

**ANALISIS GANGGUAN HUBUNG SINGKAT
DENGAN MEMPERTIMBANGKAN SALURAN FASA TIDAK LENGKAP
PADA JARINGAN DISTRIBUSI MENGGUNAKAN
METODE *GENERAL FAULT ADMITTANCE***

(Skripsi)

Oleh

MUHAMMAD AL HADI

1915031021



JURUSAN TEKNIK ELEKTRO

FAKULTAS TEKNIK

UNIVERSITAS LAMPUNG

BANDAR LAMPUNG

2023

ABSTRAK

ANALISIS GANGGUAN HUBUNG SINGKAT DENGAN MEMPERTIMBANGKAN SALURAN FASA TIDAK LENGKAP PADA JARINGAN DISTRIBUSI MENGGUNAKAN METODE *GENERAL FAULT ADMITTANCE*

Oleh

MUHAMMAD AL HADI

Studi gangguan hubung singkat sangatlah penting dalam analisis sistem tenaga listrik karena sebagai acuan dalam menentukan parameter pengaturan komponen sistem proteksi. Untuk melakukan perhitungan terhadap arus gangguan hubung singkat, dibutuhkan sebuah metode komputasi yang dapat mengakomodir semua jenis gangguan hubung singkat menjadi satu formula yang umum. Penelitian ini menggunakan metode *general fault admittance* sebagai model komputasi dari formula arus gangguan hubung singkat dan menggunakan bahasa pemrograman *python* sebagai perangkat lunak komputasi. Data masukkan perangkat lunak berasal dari IEEE PES (*Power & Energy Society*) *Distribution Test Feeder* yaitu, IEEE 13 *Node Test Feeder*, IEEE 34 *Node Test Feeder* dan IEEE 123 *Node Test Feeder*. Dimana kasus tersebut merupakan jaringan distribusi tidak seimbang dan terdapat beberapa saluran fasa tak lengkap yang dimodelkan dari keadaan fisik saluran. Konsekuensi dari saluran fasa tak lengkap adalah adanya impedansi bersama antar urutan (elemen *off-diagonal* matriks impedansi urutan sistem). Pada kasus 13 *Node*, impedansi bersama urutan thevenin terbesar terletak pada bus 652 yaitu $\hat{z}_{21} = 8.49 \times 10^{-1} \Omega$. Sedangkan pada kasus 34 *Node*, impedansi bersama urutan thevenin terbesar terletak pada bus 822 yaitu $\hat{z}_{20} = 2.59 \Omega$. Perangkat lunak yang dikembangkan dalam penelitian ini dibandingkan dengan perangkat lunak OpenDSS dan diperoleh selisih magnitudo arus tidak lebih dari $3.0 \times 10^{-4} p.u.$

Kata kunci: gangguan hubung singkat, jaringan distribusi, saluran fasa tak lengkap, *general fault admittance*.

ABSTRACT

ANALYSIS OF SHORT CIRCUIT FAULTS BY CONSIDERING INCOMPLETE PHASE LINE ON DISTRIBUTION NETWORK USING GENERAL FAULT ADMITTANCE METHOD

By

MUHAMMAD AL HADI

Short circuit fault studies are very important in electric power system analysis because they are a reference in determining the regulatory parameters of protection system components. To calculate the short circuit fault current, a computational method is needed that can accommodate all types of short circuit faults into one general formula. This research uses the general fault admittance method as a computational model of the short circuit fault current formula and uses python programming language as computational software. Software input data is given by IEEE PES (Power & Energy Society) Distribution Test Feeder, namely, IEEE 13 Node Test Feeder, IEEE 34 Node Test Feeder and IEEE 123 Node Test Feeder. Where the case is an unbalanced distribution network and there are several incomplete phase channels modeled from the physical state of the channel. A consequence of incomplete phase channels is the presence of joint impedance between sequences (off-diagonal elements of the system sequence impedance matrix). In the case of 13 nodes, the greatest joint impedance of thevenin sequence lies on bus 652 is $\hat{z}_{21} = 8.49 \times 10^{-1} \Omega$. While in the case of 34 nodes, the greatest joint impedance of thevenin sequence lies on bus 822, which is $\hat{z}_{20} = 2.59 \Omega$. The software developed in this study was compared with OpenDSS software and obtained a current magnitude difference of no more than 3.0×10^{-4} p.u.

