitance*, dan *open*.

Tabel 3. 1 Klasifikasi R_{fault} [15]

Type	R_{fault}	Spark Gap Brekdown Voltage
Open circuit	infinity	Low
Low Resistance	≤ 250 ohm	Easy broken down by Using Impulse voltage
High Resistance	> 250 ohm	



Gambar 3. 11 *There Phase Fault*

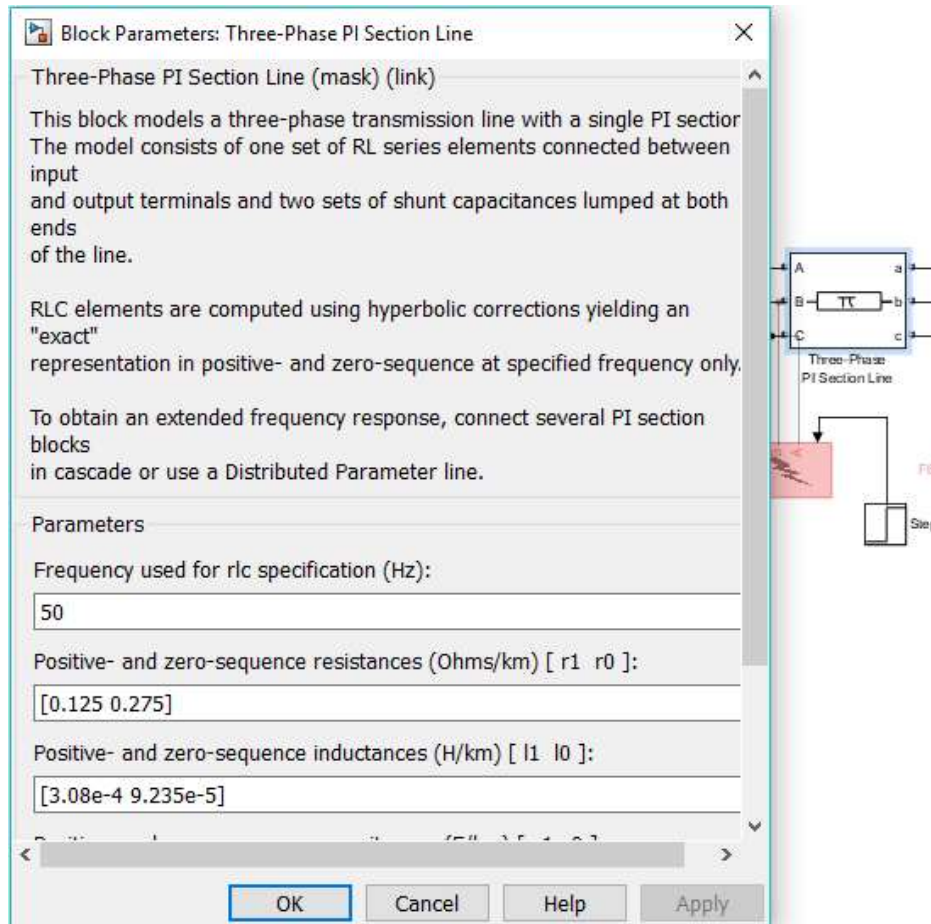
1. Jaringan / saluran distribusi

Saluran distribusi tentu bermacam-macam sesuai kebutuhan jenis kabel yang digunakan, dalam simulasi deteksi gangguan, kabel adalah salah satu parameter yang sangat penting untuk diketahui. Adapun pada library Matlab kita dapat paka *Tree Phase PI section line* (Gambar 3.15). Parameter yang harus diisikan antara lain: frequency dari sistem, Impedansi per kilometre (urutan positif, zero dan negatif), *inductance* per kilometre (H/km) dan juga *capacitance* per kilometer.

Tabel 3. 9 Contoh data SPLN 64 kabel AL 3 x 240 mm² [10]

Luas Penampang	Impedansi urutan +/-	Impedansi urutan nol
3 x 240 mm ²	0,125 + j 0.097	0,275 + j0029

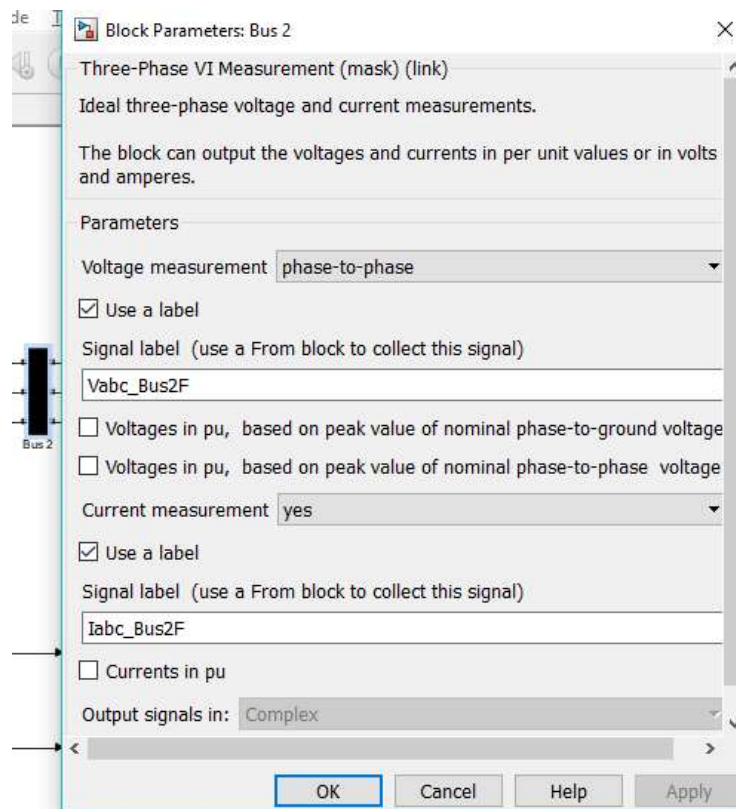
Nilai resistansi / tahanan, atau reaktansi penghantar ($R+jX$) dapat kita peroleh dari data SPLN 64: Tahun 1985) dari nilai R dan X, maka dapat kita cari nilai Induktansi L.



Gambar 3. 12 *Three phase PI Section Line*

2. *Bus bar*

Bus bar kita menggunakan *Three Phase VI Measurement*. Karena fungsinya adalah penghubung sekaligus *measurement*, maka pada settingannya kita cukup memilih, tipe tegangan dan arus apa yang akan diukur (*phase to phase* atau *phase to neutral*). Agar terlihat rapih, maka kita dapat gunakan opsi (*use label*), dimana kita hanya perlu menambahkan label *go to* dan *from*, dari *library*, sehingga tidak banyak terlihat banyak koneksi di sistem. Perhatikan gambar 3.16 berikut ini:



Gambar 3. 13 *Three Phase VI Measurement*

BAB 4

HASIL DAN PEMBAHASAN

Metode pendeteksian tegangan dengan menggunakan tegangan impulse ini akan diuji coba dengan beberapa kondisi antara lain:

1. Dengan memvariasikan jenis gangguan pada sistem
2. Dengan memvariasikan resistansi fault pada gangguan
3. Dengan memvariasikan resistansi ground pada system

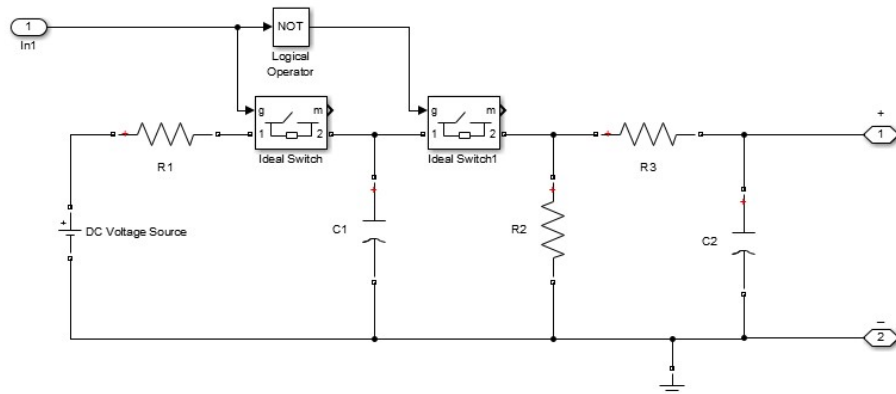
4.1 Impulse Injector

Impuls injector yang digunakan dalam simulasi ini adalah *two stage max generator*, seperti yang dijelaskan pada bab 3. adapun parameter yang digunakan untuk paper ini adalah sebagai berikut:

Tabel 4. 1 Parameter Impulse Generator

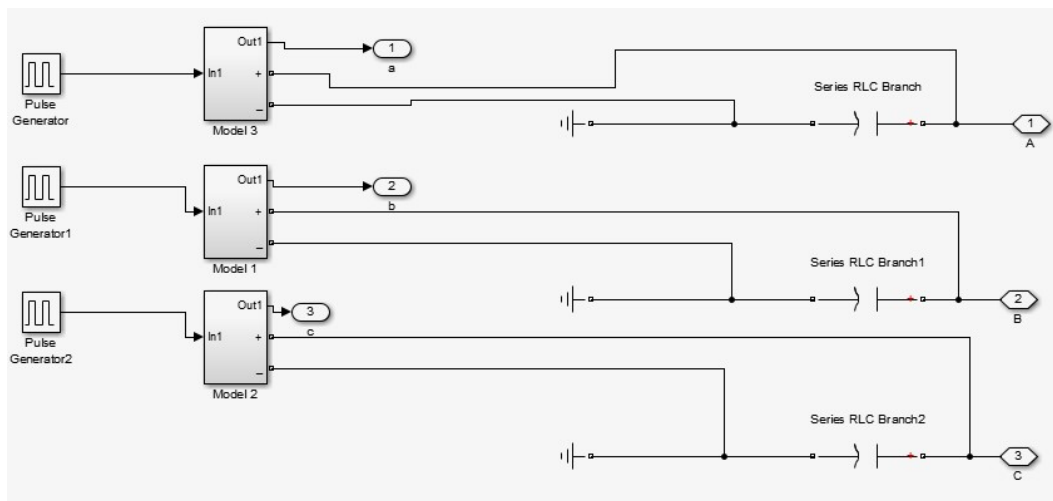
Parameter	Value	Unit
C1	5.00E-08	F
C2	5.00E-11	F
R1	10	Ohm
R2	90	Ohm
R3	20	Ohm
Freq.	350	Hz
Voltage	325	V

Rangkaian impulse injektor ditunjukkan pada gambar 4.1 berikut ini,



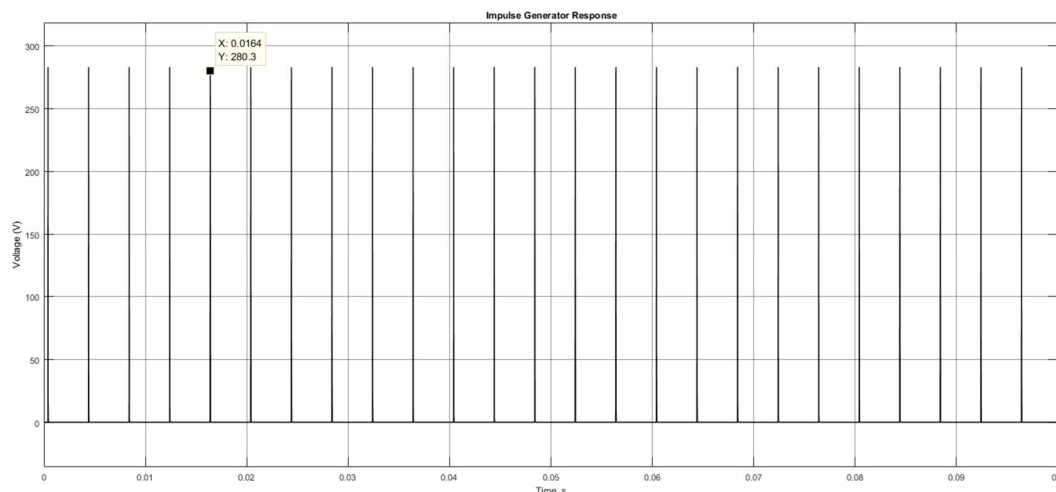
Gambar 4. 1 Rangkaian Max Impulse Generator Two Stage

Pada prinsipnya adalah switch 1 dan switch 2 bekerja secara bergantian, untuk mencharging dan mendischarging capacitor C1. Tegangan impulse ini memiliki frekuensi 350 Hz dengan amplitude input 325V DC, yang kemudian diinjeksikan ke sistem melalui kapasitor coupling. Kapasitor *coupling* ini berfungsi untuk mengisolasi tegangan dari jaringan dengan alat injektor. Besar capacitor yang dipuluh untuk rangkaian ini adalah $3.79 \text{ e-}8$ Farad, berikut adalah rangkaian injektor impulse 3 fasa melalui kapasitor *coupling*:



Gambar 4. 2 *Coupling Capacitor*

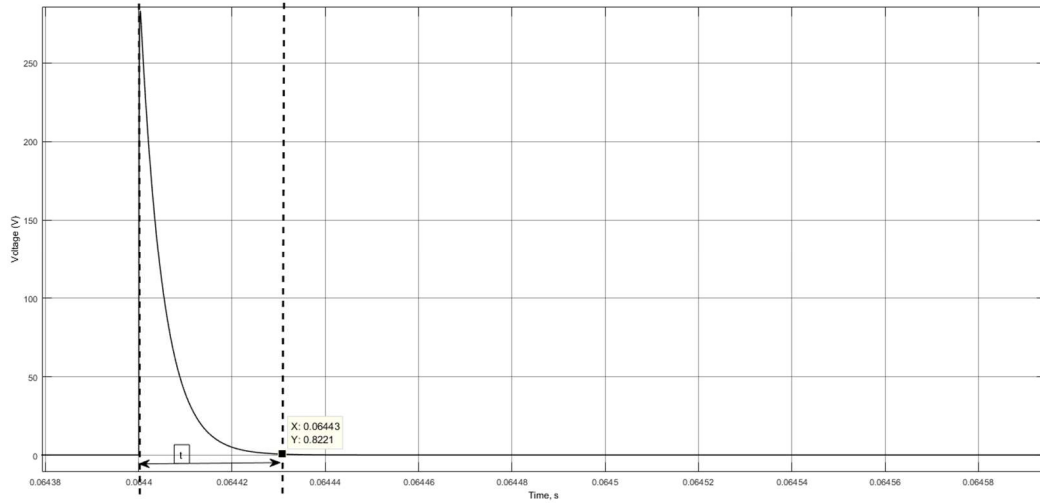
Respon dari tegangan impulse yang dihasilkan oleh impulse injektor ditunjukkan pada gambar 4.3 berikut ini:



Gambar 4. 3 Respon Tegangan Impulse

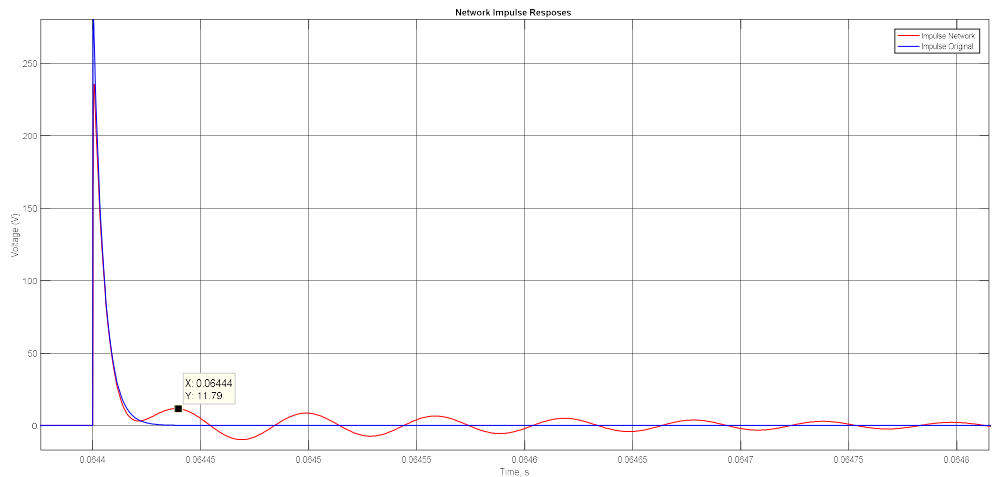
Respon impulse yang dihasilkan adalah 283 V, ada penurunan karena pengaruh nilai kapasitor dan nilai resistor paralel yang membagi tegangan output.

Berikut adalah gambar perbesaran dari signal impulse pada gambar 4.3 diatas.



Gambar 4. 4 Respon Tegangan Impulse Generator

Tegangan impulse ini akan mengalami perubahan bentuk apabila diinjeksikan pada jaringan dengan karakteristik tertentu, dan tentu saja setiap karakteristik yang berbeda untuk nilai Resistansi (R), Induktansi (L), Capacitance(C) , Reluktansi (G) dan panjang yang berbeda, sistem akan memberikan respon yang berbeda untuk sinyal impulse yang sama. Berikut adalah contoh respon natural dari kabel pada kondisi tidak bertegangan akibat dari injeksi sinyal impulse.

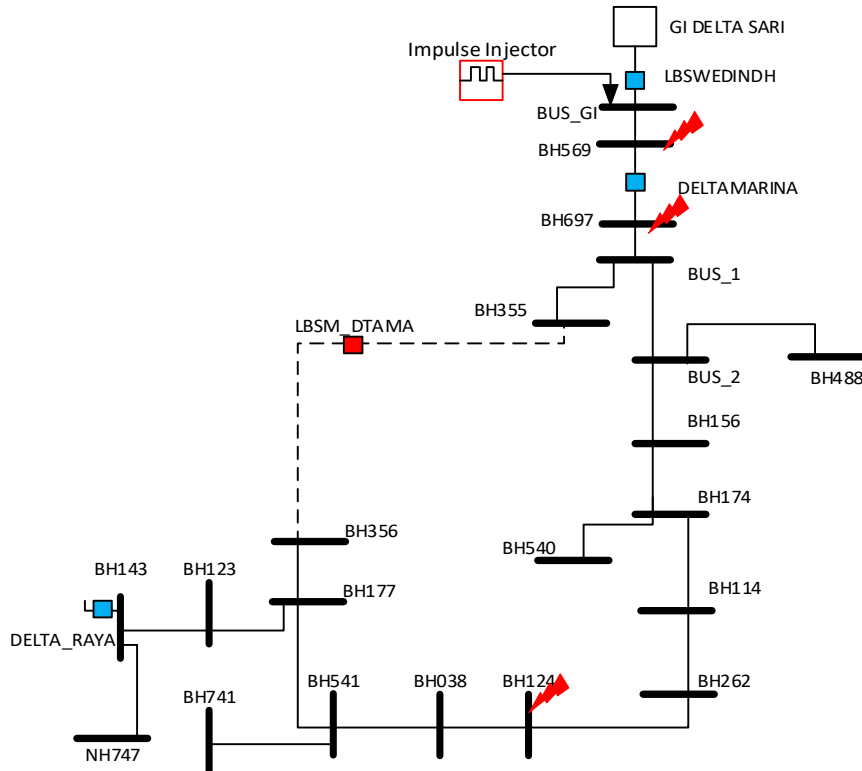


Gambar 4. 5 Respon Jaringan Terhadap Tegangan Impulse

Dari gambar 4.5 nampak jelas terjadi perbedaan akibat respon jaringan, tegangan impulse mengalami refleksi sesuai keadaan dari sistem.

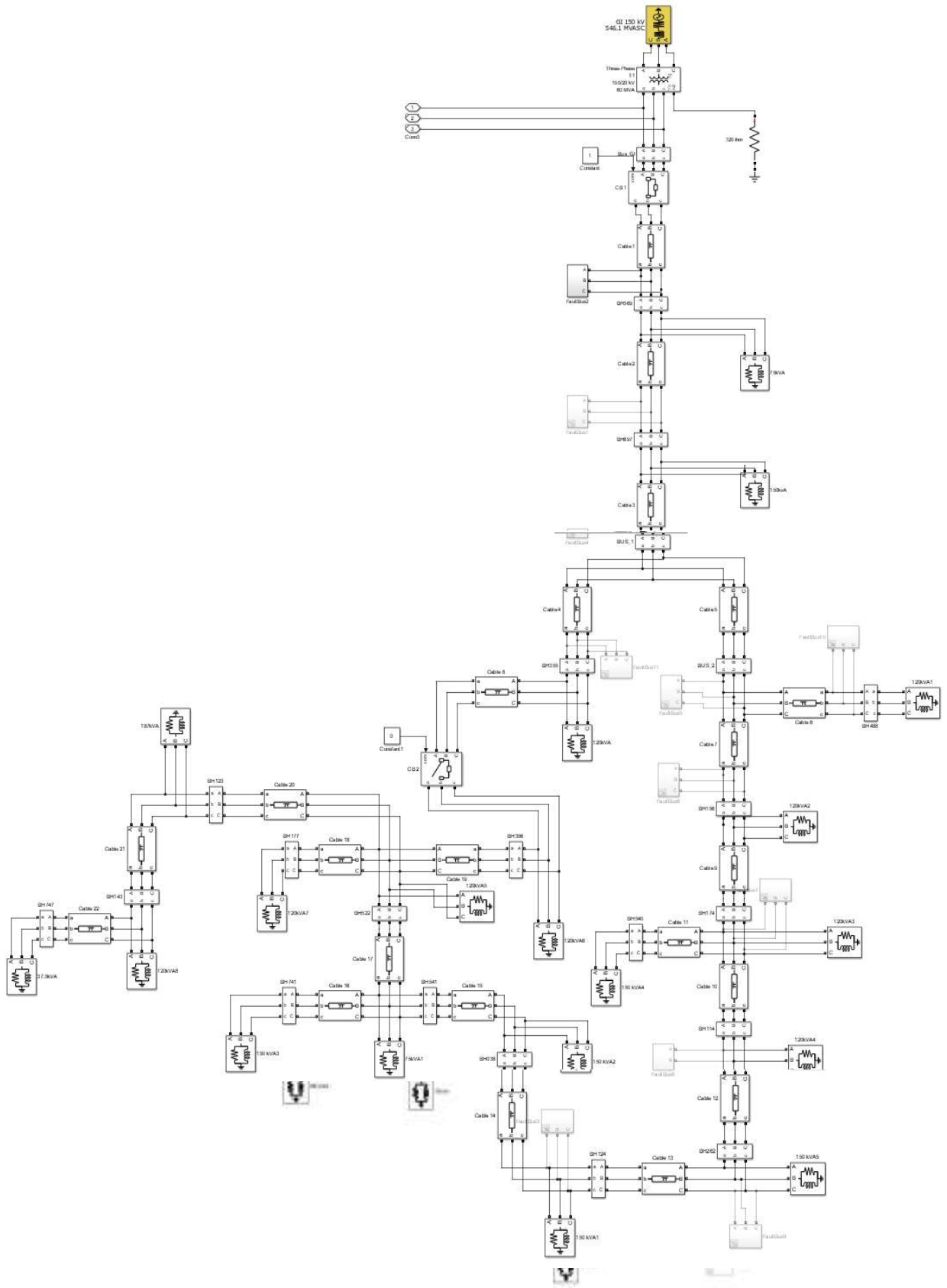
4.2 Model Sistem Distribusi 20 kV dan Study Case.

Pada tesis ini akan dilakukan beberapa injeksi gangguan pada beberapa titik, hal ini dapat dilihat pada gambar 4.5 berikut ini.



Gambar 4. 6 Study Case Impulse Injection

Ada 3 buah lokasi yang kita berikan gangguan yakni BH569, BH697, dan BH124. Type gangguan yang diberikan adalah satu fasa ketanah (LG), dua fasa ke tanah (LLG) dan tiga fasa ke tanah (LLLG), sedangkan untuk variasi fault resistace adalah 5 ohm, 100 ohm dan 300 ohm dan untuk resistansi ground adalah 100, 300 dan 500. Hasil dari simulasi ini akan diperoleh hasil perbedaan waktu antara sinyal impulse pertama diinjeksikan hingga kedua respon jaringan saling berpisah satu Dengan yang lain. Hasil perbedaan waktu yang ditemukan, akan dimasukkan pada persamaan jaraka untuk mengetahui dimana jarak lokasi gangguan berada. Dan terakhir adalah melakukan lernaning time difference tersebut menggunakan *Adaptive Neuro Fuzzy Inference System*. Pada tahap awal, kami telah memodelkan sistem distribusi 20 kV Deltasari menggunakan Simulink MATLAB r2016a, berikut adalah hasilnya:



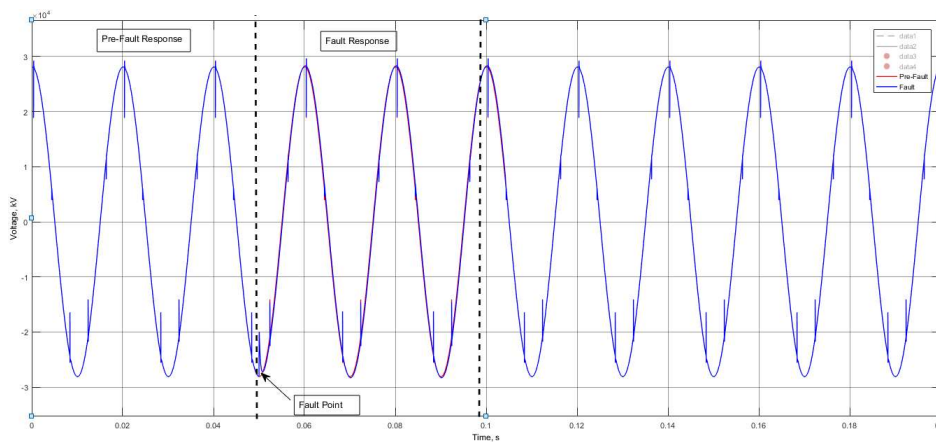
Gambar 4. 7 Model Sistem Distribusi 20 kV

4.3 Hasil percobaan dengan menvariasikan jenis gangguan, dan resistansi Fault (R_F)

4.3.1 Study Case dengan Variasi Fault Resistance (R_F)

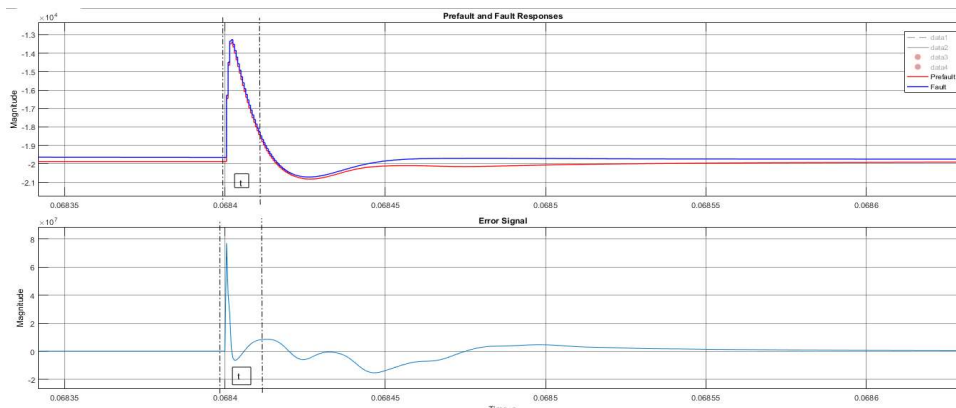
Case 1: LG Fault R_F (5,100,300), jarak 1.853,35 km

Tegangan impulse diinjeksikan pada jaringan dengan frekuensi 350 Hz, kemudian diberikan gangguan satu fasa ke tanah (LG) pada detik 0.05s sampai dengan detik ke 0.1s pada bus BH569 , yakni 1.853,35 km dari bus GI. Dengan variasi resistansi fault 5 ohm, 100 ohm dan 300 ohm.