Keyword: *short circuit fault, distribution network, incomplete phase line, general fault admittance.*

**ANALISIS GANGGUAN HUBUNG SINGKAT
DENGAN MEMPERTIMBANGKAN SALURAN FASA TIDAK LENGKAP
PADA JARINGAN DISTRIBUSI MENGGUNAKAN
METODE *GENERAL FAULT ADMITTANCE***

Oleh

MUHAMMAD AL HADI

(Skripsi)

Sebagai Salah Satu Syarat Mencapai Gelar
SARJANA TEKNIK

Pada

Jurusan Teknik Elektro
Fakultas Teknik Universitas Lampung



JURUSAN TEKNIK ELEKTRO

FAKULTAS TEKNIK

UNIVERSITAS LAMPUNG

BANDAR LAMPUNG

2023

Judul Skripsi : ANALISIS GANGGUAN HUBUNG SINGKAT
DENGAN MEMPERTIMBANGKAN SALURAN
FASA TIDAK LENGKAP PADA JARINGAN
DISTRIBUSI MENGGUNAKAN METODE
GENERAL FAULT ADMITTANCE

Nama Mahasiswa : MUHAMMAD AL HADI

Nomor Pokok Mahasiswa : 1915031021

Jurusan : Teknik Elektro

Fakultas : Teknik



Dr. Eng. Ir. Lukmanul Hakim, S.T., M.Sc.
NIP 19720923 200012 1 002

Ir. Herri Gusmedi, S.T., M.T.
NIP 19710813 199903 1 003

2. Mengetahui

Ketua Jurusan
Teknik Elektro

Ketua Program Studi
Teknik Elektro

Herlinawati, S.T., M.T.
NIP 19710314 199903 2 001

Dr. Eng. Nining Purwasih, S.T., M.T.
NIP 19740422 200012 2 001

MENGESAHKAN

1. Tim Penguji

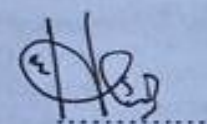
Ketua

: Dr. Eng. Ir. Lukmanul Hakim, S.T., M.Sc.



Sekretaris

: Ir. Herri Gusmedi, S.T., M.T.



Penguji

Bukan Pembimbing : Ir. Khairudin, S.T., M.Sc., Ph.D. Eng.



2. Dekan Fakultas Teknik Universitas Lampung



Dr. Eng. Ir. Helmy Fitriawan, S.T., M.Sc.
NIP 19750928 200112 1 002

Tanggal Lulus Ujian Skripsi : 15 Maret 2023

SURAT PERNYATAAN

Dengan ini saya menyatakan bahwa dalam skripsi ini tidak terdapat karya yang pernah dilakukan orang lain dan sepanjang sepengetahuan saya tidak terdapat atau diterbitkan oleh orang lain, kecuali secara tertulis diacu dalam naskah ini sebagaimana yang disebutkan dalam daftar Pustaka. Selain itu, saya menyatakan pula bahwa skripsi ini dibuat oleh saya sendiri.

Apabila pernyataan saya tidak benar, maka saya bersedia dikenai sanksi sesuai dengan hukum yang berlaku.

Bandar Lampung, 15 Maret 2023



Muhammad Al Hadi
NPM 1915031021

RIWAYAT HIDUP



Penulis dilahirkan di Kotabumi, Lampung Utara pada tanggal 25 September 2001, sebagai anak ketujuh dari tujuh bersaudara, dari bapak Fadly Abdullah dan Ibu Sri Ida.

Riwayat pendidikan penulis dimulai dari Sekolah Dasar Negeri (SDN) 1 Kotabumi Udik, pada tahun 2007 hingga tahun 2013, Sekolah Menengah Pertama Negeri (SMPN) 3 Kotabumi, pada tahun 2013 hingga tahun 2016, dan Sekolah Menengah Atas Negeri (SMAN) 3 Kotabumi pada tahun 2016 hingga tahun 2019.

Penulis menjadi mahasiswa Jurusan Teknik Elektro, Universitas Lampung, pada tahun 2019 melalui jalur SBMPTN. Selama menjadi mahasiswa penulis berkesempatan menjadi asisten dosen mata kuliah Menggambar Teknik dan Praktikum Analisa Sistem Tenaga tahun 2022 dan tergabung dalam keanggotaan asisten Laboratorium Sistem Tenaga Listrik dari tahun 2021. Selain itu, penulis juga tergabung dalam organisasi intra kampus Himpunan Mahasiswa Teknik Elektro (Himatro) yang pada tahun 2020 diamanahkan sebagai Sekretaris Departemen Pendidikan dan Pengembangan Diri dan pada tahun 2021 diamanahkan sebagai Sekretaris Umum. Penulis melaksanakan kerja praktik di PT. Bukit Asam unit Pelabuhan Tarahan, Lampung dalam Satuan Kerja Perawatan Listrik dan membuat laporan yang berjudul “Analisis Pengaruh Pemasangan Kapasitor Bank terhadap Faktor Daya, Tegangan Jatuh dan Rugi-Rugi Daya Pada Sistem Distribusi Daya Listrik PT. Bukit Asam unit Pelabuhan Tarahan”.

**Kupersembahkan
karya ini untuk**

Papah dan Mamah:

Fadly Abdullah dan Sri Ida

Serta

Keluarga Besar,

Dosen, Teman dan Almamater

Motto

La Yukallifullahu Nafsan Illa Wus'aha
(QS. Al-Baqarah 2:286)

SANWACANA

Segala puji bagi Allah SWT, atas limpahan nikmat-Nya yang diberikan kepada penulis sehingga dapat menyelesaikan Tugas Akhir ini. Shalawat dan salam senantiasa dicurahkan kepada Nabi Muhammad SAW, suri teladan yang mampu membuka sesuatu yang terkunci, penutup dari semua yang terdahulu, penolong kebenaran dengan jalan yang benar, dan petunjuk kepada jalan-Mu yang lurus.

Tugas Akhir dengan judul “Analisis Gangguan Hubung Singkat dengan Mempertimbangkan Saluran Fasa Tidak Lengkap pada Jaringan Distribusi Menggunakan Metode *General Fault Admittance*” ini merupakan salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik pada Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Lampung.

Pada kesempatan ini, penulis mengucapkan terimakasih kepada:

1. Ibu Prof. Dr. Ir. Lusmeilia Afriani, D.E.A., I.P.M., selaku Rektor Universitas Lampung.
2. Bapak Dr. Eng. Helmy Fitriawan, S.T., M.Sc., selaku Dekan Fakultas Teknik Universitas Lampung.
3. Ibu Herlinawati, S.T., M.T., selaku Ketua Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Lampung.
4. Bapak Dr. Eng. Ir. Lukmanul Hakim, S.T., M.Sc., selaku dosen pembimbing utama yang selalu memberikan motivasi dan pandangan kehidupan, mengarahkan dan membimbing dengan tulus dan penuh kesabaran.