Gambar 4. 8 Respon Tegangan Line To Line, Yang Telah Diberikan Injeksi

Pada gambar 4.8 terlihat bahwa tegangan impulse yang diinjeksikan pada jaringan menumpang pada tegangan jala-jala. Pada detk ke 0.05 terlihat ada fault yang terjadi, sehingga kemudian terjadi perubahan tegangan meskipun hanya terlihat sedikit.



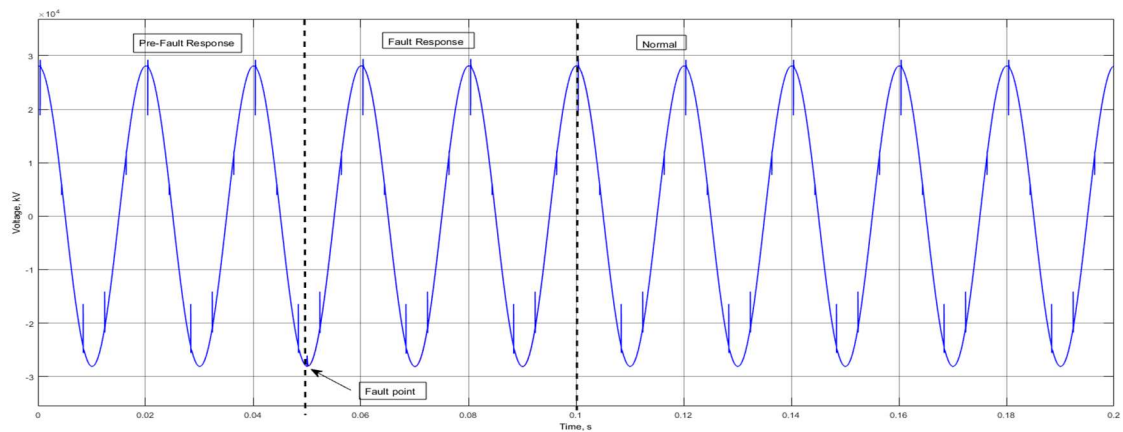
Gambar 4. 9 Respon Tegangan Impulse LG, R_F 5 ohm, 1.8 km

dari gambar 4.9, diperoleh perbedaan waktu antara respon system pada saat normal dan gangguan yakni $\Delta t = 12.315 \mu s$. Maka kita dapat hitung nilai dari jarak gangguan adalah.:

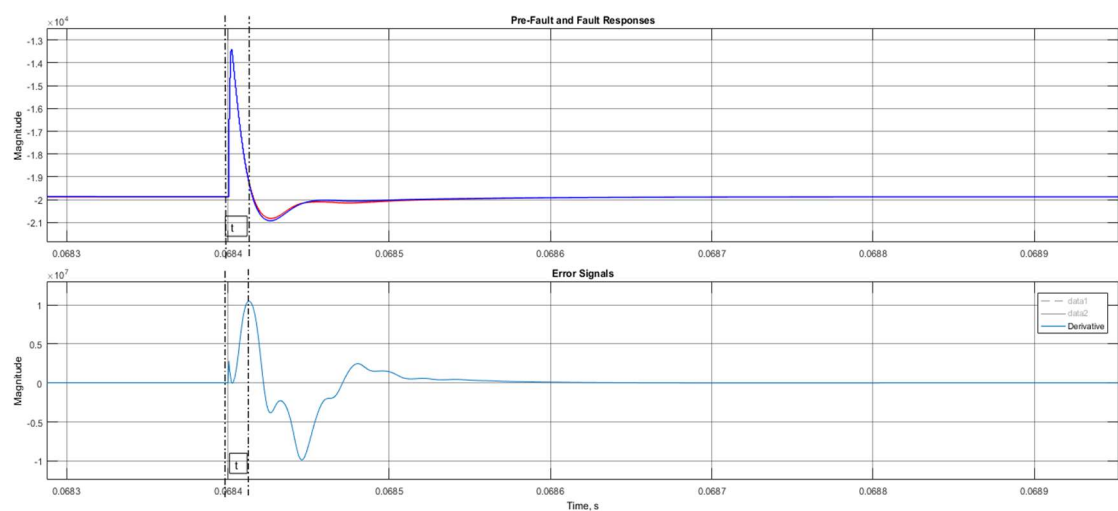
$$d = \frac{V\Delta t}{2} = \frac{(299.863.388 * 12.315 e^{-6})}{2} = 1.846,41 m$$

Dari perhitungan diatas estimasi jarak gangguan adalah 1.846,41 m. Jika dikomparasi dengan jarak actual 1.853,35 maka errornya adalah 6.94 m (0.37%).

Selanjutnya adalah menaikkan nilai resistansi fault, berikut adalah simulasi untuk R_F 300 ohm.



Gambar 4.10, Respon Tegangan Jala-Jala, LG Fault, R_F 300 ohm, 1.8 km



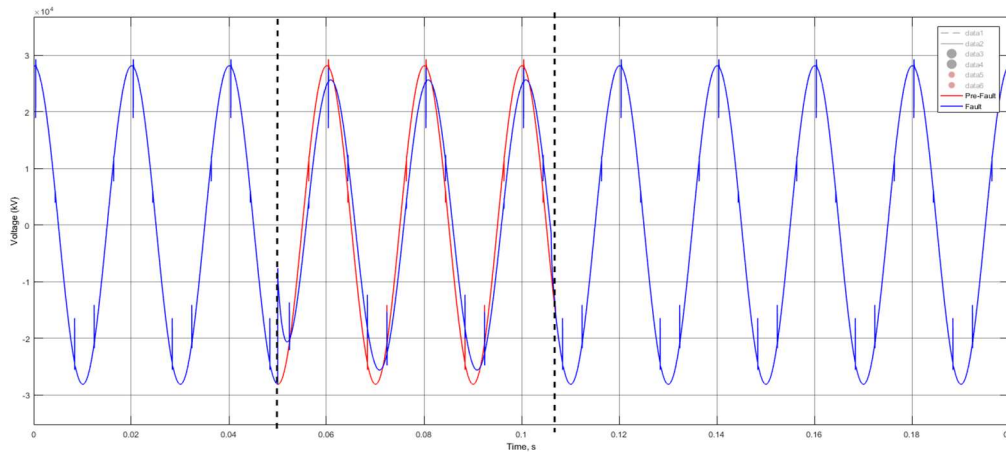
Gambar 4. 10 Respon Tegangan Impulse, LG Fault , R_F 300 ohm, 1.8 km

Dilihat dari respon tegangan jala-jala pada gambar 4.10, menaikkan nilai resistansi fault (R_F) ini berpengaruh pada drop tegangan yang terjadi, dimana dengan resistansi yang tinggi, drop tegangan hampir tidak ada, sehingga sangat sulit untuk diketahui jika menggunakan metode konvensional.

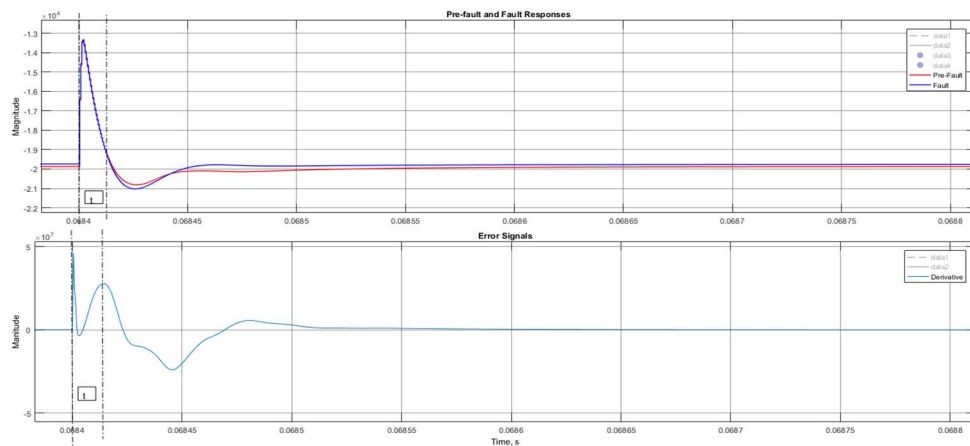
Hal penting yang perlu diketahui adalah bahwa, perbedaan waktu respon impulse sebelum dan setelah gangguan sangat mirip, yakni $12.315 \mu s$. Hal serupa juga terjadi untuk Resistansi fault 100 ohm.

Case 2: LL Fault, $R_F(5,100,300)$, Jarak 1.853,35 km

Padakasuskeduaini, diberikan persalanyang sama (jarak 1.853,35 km, $R_F(5,100,300 \text{ ohm})$), hanya berbeda pada jenis gangguannya yakni 2 fasa ketanah. Berikut adalah hasil simulasi yang diperoleh:



Gambar 4. 11 Respon Tegangan Jala-Jala, LL Fault, R_F 5 ohm, 1.853,35 km

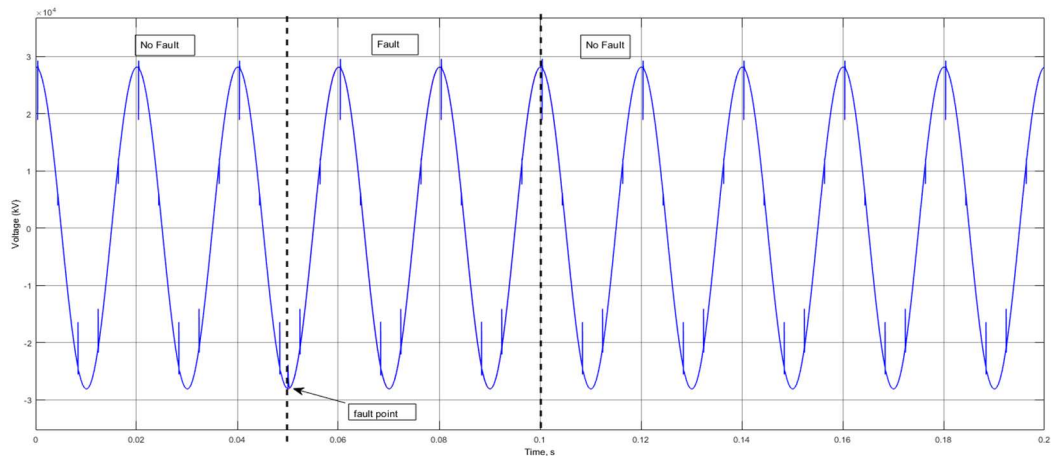


Gambar 4. 12 Respon tegangan impulse, LL Fault, R_F 5 ohm, 1.853,35 km

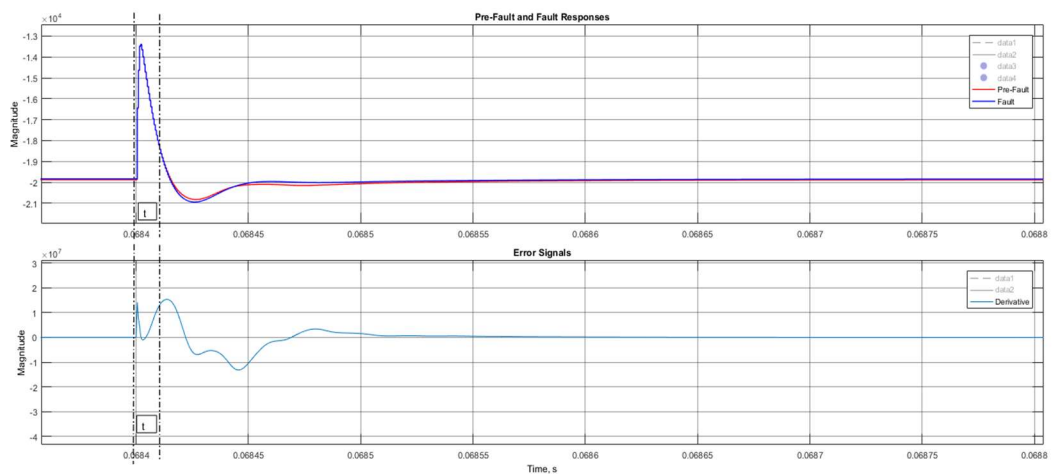
Informasi yang dapat kita peroleh dari gambar 4.12 dan 4.13 adalah bahwa gangguan LL memberikan drop tegangan yang lebih disbanding dengan gangguan LG. Sedangkan untuk respon impulse, perbedaan waktu (*time difference*) berada pada angka $12.770 \mu s$. Dengan memasukkan pada persamaan jarak dapat kita hitung:

$$d = \frac{V\Delta t}{2} = \frac{(299.863.388 * 12.770 e^{-6})}{2} = 1.914.63 m$$

Untuk tipe gangguan ini, error jarak adalah sebesar 61.28 m (331%). Jika dibandingkan dengan gangguan sebelumnya, terjadi kenaikan error, namun masih dalam batas wajar.