5. Bapak Ir. Herri Gusmedi, S.T., M.T., selaku dosen pembimbing pendamping yang telah memberikan saran, bimbingan dan arahan dengan baik dan ramah
6. Bapak Ir. Khairudin, S.T., M.Sc., Ph.D.Eng., selaku dosen penguji yang telah memberikan saran, kritik dan arahan.
7. Ibu Dr. Eng. Diah Permata, S.T., M.T., selaku dosen pembimbing akademik (PA) yang telah memberikan nasihat, arahan, bimbingan dengan baik dan tulus bagi penulis selama perkuliahan.
8. Bapak dan Ibu Dosen Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Lampung yang telah memberikan pengajaran dan pandangan hidup selama perkuliahan.
9. Staff administrasi Jurusan Teknik Elektro dan Fakultas Teknik Universitas Lampung yang telah membantu penulis dalam hal administrasi.
10. Kak Fandi, selaku alumni Jurusan Teknik Elektro Universitas Lampung yang telah berkenan melakukan diskusi dan selalu menjawab pertanyaan penulis dengan baik dan ramah.
11. Segenap Keluarga Besar Laboratorium Sistem Tenaga Listrik; Pak Rahman atas kerjasamanya selama menjadi asisten laboratorium; Fatur, Khai, Dwi, Adam, Aqila, Adhi, Natasya; Adrian dan Muklas yang pernah anter jemput selama beberapa semester mohon segera menyusul; tidak lupa Wira selaku mantan asisten yang sudah wisuda duluan; adik-adik 2020, Rizki, Aymanul, Arnes, Ipna, Syawal, Saka.
12. Keluarga besar Angkatan ETERNITY 2019, yang telah memberikan banyak motivasi, nilai-nilai sosial dan bantuan dalam berbagai hal.

13. Keluarga besar HIMATRO UNILA, yang telah menjadi wadah dalam mengembangkan nilai-nilai organisasi bagi penulis. Tidak lupa juga terimakasih banyak untuk Pengurus Harian Himatro periode 2021, Khai, Nug, Karin dan Tasya atas Kerjasama yang baik selama dalam organisasi.
14. Keluarga KKN Gunung Betuah, Pak Kordes Fikri, Fetri, Sugés, Lili dan Adila, terimakasih atas 40 harinya.

Penulis menyadari bahwa masih banyak kekurangan dalam penulisan skripsi ini. Penulis mengharapkan kritik dan saran konstruktif dari semua pihak demi kemajuan bersama. Penulis berharap skripsi ini dapat bermanfaat bagi kita semua.

Bandarlampung, Maret 2023

Muhammad Al Hadi

DAFTAR ISI

	Halaman
SANWACANA	xi
DAFTAR ISI.....	xiv
DAFTAR GAMBAR.....	xvi
DAFTAR TABEL.....	xxii
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1.1. Latar Belakang	1
1.2. Tujuan Penelitian	3
1.3. Rumusan Masalah	3
1.4. Batasan Masalah.....	4
1.5. Manfaat Penelitian	4
1.6. Hipotesis.....	5
1.7. Sistematika Penulisan.....	5
BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....	7
2.1. Penelitian Terdahulu	7
2.2. Pemodelan Komponen Sistem Distribusi.....	9
2.2.1. Model Saluran	9
2.2.2. Model Transformator	13
2.2.3. Model Regulator Tegangan.....	15
2.3. Metode <i>General Fault Admittance</i>	17
BAB III METODOLOGI PENELITIAN	20
3.1. Waktu dan Tempat	20
3.2. Alat dan Bahan.....	21
3.3. Metodologi Penelitian	21
3.4. Diagram Pelaksanaan Penelitian	23
3.5. Analisis Gangguan Hubung Singkat dengan <i>Metode General Fault Admittance</i>	24
3.5.1. Perhitungan Matriks Impedansi Urutan Sistem	24
3.5.2. Perhitungan Matriks Admitansi Urutan Gangguan.....	25
3.5.3. Perhitungan Arus Gangguan Hubung Singkat	27

3.6. Proses Komputasi.....	30
3.7. Diagram Alir Komputasi Gangguan Hubung Singkat dalam Domain Urutan dengan Mempertimbangkan Saluran Fasa tak Lengkap Menggunakan Metode <i>General Fault Admittance</i>	31
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN.....	32
4.1. Data Uji Sistem Jaringan Distribusi	34
4.2. Matriks Impedansi Urutan Sistem.....	38
4.3. Perbandingan Hasil Komputasi Metode <i>General Fault Admittance</i> dan OpenDSS.....	41
4.3.1. Gangguan Hubung Singkat Satu Fasa ke Tanah (<i>Line to Ground Fault</i>) pada Fasa A.....	41
4.3.2. Gangguan Hubung Singkat Satu Fasa ke Tanah (<i>Line to Ground Fault</i>) pada Fasa (B).....	46
4.3.3. Gangguan Hubung Singkat Satu Fasa ke Tanah (<i>Line to Ground Fault</i>) pada Fasa (C).....	51
4.3.4. Gangguan Hubung Singkat Dua Fasa (<i>Double Line Fault</i>) pada Fasa (A-B)	56
4.3.5. Gangguan Hubung Singkat Dua Fasa (<i>Double Line Fault</i>) pada Fasa (B-C)	61
4.3.6. Gangguan Hubung Singkat Dua Fasa (<i>Double Line Fault</i>) pada Fasa (A-C)	66
4.3.7. Gangguan Hubung Singkat Dua Fasa ke Tanah (<i>Double Line to Ground Fault</i>) pada Fasa (A-B).....	71
4.3.8. Gangguan Hubung Singkat Dua Fasa ke Tanah (<i>Double Line to Ground Fault</i>) pada Fasa (B-C)	76
4.3.9. Gangguan Hubung Singkat Dua Fasa ke Tanah (<i>Double Line to Ground Fault</i>) pada Fasa (A-C).....	81
4.3.10. Gangguan Hubung Singkat Tiga Fasa (<i>Triple Line Fault</i>).....	86
4.3.11. Gangguan Hubung Singkat Tiga Fasa ke Tanah (<i>Triple Line to Ground Fault</i>)	91
BAB V KESIMPULAN.....	96
5.1. Kesimpulan.....	96
5.2. Saran.....	97
DAFTAR PUSTAKA	
LAMPIRAN	

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1 Rangkaian Ekuivalen Gangguan Hubung Singkat Tiga Fasa ke Tanah	17
Gambar 3. 1 Diagram Pelaksanaan Penelitian	23
Gambar 3. 2 Diagram Alir Komputasi Gangguan Hubung Singkat	31
Gambar 4. 1 Cuplikan Kode Program Menghitung Matriks Impedansi Urutan Sistem.....	33
Gambar 4. 2 Cuplikan Kode Program Membentuk Matriks Admitansi Urutan Gangguan	33
Gambar 4. 3 Cuplikan Kode Program Menghitung Arus Gangguan Urutan.....	33
Gambar 4. 4 <i>One-line diagram</i> IEEE 13 <i>Node Test Feeder</i>	34
Gambar 4. 5 <i>One-line diagram</i> IEEE 34 <i>Node Test Feeder</i>	35
Gambar 4. 6 <i>One-line diagram</i> IEEE 123 <i>Node Test Feeder</i>	36
Gambar 4. 7 Matriks impedansi urutan sistem pada kasus IEEE 13 <i>Node Test Feeder</i>	38
Gambar 4. 8 Matriks impedansi urutan sistem pada kasus IEEE 34 <i>Node Test Feeder</i>	39
Gambar 4. 9 Selisih <i>magnitude</i> arus gangguan hubung singkat satu fasa (A) ketanah hasil komputasi metode <i>general fault admittance</i> dan OpenDSS pada kasus IEEE 13 <i>Node Test Feeder</i> dengan skenario $Yf = 1x10^4$	42
Gambar 4. 10 Selisih <i>magnitude</i> arus gangguan hubung singkat satu fasa (A) ketanah hasil komputasi metode <i>general fault admittance</i> dan OpenDSS pada kasus IEEE 13 <i>Node Test Feeder</i> dengan skenario $Yf = 2x10^7$	42
Gambar 4. 11 Selisih <i>magnitude</i> arus gangguan hubung singkat satu fasa (A) ketanah hasil komputasi metode <i>general fault admittance</i> dan OpenDSS pada kasus IEEE 34 <i>Node Test Feeder</i> dengan skenario $Yf = 1x10^4$	43