Gambar 4. 13 Respon Tegangan Jala-jala, LL Fault, R_F 300 ohm, 1.8 km



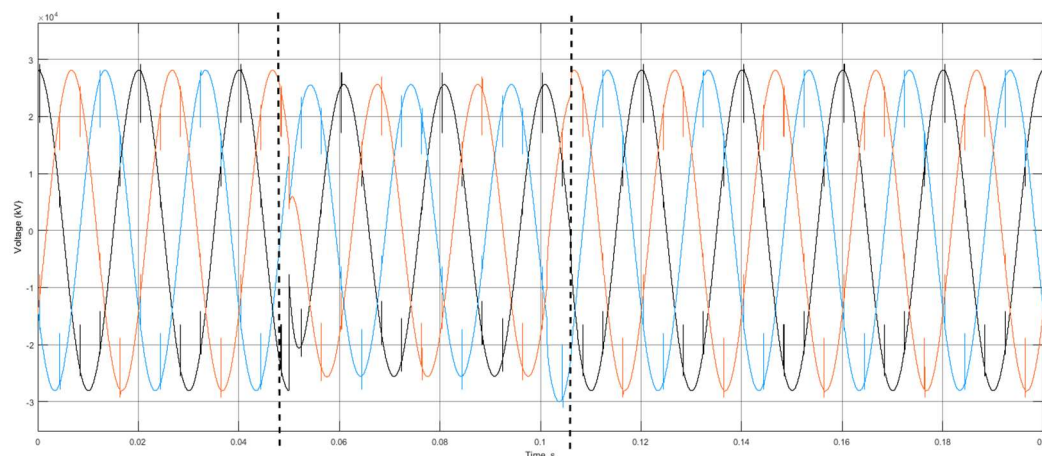
Gambar 4. 14 Respon Tegangan Impulse, LL Fault, R_F 300 ohm, 1.8 km

Hasil simulasi untuk penggantian R_F menjadi 300 ohm menunjukkan hasil yang tidak berbeda dengan gangguan 1 fasa ketanah, bahwa peningkatan R_F ini tidak berpengaruh terhadap perbedaan waktu (jarak gangguan), namun hanya berpengaruh pada drop tegangan.

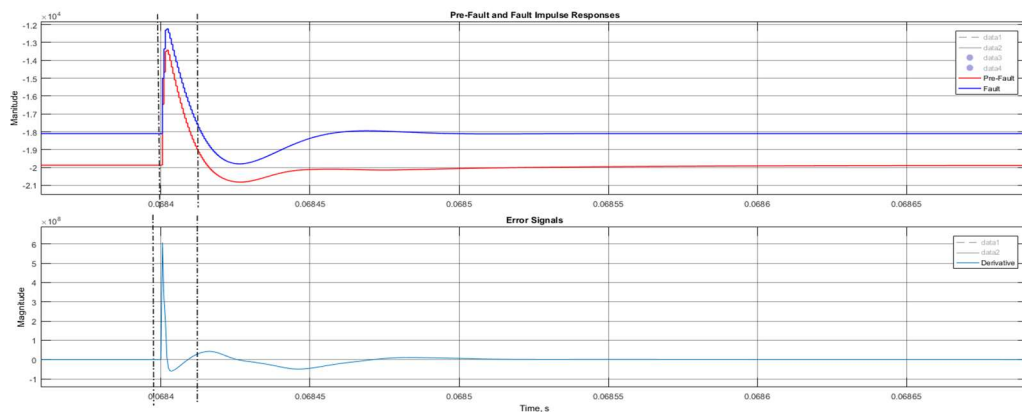
Pada hasil simulasi dengan menaikkan nilai R_F menjadi 300 ohm, maka drop tegangan mengecil. Perbedaan waktu yang terjadi sama dengan sebelumnya yakni $12.770\mu s$, sehingga jarak yang ditunjukkan adalah sama. Hal senada juga diperoleh untuk R_F 100 ohm, yang hanya berpengaruh terhadap drop tegangan yang ada.

Case 3: LLL Fault, $R_F(5,100,300)$, Jarak 1.853,35 km

Gangguan 3 fasa ini jarang terjadi, namun ketika terjadi berefek cukup signifikan terhadap system karena besarnya arus gangguan. Pada case 3 phase fault ini drop tegangan juga cukup besar, sehingga cukup sulit melakukan perbandingan respon impulse ketika fault dengan kondisi normal, karena ada offset, namun dengan melihat nilai derivative error saat maximum, akan tetap dapat diketahui lokasi gangguannya. Berikut adalah hasil simulasi untuk gangguan 3 fasa:



Gambar 4. 15 Respon Tegangan Impulse, LLLG Fault, R_F 5 ohm, 1.8 km



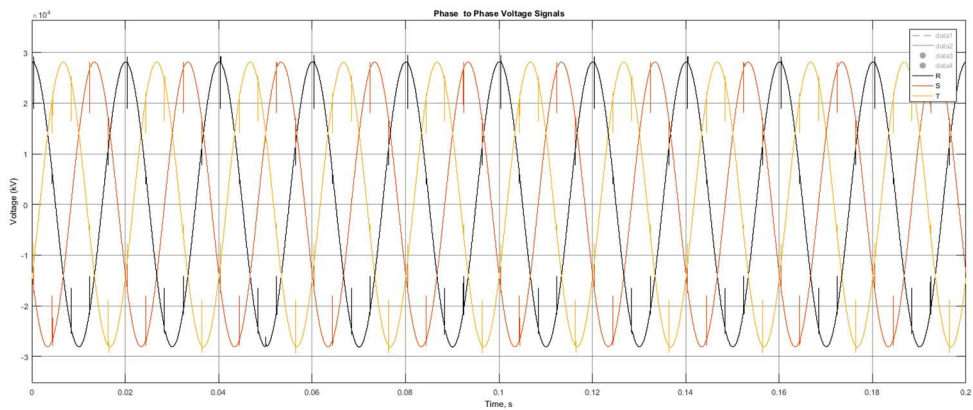
Gambar 4. 16 Respon Tegangan Impulse, LL Fault, R_f 5 ohm, 1.8 km

Terlihat pada gambar 4.16 dan 4.17, bahwa terjadi drop tegangan yang cukup besar pada saat terjadi gangguan pada detik 0.05s. Respon impulse sebelum dan setelah gangguanpun terjadi offset sehingga amat sulit menentukan dimana waktu berpisah. Ada beberapa cara menentukannya yakni dengan melihat nilai derivative error (maximum), error saja saat akan mulai naik, atau dengan menaikkan nilai dari resistansi fault, karena drop tegangan akan mengecil sedangkan time difference sama. dari hasil simulasi diatas diperoleh time difference yakni sebesar $12.756\mu s$. Jika dimasukkan persamaan maka akan diperoleh nilai:

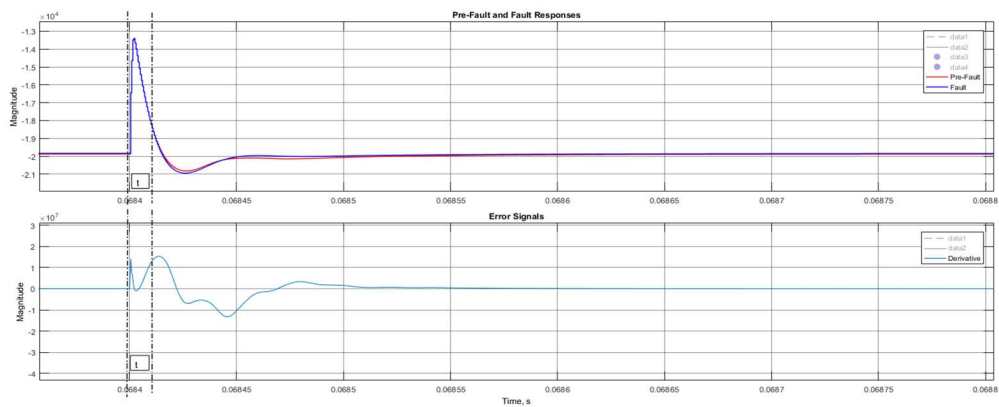
$$d = \frac{V\Delta t}{2} = \frac{(299.863.388 * 12.756 e^{-6})}{2} = 1.912,53 m$$

Maka error jarak yang terjadi untuk gangguan tiga fasa pada jarak 1.8 km adalah 59,18 m (3.19%). Hal ini sedikit lebih baik, jika dibandingkan dengan gangguan 2 fasa, hal ini mungkin disebabkan gangguan 3 fasa adalah gangguan simetris, sehingga respon impulse pada tiap fasa menjadi seimbang.

Seperti sebelumnya, sebagai perbandingan, kita naikkan nilai dari resistansi gangguan sebesar 300 ohm. Hasil simulasi menunjukkan bahwa drop tegangan mengecil, dan sinyal reflection lebih mudah untuk dilihat perbedaannya waktunya. Time difference untuk gangguan ini adalah $12.756\mu s$. Hasil ini menunjukkan kesamaan pada saat R_f 5 ohm, sehingga untuk ketiga kalinya terbukti bahwa Resistansi gangguan tidak berpengaruh terhadap penentuan lokasi gangguan. Berikut adalah hasil simulasi untuk gangguan LLLG dengan resistansi fault 300 ohm.



Gambar 4.17 Respon Tegangan Impulse, LLLG Fault, R_f 300 ohm, 1,8 km



Gambar 4.18 Respon Tegangan Impulse LLLG Fault, R_f 5 ohm, 1,8 km

Dari tiga studi case diatas untuk pengaplikasian deteksi lokasi gangguan dengan metode impulse pada jarak 1,8 km, 5 km, dan 3,35 km dengan variasi gangguan LG, LLG, dan LLLG serta variasi resistansi gangguan 5 ohm, 100 ohm dan 300 ohm dapat disimpulkan bahwa : nilai resistansi fault tidak berpengaruh terhadap penentuan lokasi gangguan dan hanya berpengaruh terhadap drop tegangan yang terjadi pada sistem. Berikut adalah ringkasan untuk percobaan diatas:

Tabel 4.2 Hasil Simulasi untuk Variasi R_f dan Jenis Gangguan (1,8 km)

Fault	Time difference (s)			Distance (m)			Error (%)		
	$R_f=5$	$R_f=100$	$R_f=300$	$R_f=5$	$R_f=100$	$R_f=300$	$R_f=5$	$R_f=100$	$R_f=300$
L-G	12.315	12.315	12.315	1846.409	1846.409	1846.409	0.37%	0.37%	0.37%
L-L-G	12.77	12.77	12.77	1914.628	1914.628	1914.628	3.31%	3.31%	3.31%
L-L-L	12.756	12.756	12.756	1912.529	1912.529	1912.529	3.19%	3.19%	3.19%

Dengan cara yang sama, dilakukan perhitungan untuk lokasi gangguan pada bus 0 dan bus 8 km. Hasil simulasi untuk kedua jarak tersebut.

Tabel 4.3 Hasil Simulasi untuk Variasi R_F dan Jenis Gangguan (2,18 km)

Fault	Time difference (s)			Distance (m)			Error (%)		
	$R_F=5$	$R_F=100$	$R_F=300$	$R_F=5$	$R_F=100$	$R_F=300$	$R_F=5$	$R_F=100$	$R_F=300$
L-G	15.326	15.326	15.326	2297.853	2297.853	2297.853	5.38%	5.38%	5.38%
L-L-G	15.37	15.37	15.37	2304.45	2304.45	2304.45	5.69%	5.69%	5.69%
L-L-L	15.348	15.348	15.348	2301.152	2301.152	2301.152	5.53%	5.53%	5.53%

Pada bus 0 dan bus 8 km, tidak ada gangguan yang terjadi karena gangguan yang terjadi adalah 5% atau sekitar 117 m dari jarak sesungguhnya. Hal ini disebabkan banyak faktor, karakteristik dari kabel, juga tingkat kesulitan pembacaan sinyal berpisah satu sama lain juga berada pada range, sehingga cukup sulit mencari time difference yang presisi.

Terakhir untuk pengujian perubahan resistansi fault ini, diberikan gangguan pada bus BH124, yakni pada jarak 3,08 km. dari hasil simulasi yang telah dilakukan, menunjukkan hasil yang tidak jauh berbeda, bahwa resistansi fault tidak memberikan pengaruh yang signifikan terhadap estimasi lokasi gangguan hasil perhitungan. Berikut adalah rekap hasil simulasi:

Tabel 4.4 Hasil Simulasi untuk Variasi R_F dan Jenis Gangguan (3,08 km)

Fault	Time difference (s)			Distance (m)			Error (%)		
	$R_F=5$	$R_F=100$	$R_F=300$	$R_F=5$	$R_F=100$	$R_F=300$	$R_F=5$	$R_F=100$	$R_F=300$
L-G	21.526	21.526	21.526	3227.43	3227.43	3227.43	4.60%	4.60%	4.60%
L-L-G	21.643	21.643	21.643	3244.972	3244.972	3244.972	5.17%	5.17%	5.17%
L-L-L	21.232	21.232	21.232	3183.35	3183.35	3183.35	3.17%	3.17%	3.17%

Pada tabel 4.4 terlihat dengan jelas bahwa, pada jarak 3,08 km, nilai error jarak pada kisaran 4.32%, atau sekitar 133 m dari jarak sesungguhnya.

4.3.2 Study Case dengan Variasi Ground Resistance (R_G)

Pada study case ini, digunakan beberapa variasi ground diantaranya 100 ohm, 300 ohm dan 500 ohm, sedangkan untuk resistansi fault yang digunakan adalah 300 ohm. Hasil simulasi ditunjukkan oleh tabel 4.4 berikut ini:

Tabel 4. 5 Hasil Simulasi dengan Variasi Ground resistance

Fault	RF	Distance (m)	Time (μ s)		
			R _G =100	R _G =300	R _G =500
L-G	300	1,853.35	12.241	12.241	12.241
L-L-G	300	1,853.35	12.486	12.486	12.486
L-L-L	300	1,853.35	12.280	12.280	12.280
L-G	300	2180.48	15.221	15.221	15.221
L-L-G	300	2180.48	15.476	15.476	15.476
L-L-L	300	2180.48	15.328	15.328	15.328
L-G	300	3,085.40	21.028	21.028	21.028
L-L-G	300	3,085.40	21.540	21.540	21.540
L-L-L	300	3,085.40	21.536	21.536	21.536

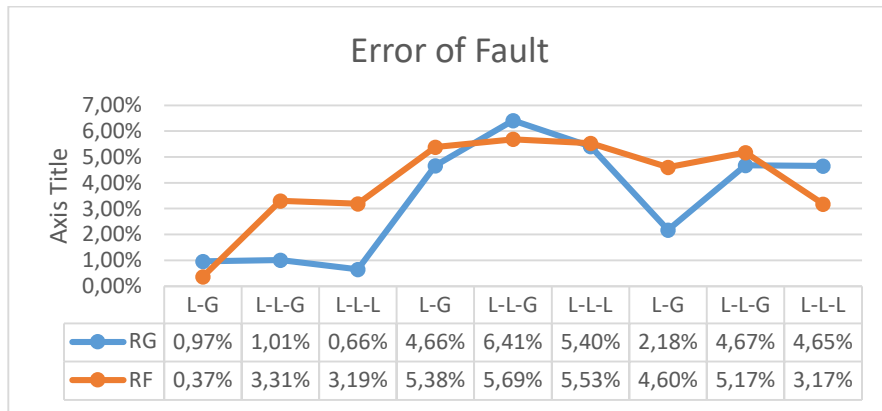
Tabel 4. 6 Jarak Hasil Perhitungan Dan Error Jarak Dengan Variasi R_G

Fault	Distance (m)			Error Distance		
	R _G =100	R _G =300	R _G =500	R _G =100	R _G =300	R _G =500
L-G	1,835.31	1,835.31	1,835.31	0.97%	0.97%	0.97%
L-L-G	1,872.05	1,872.05	1,872.05	1.01%	1.01%	1.01%
L-L-L	1,841.16	1,841.16	1,841.16	0.66%	0.66%	0.66%
L-G	2,282.11	2,282.11	2,282.11	4.66%	4.66%	4.66%
L-L-G	2,320.34	2,320.34	2,320.34	6.41%	6.41%	6.41%
L-L-L	2,298.15	2,298.15	2,298.15	5.40%	5.40%	5.40%
L-G	3,152.76	3,152.76	3,152.76	2.18%	2.18%	2.18%
L-L-G	3,229.53	3,229.53	3,229.53	4.67%	4.67%	4.67%
L-L-L	3,228.93	3,228.93	3,228.93	4.65%	4.65%	4.65%

Pada tabel 4.4 dan 4.6 kita dapatkan informasi bahwa setelah dilakukan simulasi dengan melakukan perubahan resistansi ground untuk beberapa tipe gangguan dengan R_F tetap 300 ohm diperoleh kesimpulan bahwa: besarnya resistansi fault tidak berpengaruh terhadap letak lokasi gangguan. Hal ini ditunjukkan dengan konstannya nilai time different meskipun telah dilakukan perubahan. Jika kita hubungkan dengan perubahan resistansi fault (R_F) kita dapat juga melakukan perbandingan, bagaimana perbandingan error yang dihasilkan oleh perubahan R_F dan R_G.

Perbandingan error jarak gangguan akibat perubahan R_F dan R_G dapat dilihat pada gambar 4.18. Pada gambar tersebut terlihat bahwa besarnya perubahan tipe gangguan terhadap perubahan R_F dan R_G memiliki perbandingan yang linier,

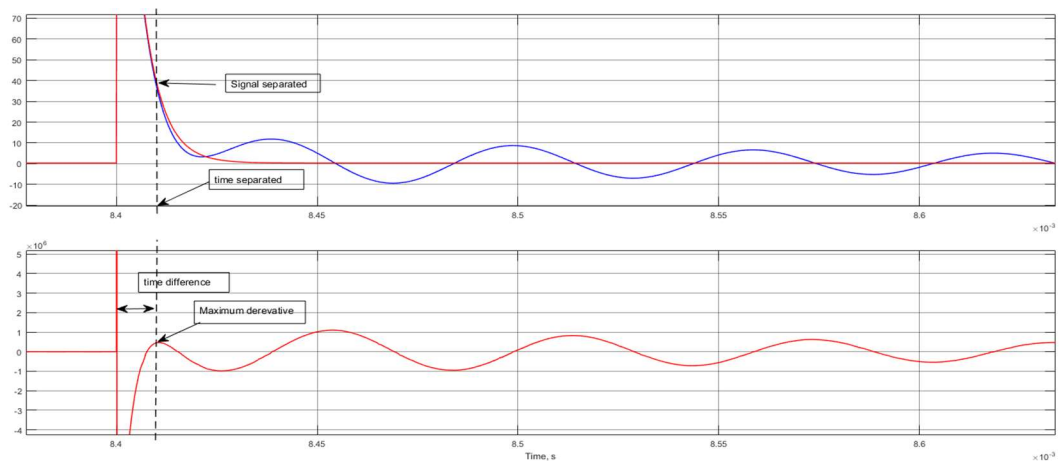
namun secara umum pengaruh dari R_F terhadap error lokasi gangguan memiliki efek yang lebih besar untuk jenis gangguan yang sama.



Gambar 4. 19 Perbandingan Error Akibat Perubahan R_F dan R_G

4.4 Implementasi Adaptive Neuro Fuzzy (ANFIS)

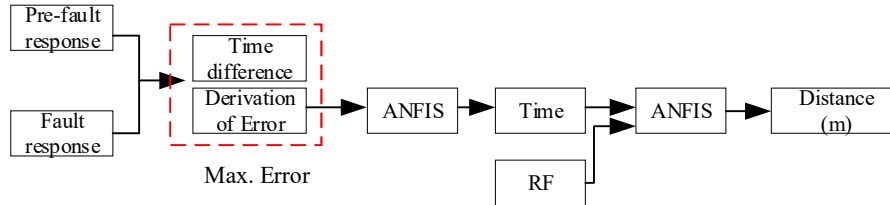
Pada metode injeksi tegangan impulse, hal terpenting adalah menemukan time difference (Δt), yang diukur dari pertama sinyal impulse diinjeksi sampai dengan kedua respon sinyal (normal dan terkena gangguan) saling berpisah satu dengan yang lain. Perhatikan gambar sinyal impulse berikut ini:



Gambar 4. 20 Komparasi Respon Sinyal

Ketika simulasi sinyal injeksi, yang diperhatikan adalah ketika sinyal berpisah satu dengan yang lain, namun output yang dicatat adalah waktu (time difference). Time different ini dapat dicari dengan mengetahui error maximum (derivative error), atau ketika pertama kali error signal akan naik. Maka dengan parameter error dan maximum error dan Δt (*perbedaan waktu*), maka dapat kita

lakukan mapping dan learning. Pada simulasi dengan ANFIS ini kami tidak melakukan semua untuk variasi gangguan, kami pilih gangguan tiga fasa LLLG saja, dikarenakan banyaknya step yang harus disiapkan. Berikut adalah diagram untuk learning ANFIS yang diajukan untuk menentukan lokasi gangguan.



Gambar 4. 21 Skema Learning dengan ANFIS

Traning ANFIS 1

Pada gambar 4.20 terdapat dua buah ANFIS, pada tahap ini pertama adalah untuk melakukan learning terhadap maximum error, untuk menemukan time dirrent

Tabel 4. 7 *Data Learning For Time Different*

No	Max Error	LLLG	No	Max Error	LLLG	No	Max Error	LLLG
		fault			fault			fault
1	213.3	12.315	10	190.6	15.675	19	206.9	17.059
2	213.3	12.315	11	190.6	15.675	20	206.9	17.059
3	213.3	12.315	12	190.6	15.675	21	206.9	17.059
4	192.3	14.63	13	192.5	15.981	22	288.3	17.784
5	192.3	14.63	14	192.5	15.981	23	288.3	17.784
6	192.3	14.63	15	192.5	15.981	24	288.3	17.784
7	191.9	14.93	16	199.6	16.991	25	239.7	21.028
8	191.9	14.93	17	199.6	16.991	26	239.7	21.54
9	191.9	14.93	18	199.6	16.991	27	239.7	21.536

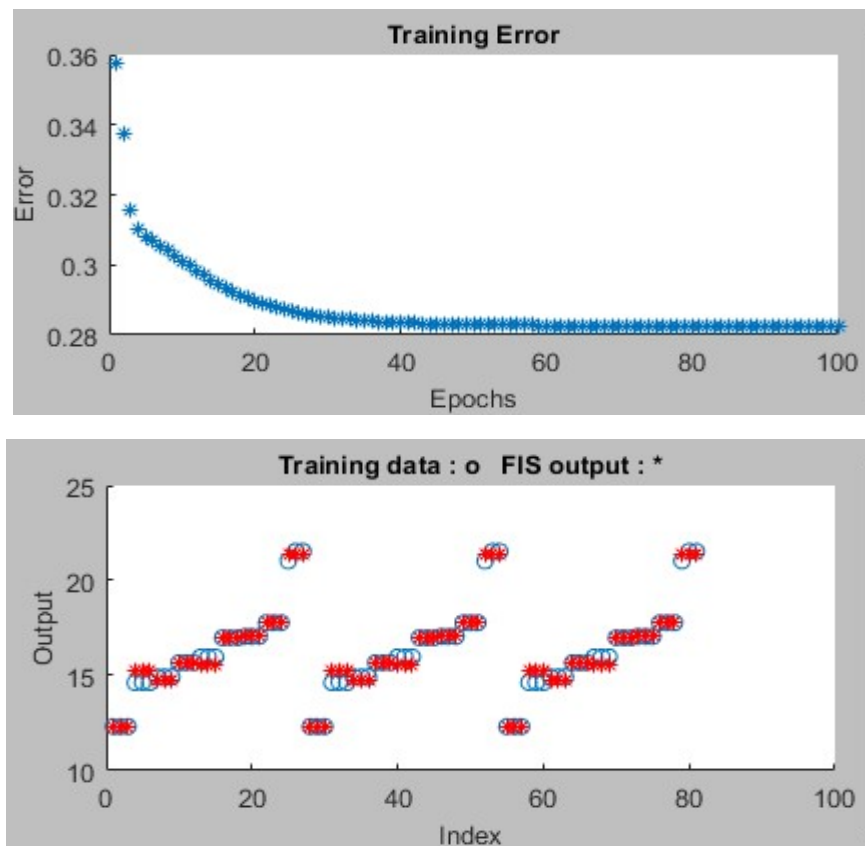
Maka dari data diatas akan kita mapping dan training, berikut adalah hasil mapping dan training data. Untuk data learning, seperti yang ditunjukkan oleh gambar 3.14, digunakan sebanyak 27 buah data error untuk jenis gangguan tiga fasa ke tanah, dan time difference pada saat maximum error tersebut. Dari data-data error tersebut diharapkan dapat menunjukkan time difference sesuai dengan keadaan sistem.