Gambar 4. 12 Selisih <i>magnitude</i> arus gangguan hubung singkat satu fasa (A) ketanah hasil komputasi metode <i>general fault admittance</i> dan OpenDSS pada kasus IEEE 123 <i>Node Test Feeder</i> dengan skenario $Yf = 2x10^7$	45
Gambar 4. 13 Selisih <i>magnitude</i> arus gangguan hubung singkat satu fasa (B) ketanah hasil komputasi metode <i>general fault admittance</i> dan OpenDSS pada kasus IEEE 34 <i>Node Test Feeder</i> dengan skenario $Yf = 1x10^4$	46
Gambar 4. 14 Selisih <i>magnitude</i> arus gangguan hubung singkat satu fasa (B) ketanah hasil komputasi metode <i>general fault admittance</i> dan OpenDSS pada kasus IEEE 13 <i>Node Test Feeder</i> dengan skenario $Yf = 2x10^7$	47
Gambar 4. 15 Selisih <i>magnitude</i> arus gangguan hubung singkat satu fasa (B) ketanah hasil komputasi metode <i>general fault admittance</i> dan OpenDSS pada kasus IEEE 34 <i>Node Test Feeder</i> dengan skenario $Yf = 1x10^4$	48
Gambar 4. 16 Selisih <i>magnitude</i> arus gangguan hubung singkat satu fasa (B) ketanah hasil komputasi metode <i>general fault admittance</i> dan OpenDSS pada kasus IEEE 123 <i>Node Test Feeder</i> dengan skenario $Yf = 2x10^7$	50
Gambar 4. 17 Selisih <i>magnitude</i> arus gangguan hubung singkat satu fasa (C) ketanah hasil komputasi metode <i>general fault admittance</i> dan OpenDSS pada kasus IEEE 13 <i>Node Test Feeder</i> dengan skenario $Yf = 1x10^4$	51
Gambar 4. 18 Selisih <i>magnitude</i> arus gangguan hubung singkat satu fasa (C) ketanah hasil komputasi metode <i>general fault admittance</i> dan OpenDSS pada kasus IEEE 13 <i>Node Test Feeder</i> dengan skenario $Yf = 2x10^7$	52
Gambar 4. 19 Selisih <i>magnitude</i> arus gangguan hubung singkat satu fasa (C) ketanah hasil komputasi metode <i>general fault admittance</i> dan OpenDSS pada kasus IEEE 34 <i>Node Test Feeder</i> dengan skenario $Yf = 1x10^4$	53
Gambar 4. 20 Selisih <i>magnitude</i> arus gangguan hubung singkat satu fasa (C) ketanah hasil komputasi metode <i>general fault admittance</i> dan OpenDSS pada kasus IEEE 123 <i>Node Test Feeder</i> dengan skenario $Yf = 2x10^7$	55
Gambar 4. 21 Selisih <i>magnitude</i> arus gangguan hubung singkat dua fasa (A-B) hasil komputasi metode <i>general fault admittance</i> dan OpenDSS pada kasus IEEE 13 <i>Node Test Feeder</i> dengan skenario $Yf = 1x10^4$	56