Gambar 4. 22 Data Training

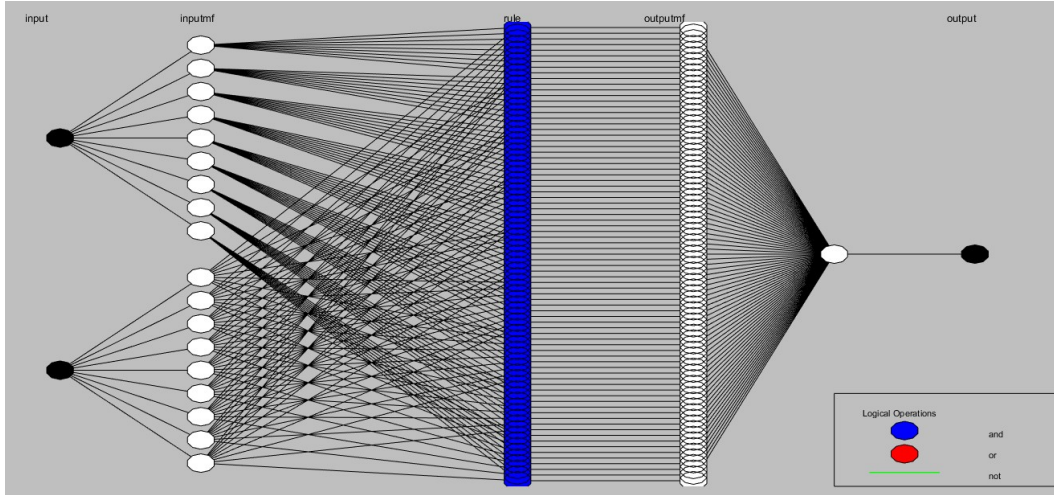
Fungsi yang akan dipakai untuk membership function bentuk setgitiga dengan 9 buah membership, Optimisasi yang dipakai adalah hybrid, dengan banyak iterasi adalah 100 epoch.

Dari training yang dilakukan error yang dicapai adalah 0.28 pada iterasi ke 100. Berikut ini adalah hasil training:



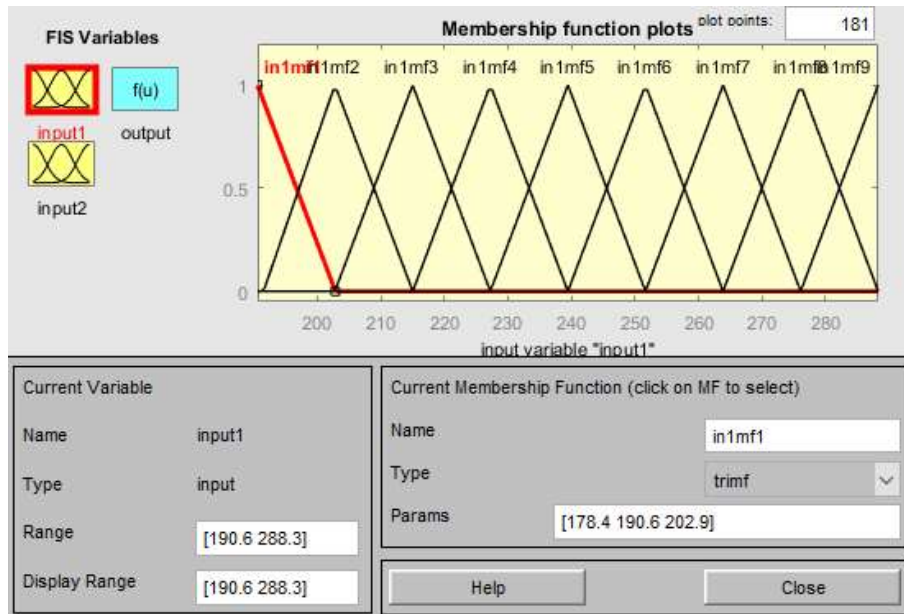
Gambar 4. 23 Error dan Hasil training FIS

Dari hasil training tersebut , mak aakan terbentuk struktur ANFIS seperti yang ditunjukkan pada gambar 4.23 berikut ini.



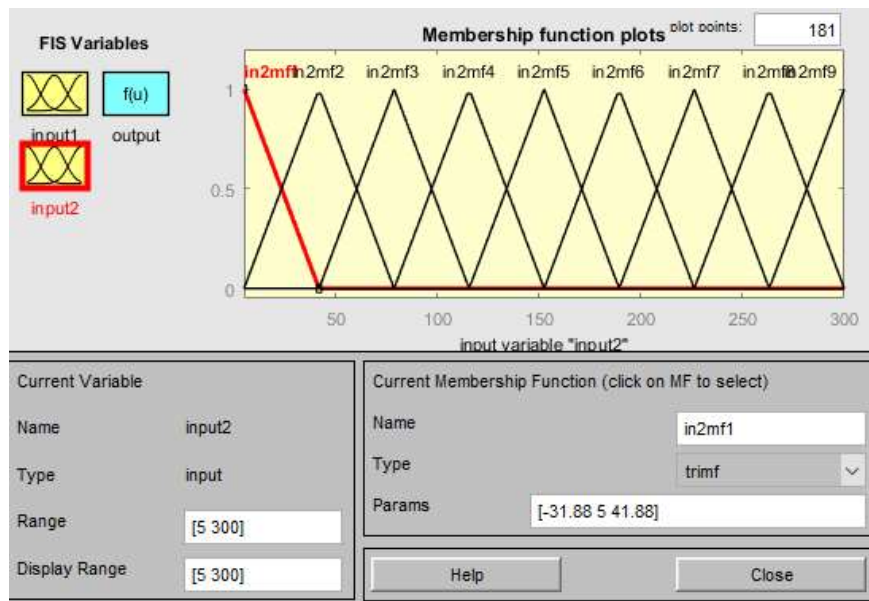
Gambar 4. 24 Struktur ANFIS

Akhirnya kita dapatkan *membership function hasil learning data error* dari sistem, seperti yang ditunjukkan oleh gambar 4.24 dan 4.25 berikut ini:



Gambar 4. 25 Fungsi Membership Input 1 (Maximum Error)

Untuk membership function input ada 9 buah membership dnegan range [190.6 268 . 3]. Sementara untuk fungsi input RF memiliki range [0,300].



Gambar 4. 26 Membership Function untuk Input R_F

Dengan 9 membership function input1 dan 2, maka akan ada 8 kombinasi rule untuk fuzzy tersebut.

Training ANFIS 2

Pada dasarnya tidak ada perbedaan signifikan secara teknik untuk membentuk himpunan Fuzzy jika dibandingkan pada training ANFIS 1, pada training ANFIS2 ini, lebih untuk menggantikan fungsi perhitungan jarak. Pada ANFIS 2 ini dipetakan seluruh potensi fault pada titik antara bus BH679 sampai BH124. Data training yang digunakan adalah sebagai berikut:

Tabel 4. 8 Data Training untuk Penentuan Lokasi Gangguan

No	RF	RF	RF	DeIT	Distance
1	5	100	300	0.3558388	53.3515122
2	5	100	300	0.689324	103.3515122
3	5	100	300	1.0228092	153.3515122
4	5	100	300	1.3562944	203.3515122
5	5	100	300	1.6897796	253.3515122
6	5	100	300	2.0232648	303.3515122
7	5	100	300	2.35675	353.3515122
8	5	100	300	2.6902351	403.3515122

Tabel 4. 9 Data Training untuk Penentuan Lokasi Gangguan lanjutan (1)

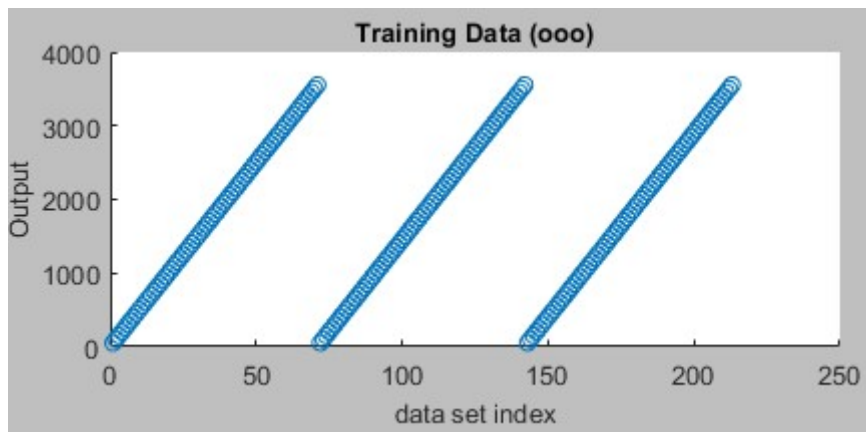
No	RF	RF	RF	DeIT	Distance
9	5	100	300	3.0237203	453.3515122
10	5	100	300	3.3572055	503.3515122
11	5	100	300	3.6906907	553.3515122
12	5	100	300	4.0241759	603.3515122
13	5	100	300	4.3576611	653.3515122
14	5	100	300	4.6911463	703.3515122
15	5	100	300	5.0246315	753.3515122
16	5	100	300	5.3581167	803.3515122
17	5	100	300	5.6916019	853.3515122
18	5	100	300	6.0250871	903.3515122
19	5	100	300	6.3585723	953.3515122
20	5	100	300	6.6920575	1,003.35
21	5	100	300	7.0255427	1,053.35
22	5	100	300	7.3590279	1,103.35
23	5	100	300	7.6925131	1,153.35
24	5	100	300	8.0259982	1,203.35
25	5	100	300	8.3594834	1,253.35
26	5	100	300	8.6929686	1,303.35
27	5	100	300	9.0264538	1,353.35
28	5	100	300	9.359939	1,403.35
29	5	100	300	9.6934242	1,453.35
30	5	100	300	10.0269094	1,503.35
31	5	100	300	10.3603946	1,553.35
32	5	100	300	10.6938798	1,603.35
33	5	100	300	11.027365	1,653.35
34	5	100	300	11.3608502	1,703.35
35	5	100	300	11.6943354	1,753.35
36	5	100	300	12.0278206	1,803.35
37	5	100	300	12.3613058	1,853.35
38	5	100	300	12.694791	1,903.35
39	5	100	300	13.0282762	1,953.35
40	5	100	300	13.3617613	2,003.35
41	5	100	300	13.6952465	2,053.35
42	5	100	300	14.0287317	2,103.35
43	5	100	300	14.3622169	2,153.35
44	5	100	300	14.6957021	2,203.35
45	5	100	300	15.0291873	2,253.35
46	5	100	300	15.3626725	2,303.35
47	5	100	300	15.6961577	2,353.35

Tabel 4. 10 Data Training untuk Penentuan Lokasi Gangguan lanjutan (2)

No	RF	RF	RF	DelT	Distance
48	5	100	300	16.0296429	2,403.35
49	5	100	300	16.3631281	2,453.35
50	5	100	300	16.6966133	2,503.35
51	5	100	300	17.0300985	2,553.35
52	5	100	300	17.3635837	2,603.35
53	5	100	300	17.6970689	2,653.35
54	5	100	300	18.0305541	2,703.35
55	5	100	300	18.3640393	2,753.35
56	5	100	300	18.6975244	2,803.35
57	5	100	300	19.0310096	2,853.35
58	5	100	300	19.3644948	2,903.35
59	5	100	300	19.69798	2,953.35
60	5	100	300	20.0314652	3,003.35
61	5	100	300	20.3649504	3,053.35
62	5	100	300	20.6984356	3,103.35
63	5	100	300	21.0319208	3,153.35
64	5	100	300	21.365406	3,203.35
65	5	100	300	21.6988912	3,253.35
66	5	100	300	22.0323764	3,303.35
67	5	100	300	22.3658616	3,353.35
68	5	100	300	22.6993468	3,403.35
69	5	100	300	23.032832	3,453.35
70	5	100	300	23.3663172	3,503.35
71	5	100	300	23.6998024	3,553.35

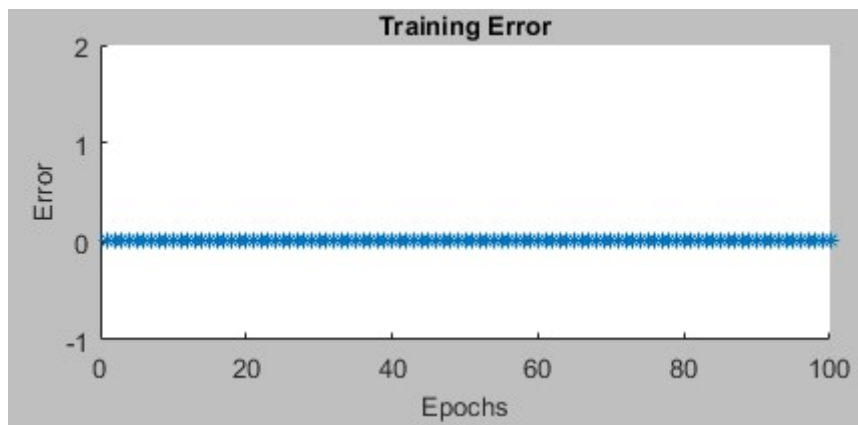
Data training yang digunakan ada sebanyak 71 buah, dengan variasi resistansi fault 5,100 dan 300 ohm, sedangkan input yang satu lagi adalah delT (time difference). Untuk output adalah jarak, dan data training yang ada selanjutnya adalah dilakukan mapping dan dilakukan training.