Gambar 4. 22 Selisih <i>magnitude</i> arus gangguan hubung singkat dua fasa (A-B) hasil komputasi metode <i>general fault admittance</i> dan OpenDSS pada kasus IEEE 13 Node Test Feeder dengan skenario $Yf = 2x10^7$	57
Gambar 4. 23 Selisih <i>magnitude</i> arus gangguan hubung singkat dua fasa (A-B) hasil komputasi metode <i>general fault admittance</i> dan OpenDSS pada kasus IEEE 34 Node Test Feeder dengan skenario $Yf = 1x10^4$	58
Gambar 4. 24 Selisih <i>magnitude</i> arus gangguan hubung singkat dua fasa (A-B) hasil komputasi metode <i>general fault admittance</i> dan OpenDSS pada kasus IEEE 123 Node Test Feeder dengan skenario $Yf = 2x10^7$	60
Gambar 4. 25 Selisih <i>magnitude</i> arus gangguan hubung singkat dua fasa (B-C) hasil komputasi metode <i>general fault admittance</i> dan OpenDSS pada kasus IEEE 13 Node Test Feeder dengan skenario $Yf = 1x10^4$	61
Gambar 4. 26 Selisih <i>magnitude</i> arus gangguan hubung singkat dua fasa (B-C) hasil komputasi metode <i>general fault admittance</i> dan OpenDSS pada kasus IEEE 13 Node Test Feeder dengan skenario $Yf = 2x10^7$	62
Gambar 4. 27 Selisih <i>magnitude</i> arus gangguan hubung singkat dua fasa (B-C) hasil komputasi metode <i>general fault admittance</i> dan OpenDSS pada kasus IEEE 34 Node Test Feeder dengan skenario $Yf = 1x10^4$	63
Gambar 4. 28 Selisih <i>magnitude</i> arus gangguan hubung singkat dua fasa (B-C) hasil komputasi metode <i>general fault admittance</i> dan OpenDSS pada kasus IEEE 123 Node Test Feeder dengan skenario $Yf = 2x10^7$	65
Gambar 4. 29 Selisih <i>magnitude</i> arus gangguan hubung singkat dua fasa (A-C) hasil komputasi metode <i>general fault admittance</i> dan OpenDSS pada kasus IEEE 13 Node Test Feeder dengan skenario $Yf = 1x10^4$	66
Gambar 4. 30 Selisih <i>magnitude</i> arus gangguan hubung singkat dua fasa (A-C) hasil komputasi metode <i>general fault admittance</i> dan OpenDSS pada kasus IEEE 13 Node Test Feeder dengan skenario $Yf = 2x10^7$	67
Gambar 4. 31 Selisih <i>magnitude</i> arus gangguan hubung singkat dua fasa (A-C) hasil komputasi metode <i>general fault admittance</i> dan OpenDSS pada kasus IEEE 34 Node Test Feeder dengan skenario $Yf = 1x10^4$	68

Gambar 4. 32 Selisih <i>magnitude</i> arus gangguan hubung singkat dua fasa (A-C) hasil komputasi metode <i>general fault admittance</i> dan OpenDSS pada kasus IEEE 123 <i>Node Test Feeder</i> dengan skenario $Yf = 2x10^7$	70
Gambar 4. 33 Selisih <i>magnitude</i> arus gangguan hubung singkat dua fasa (A-B) ke tanah hasil komputasi metode <i>general fault admittance</i> dan OpenDSS pada kasus IEEE 13 <i>Node Test Feeder</i> dengan skenario $Yf = 1x10^4$	71
Gambar 4. 34 Selisih <i>magnitude</i> arus gangguan hubung singkat dua fasa (A-B) ke tanah hasil komputasi metode <i>general fault admittance</i> dan OpenDSS pada kasus IEEE 13 <i>Node Test Feeder</i> dengan skenario $Yf = 2x10^7$	72
Gambar 4. 35 Selisih <i>magnitude</i> arus gangguan hubung singkat dua fasa (A-B) ke tanah hasil komputasi metode <i>general fault admittance</i> dan OpenDSS pada kasus IEEE 34 <i>Node Test Feeder</i> dengan skenario $Yf = 1x10^4$	73
Gambar 4. 36 Selisih <i>magnitude</i> arus gangguan hubung singkat dua fasa (A-B) ke tanah hasil komputasi metode <i>general fault admittance</i> dan OpenDSS pada kasus IEEE 123 <i>Node Test Feeder</i> dengan skenario $Yf = 2x10^7$	75
Gambar 4. 37 Selisih <i>magnitude</i> arus gangguan hubung singkat dua fasa (B-C) ke tanah hasil komputasi metode <i>general fault admittance</i> dan OpenDSS pada kasus IEEE 13 <i>Node Test Feeder</i> dengan skenario $Yf = 1x10^4$	76
Gambar 4. 38 Selisih <i>magnitude</i> arus gangguan hubung singkat dua fasa (B-C) ke tanah hasil komputasi metode <i>general fault admittance</i> dan OpenDSS pada kasus IEEE 13 <i>Node Test Feeder</i> dengan skenario $Yf = 2x10^7$	77
Gambar 4. 39 Selisih <i>magnitude</i> arus gangguan hubung singkat dua fasa (B-C) ke tanah hasil komputasi metode <i>general fault admittance</i> dan OpenDSS pada kasus IEEE 34 <i>Node Test Feeder</i> dengan skenario $Yf = 1x10^4$	78
Gambar 4. 40 Selisih <i>magnitude</i> arus gangguan hubung singkat dua fasa (B-C) ke tanah hasil komputasi metode <i>general fault admittance</i> dan OpenDSS pada kasus IEEE 123 <i>Node Test Feeder</i> dengan skenario $Yf = 2x10^7$	80
Gambar 4. 41 Selisih <i>magnitude</i> arus gangguan hubung singkat dua fasa (A-C) ke tanah hasil komputasi metode <i>general fault admittance</i> dan OpenDSS pada kasus IEEE 13 <i>Node Test Feeder</i> dengan skenario $Yf = 1x10^4$	81