Membership function input pada sistem ini adalah 3 buah, dengan menggunakan fungsi segitiga. Metode optimisasi yang dipakai adalah Hybrid, dengan iterasi 100 buah. Hasil mapping dan training ditunjukkan oleh gambar 4.27 dan 4.28 berikut ini.

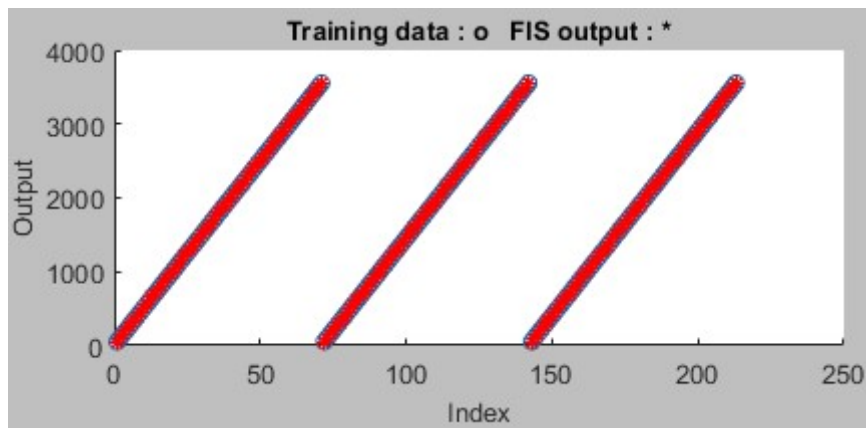


Gambar 4. 27 *Mapping Data Training*

Dari training yang dilakukan error pada saat training adalah sangat kecil yakni 1.2×10^{-5} atau mendekati nol. Hasil training ini kemudian diujicobakan dengan data training yang kita pakai, dan hasilnya dapat dilihat pada gambar 4.28 berikut ini.



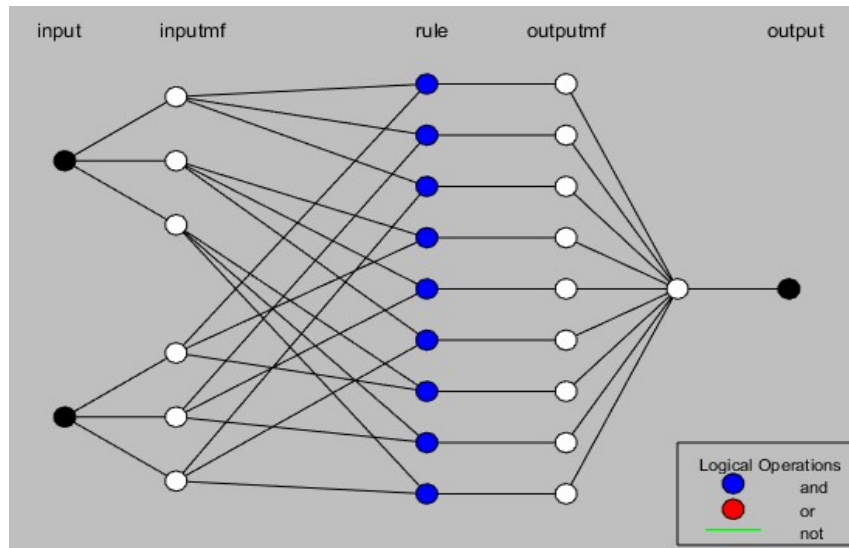
Gambar 4. 28 *Error Training Data 1.2×10^{-5}*



Gambar 4. 29 Hasil Uji Coba dengan Data Training

dari hasil training yang ditunjukkan pada gambar 4.29, menunjukkan hasil yang bagus dan error yang kecil.

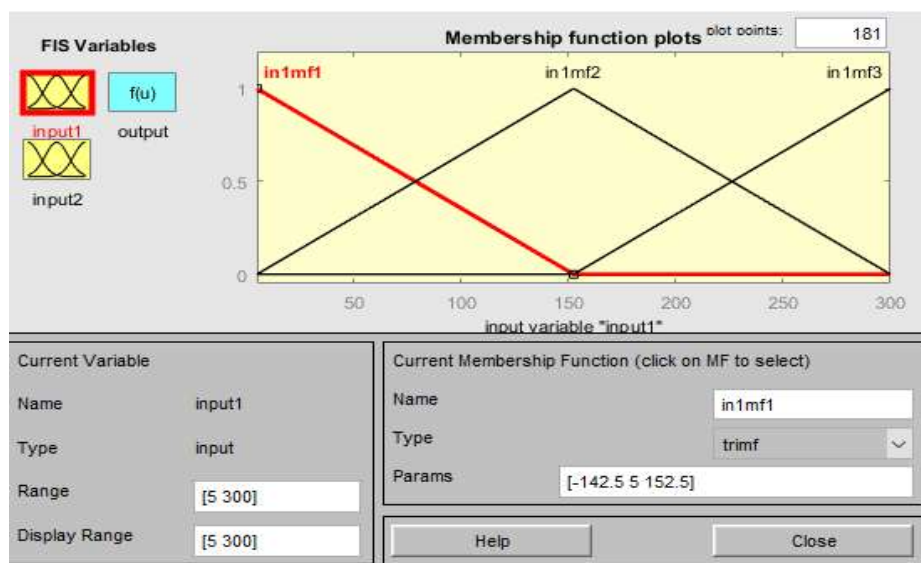
Untuk struktur ANFIS yang terbentuk dengan 3 buah membership function adalah sebagai berikut:



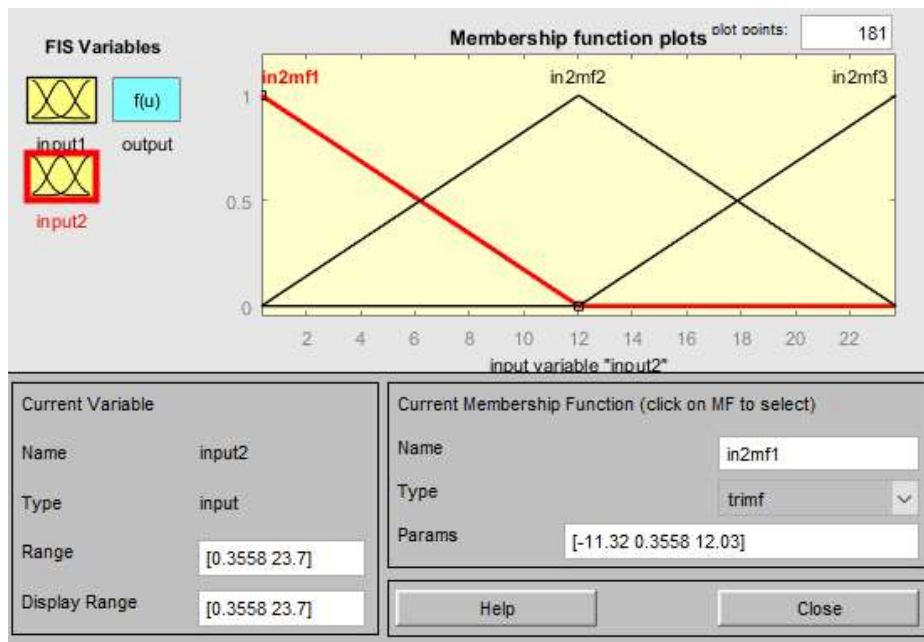
Gambar 4. 30 Struktur ANFIS Penentuan Lokasi Gangguan

Pada gambar 4.40, input yang digunakan adalah dua yakni R_F dan error dari response impulse, kemudian masing-masing memiliki 3 buah membership function. dengan mengkombinasikan kedua input ini, maka terdapat setidaknya 9 rule. Kemudian dari rule ini akan ditarik dalam 9 output membership function, dan disimpulkan dalam satu ouput.

Berikut adalah FIS hasil pelatihan dengan ANFIS,

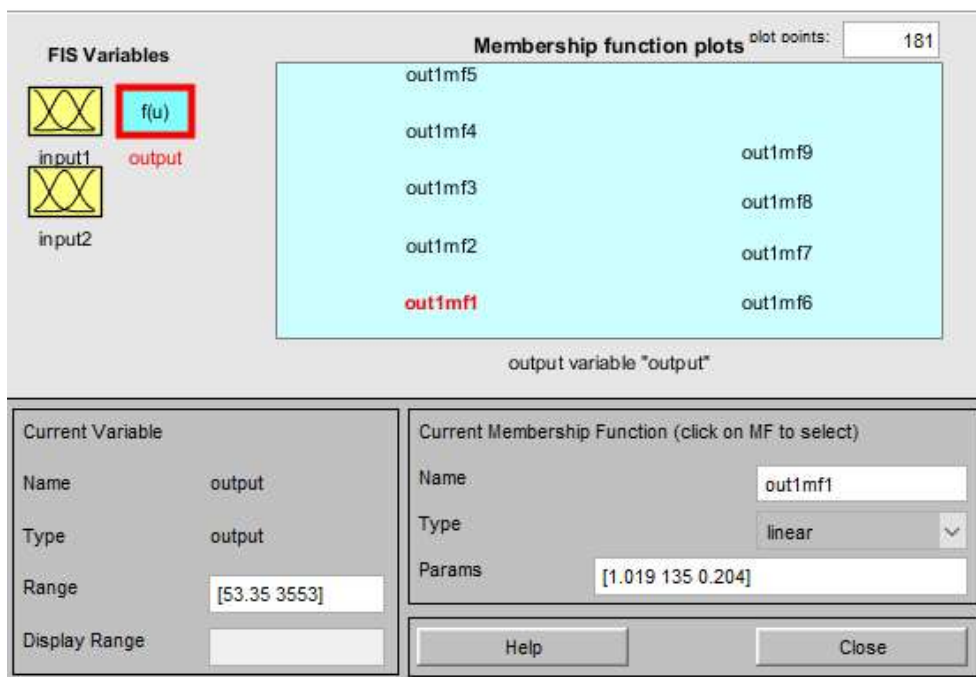


Gambar 4. 31 Membership Function untuk R_F

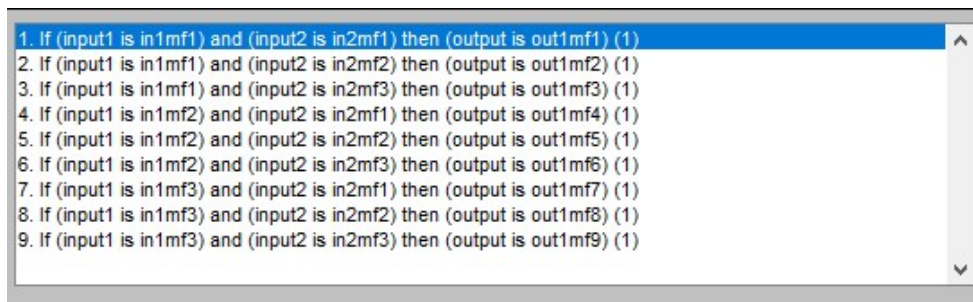


Gambar 4. 32 *Membership Function* untuk Perbedaan Waktu (Δt)

Sedangkan untuk output dan rule base yang digunakan masing-masing ditunjukkan oleh gambar 4.32 dan 4.33 berikut ini.



Gambar 4. 33 *Membership Function Output* (9 output)



Gambar 4. 34 Rule Base

Setelah melakukan training untuk ANFIS 1 (untuk menentukan waktu) dan training ANFIS 2 (untuk menentukan lokasi gangguan), selanjutnya adalah melakukan pengujian ke sistem yang telah dimodelkan secara langsung, yang sebelumnya kita harus melihat terlebih dahulu sinyalnya, sekarang dengan dua buah ANFIS ini maka kita hanya perlu untuk menentukan lokasi faultnya saja selanjutnya ANFIS yang akan menghitung dimana lokasi gangguan berada.

Pada uji coba ini akan digunakan 9 titik lokasi, sesuai dengan desain ANFIS penentuan lokasi gangguan, yang meliputi BH649, BH697, Bus_1, Bus_2, BH156, BH174, BH114, BH262 dan BH124. Berikut adalah hasil simulasi yang dilakukan dengan melakukan short circuit 3 phasa pada 9 lokasi tersebut dengan. Diperoleh hasil seperti yang ditunjukkan pada tabel berikut ini:

Tabel 4. 11 Hasil Penggunaan ANFIS

Bus	Actual Distance	Distance by ANFIS			Average	Average Error
		RF5	RF100	RF300		
BH649	1,853.35	1,840.11	1,839.87	1,839.89	1,839.96	0.73%
BH697	2,180.48	2,294.53	2,295.43	2,254.42	2,281.46	4.43%
BUS_1	2,197.19	2,204.12	2,200.08	2,200.03	2,201.41	0.19%
BUS_2	2,285.65	2,356.40	2,357.45	2,357.43	2,357.09	3.03%
BH156	2,373.58	2,323.50	2,325.90	2,325.90	2,325.10	2.09%
BH174	2,512.78	2,545.34	2,544.70	2,544.73	2,544.92	1.26%
BH114	2,626.05	2,556.14	2,556.21	2,556.21	2,556.19	2.73%
BH262	2,796.23	2,683.99	2,699.14	2,665.53	2,682.89	4.22%
BH124	3,085.65	3,194.96	3,194.00	3,193.70	3,194.22	3.40%

Dengan penggunaan ANFIS pada lokasi BH694, BH697 dan BH124, masing-masing error distance adalah 0.73%, 4.43% dan 3.40%.

Tabel 4. 12 Hasil Penggunaan Metode Injeksi Impulse

Bus	Fault	Lokasi	R _G	R _F
BH649	L-G	Ø 5 3	0.97%	0.37%
BH649	L-L-G	Ø 5 3	1.01%	3.31%
BH649	L-L-L	Ø 5 3	0.66%	3.19%
BH697	L-G	Ø	4.66%	Ø %
BH697	L-L-G	Ø	6.41%	5.69%
BH697	L-L-L	Ø	5.40%	5.53%
BH124	L-G	Ø 5 6	Ø %	4.60%
BH124	L-L-G	Ø 5 6	4.67%	5.17%
BH124	L-L-L	Ø 5 6	4.65%	3.17%

Kalau kita membandingkan tabel 4.8 dan 4.9 maka terlihat dengan jelas, bahwa untuk lokasi yang sama, metode ANFIS ini mampu memperbaiki error pada deteksi lokasi gangguan. Misalnya pada bus BH649 error jarak mencapai 3.19% sedangkan dengan ANFIS mampu turun menjadi 0.73%, kemudian pada bus BH697 juga yang awalnya error jarak adalah 5.53% sekarang turun menjadi 4.43%.

BAB 5

KESIMPULAN

Adapun beberapa kesimpulan yang dapat diambil dari kegiatan penelitian ini antara lain:

1. Metode pendeteksi gangguan menggunakan teknik injeksi impulse memiliki banyak sekali keunggulan dibandingkan dengan metode lainnya diantaranya: mudah dalam pengaplikasiannya, cepat dalam memperoleh hasil, tidak terpengaruh oleh besarnya resistansi gangguan maupun resistansi ke tanah.
2. Kendala yang dihadapi dalam pengujian teknik ini adalah cukup sulitnya menentukan perbedaan waktu (time difference), karena ordenya adalah μs , sehingga ketidakakuratan dalam penentuan waktu berpisah itu akan mempengaruhi hasilnya.
3. Kecepatan impulse pada propagasi berbeda-beda, tergantung dari karakteristik dari kabel yang digunakan, sehingga sangat penting untuk mengetahui speed propagation coefficient pada kabel yang akan dilakukan pengujian
4. Teknik pengujian dengan injeksi tegangan impulse ini, akan lebih akurat jika dilakukan secara offline, karena besarnya magnitude arus dan tegangan sebenarnya memang tidak berpengaruh terhadap lokasi gangguan, namun mempersulit pembacaan.
5. Semakin jauh jarak yang diukur, maka error juga akan semakin meningkat, hal ini sangat dipenaruhi oleh besarnya lebar pulsa dari tegangan impulse dan rise timenya, sehingga untuk jarak yang jauh lebar pulsa harus ditingkatkan untuk memperoleh hasil yang sesuai.
6. Aplikasi ANFIS dalam mapping dan learning time different memberikan dampak yang cukup bagus, paling tidak kita tidak perlu melakukan perhitungan secara manual, dan mengamati bentuk sinyal ketika akan berpisah (time difference) untuk setiap kali uji coba gangguan.
7. Penggunaan GIS dimasa depan akan memberikan dampak yang bagus.

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR PUSTAKA

- [1] T. A. A. Qoyyimi, "PENENTUAN LOKASI GANGGUAN HUBUNG SINGKAT PADA JARINGAN DISTRIBUSI 20 kV PENYULANG TEGALSARI SURABAYA DENGAN METODE IMPEDANSI BERBASIS GIS(GEOGRAPHIC INFORMATION SYSTEM)," *Electrical Engineering*, Insitute of Technology of Sepuluh Nopember, 2017.
- [2] A. Muhamad Otong, Chandra Arief B, "Deteksi Jarak Lokasi Gangguan Pada Saluran Transmisi 500 Kv Cilegon Baru - Cibinong Menggunakan Adaptive Neuro Fuzzy Inference System (ANFIS)," *SETRUM*, vol. 6, pp. 42-54, 2017.
- [3] S. y. S. Hui Hwang Goh, Mohamad Amirul Hafiz Muhamamed, Abdul Khairi Abdul Rahman, Chin Wan Ling, Qing shi Cua, Kai Chen Goh, "Fault Location Techniques in Electrical Power System: Review," *Indonesian Journal of Electrical Power System: A Review*, vol.8, pp.206-212, 2017.
- [4] M. I. Gunartono, "PENENTUAN LOKASI GANGGUAN MENGGUNAKAN PENDEKATAN URUTAN KEDIP TEGANGAN PADA SISTEM DISTRIBUSI BERBASIS GEOGRAPHICAL INFORMATION SYSTEM (GIS)," Insitute of Technology of Sepuluh Nopember, 2017.
- [5] F. A. J. Azriyenni Azhari Zakri, dan Iswadi Hasyim Rosma, "Pemodelan Estimasi Lokasi Gangguan pada Sistem Transmisi Adaptasi Metode ANFIS," *Seminar Nasional dan Expo Teknik Elektro*, pp.53-58, 2017.
- [6] M. G.-G. M. Abad, N. El Halabi, D. López Andía, "Network impulse response based-on fault location method for fault location in power distribution systems," *IET Generation, Transmission & Distribution*, 2016.
- [7] M. D. A. Lazuardi, "Pelacakan Lokasi Gangguan Penyulang 20 kV Berdasarkan Perhitungan Arus Gangguan Hubung Singkat," *Jurnal Teknik Elektro Universitas Muhammadiyah Jember*, 2015.
- [8] S. Erlwati, dan Muhammad Nurdin, "KOORDINASI SISTEM PROTEKSI ARUS LEBIH PADA PENYULANG DISTRIBUSI 20 kV GI PAUH LIMO," *Jurnal Nasional Teknik Elektro*, vol. 4, 2015.
- [9] K. P. D. Prabhavathi, Dr.M.Suryakalavathi, B.Ravindranath Reddy, "Detection and Location of Faults in 11KV Underground Cable by using Continuous Wavelet Transform (CWT)," *IOSR Journal of Electrical and Electronics Engineering*, vol. 10, pp. 44-50, 2015.
- [10] S. Ghimire, "Analysis of Fault location methods on transmission lines," Master, Master of Science IN Engineering Electrical, University Of New Orelans, Dissertations and Theses at ScholarWorks@UNO, 2014.
- [11] A. P. Diah Risqiwati, dan Mauridhi Hery Purnomo "Deteksi Lokasi Untuk Gangguan Multi Point Pada Jaring Tiang Distribusi 20 KV Dengan Menggunakan Metode Perambatan Gelombang Sinyal Arus Balik," *SITIA 2013*, 2013.
- [12] R. T. H. Prabowo Pudjo Widodo, *Penerapan Soft Computing dengan MATLAB*. Bandung: Rekayasa Sains, 2012.

- [13] A. A. d. V. Custodio Dias, "HIGH PERFORMANCE DIGITAL PROCESSING OF HIGH VOLTAGE IMPULSES BASED ON TIME-FREQUENCY ANALYSIS," *Mediterranean Electrotechnical Conference, IEEE*, vol. II, 2000.
- [14] A. S. J. P.R.Silva, W .C.Boaventura, G .C.Miranda, "Impulse Response Analysis of a Real Feeder for High Impedance Fault Detection," *IEEE*, 1994.
- [15] P. K. W. K.K. Kuan, "Real-time expert system for fault location on high voltage underground distribution cables," *IEE*, vol. 139, 1992.
- [16] M.S.ELKATEB, "Cable Fault Location Techniques," Master, Electrical Engineering, University of New South Wales, University of New South Wales, 1978
- [17] B. T. P.F. Gale, Ph.D, "Cable-fault location by impulse-current method," *IEE*, vol. 122, 1975.
- [18]] M.I.T.E.B.Clegg and N.G.Lord, C.Eng, M.I.EE, "Modern cable-fault location methods," *IEE*, vol. 122, 1975.
- [19] A. A. B. Shrikrushna R Sapkal, "Identification of Faults in Power System Using Fuzzy Logic Technique," *International Journal of Engineering Research and Development*, vol. 12, pp. 01-06, 2016.
- [20] A. K. J. Prashant Gautam, "Fault Detection & Classification of 3-Phase Transmission Line," *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*, vol. 02, 2015.
- [21] A. P. V. R. P. Hasabe, "Detection and classification of faults on 220 kV transmission line using wavelet transform and neural network," *International Journal of Smart Grid and Clean Energy*, vol. 3, 2014.
- [22] I. P. Asep Parlin, "Identifikasi Jenis dan Lokasi Gangguan Hubung Singkat Pada Saluran Transmisi Berbasis Wavelet," *Jurnal Ilmiah Bidang Teknik Elektro dan Komputer*, vol. 1, 2011.
- [23] K. Z. a. D. Costello, "Impedance-Based Fault Location Experience," *IEEE*, 2005.
- [24] C. Cekdin, *Sistem Tenaga Listrik Contoh Soal dan Penyelesaian Menggunakan MATLAB*. Yogyakarta: ANDI, 2006.
- [25] S. H. Al-Saiari, "ANALYSIS OF POWER SYSTEMS UNDER NORMAL AND FAULT CONDITIONS," BS, King Fahd University of Petroleum and Minerals, Saudi Arabia, CALIFORNIA STATE UNIVERSITY, SACRAMENTO 2011.
- [26] A. S. Sri Koestanto, Mauridhi Hery P., "IDENTIFIKASI GANGGUAN HUBUNGAN SINGKAT PADA SISTEM DISTRIBUSI RADIAL MENGGUNAKAN GENETIC ALGORITHM (GA) – FUZZY," presented at the Konferensi Nasional Sistem dan Informatika 2009, Bali, 2009.
- [27] A. H. D. Linh Tran Hoai, "Fault Location detection on the transmission lines using the time domain reflectometry method basing on the analysis of reflected waveform," *IEEE -International Conference on Sustainable Energy Technology (ICSET)*, p. 241, 2016.
- [28]] S.S.Y.HMdThayob, A.MohdAriffin, "Analysis of Wave Propagation in Time Domain Reflectometry Circuit Simulation Model," *IEEE-*

International Conference on Power and Energy(PECon2010), p. 276, 29
Nov 2010 2010.

- [29] V. Dubickas, "On-line time domain reflectometry diagnostic of medium voltage XLPE power cables," Master Degree, Elektronisk teori och konstruktion, University Kungl Tekniska Hogskolan, Lindstedtsv, Stockholm, Stockholm, Sweden, 2006.
- [30] V. K. Verma, "Practical Simulation and Modeling of Lightning Impulse Voltage Generator using Marx Circuit," Master, Electrical Engineering, National Institute of Technology Rourkela, Odhisa, 2014

Halaman ini sengaja dikosongkan

RIWAYAT PENULIS



Penulis bernama lengkap **Muhammad Budi Rahayu Widodo**, lahir di Desa Rahayu, Kecamatan Soko, Kabupaten Tuban pada hari Senin, tanggal 07 Desember 1987. Anak kedua dari pasangan Drs. Suhardi dan Dra. Warinten ini, telah menyelesaikan pendidikan sarjana di jurusan Teknik Sistem Tenaga ITS pada tahun 2010 dengan predikat Cumlaud. Adapun riwayat pekerjaan beliau tercatat pernah bekerja di PT. Samsung Electronics Indonesia sebagai Research and Development Engineer (2010-2013), dan sejak tahun 2014 sampai dengan sekarang bekerja di PDAM Surya Sembada Kota Surabaya dan menjabat sebagai Senior Staf Pemeliharaan Mekanikal dan Elektrikal (Sejak 2017).

Pada tahun 2012 penulis menikahi teman satu kampus (Teknik Industri ITS) bernama Ardana Putri Farahdiansari, dan dikaruniai 3 orang anak bernama: Nashita Pradnya Putri Atha Widodo, M. Sakhkhara Prabu Antares Widodo, dan Fatiha Rizqy Ashana Widodo. Kedepan penulis berharap dapat melanjutkan setudi di luar negeri dan dapat mengajar di kampus ITS dan dapat menelurkan banyak karya terutama buku dan paper dalam bidang Teknik Sistem Tenaga.

Kata mutiara:

“ Dia mencitpakan kehidupan dan kematian untuk menguji siapa diantara kamu yang paling baik amalnya”.

“ Dan jadikanlah sholat dan sabar menjadi bagian dari pertolongan Allah kepadamu”.

Muh. Budi Rahayu Widodo

10 Januari 2020