Gambar 4. 42 Selisih <i>magnitude</i> arus gangguan hubung singkat dua fasa (A-C) ke tanah hasil komputasi metode <i>general fault admittance</i> dan OpenDSS pada kasus IEEE 13 <i>Node Test Feeder</i> dengan skenario $Yf = 2x10^7$	82
Gambar 4. 43 Selisih <i>magnitude</i> arus gangguan hubung singkat dua fasa (A-C) ke tanah hasil komputasi metode <i>general fault admittance</i> dan OpenDSS pada kasus IEEE 34 <i>Node Test Feeder</i> dengan skenario $Yf = 1x10^4$	83
Gambar 4. 44 Selisih <i>magnitude</i> arus gangguan hubung singkat dua fasa (A-C) ke tanah hasil komputasi metode <i>general fault admittance</i> dan OpenDSS pada kasus IEEE 123 <i>Node Test Feeder</i> dengan skenario $Yf = 2x10^7$	85
Gambar 4. 45 Selisih <i>magnitude</i> arus gangguan hubung singkat tiga fasa hasil komputasi metode <i>general fault admittance</i> dan OpenDSS pada kasus IEEE 13 <i>Node Test Feeder</i> dengan skenario $Yf = 1x10^4$	86
Gambar 4. 46 Selisih <i>magnitude</i> arus gangguan hubung singkat tiga fasa hasil komputasi metode <i>general fault admittance</i> dan OpenDSS pada kasus IEEE 13 <i>Node Test Feeder</i> dengan skenario $Yf = 2x10^7$	87
Gambar 4. 47 Selisih <i>magnitude</i> arus gangguan hubung singkat tiga fasa hasil komputasi metode <i>general fault admittance</i> dan OpenDSS pada kasus IEEE 34 <i>Node Test Feeder</i> dengan skenario $Yf = 1x10^4$	88
Gambar 4. 48 Selisih <i>magnitude</i> arus gangguan hubung singkat tiga fasa hasil komputasi metode <i>general fault admittance</i> dan OpenDSS pada kasus IEEE 123 <i>Node Test Feeder</i> dengan skenario $Yf = 2x10^7$	90
Gambar 4. 49 Selisih <i>magnitude</i> arus gangguan hubung singkat tiga fasa ke tanah hasil komputasi metode <i>general fault admittance</i> dan OpenDSS pada kasus IEEE 13 <i>Node Test Feeder</i> dengan skenario $Yf = 1x10^4$	91
Gambar 4. 50 Selisih <i>magnitude</i> arus gangguan hubung singkat tiga fasa ke tanah hasil komputasi metode <i>general fault admittance</i> dan OpenDSS pada kasus IEEE 13 <i>Node Test Feeder</i> dengan skenario $Yf = 2x10^7$	92
Gambar 4. 51 Selisih <i>magnitude</i> arus gangguan hubung singkat tiga fasa ke tanah hasil komputasi metode <i>general fault admittance</i> dan OpenDSS pada kasus IEEE 34 <i>Node Test Feeder</i> dengan skenario $Yf = 1x10^4$	93

Gambar 4. 52 Selisih *magnitude* arus gangguan hubung singkat tiga fasa ke tanah hasil komputasi metode *general fault admittance* dan OpenDSS pada kasus IEEE 123 *Node Test Feeder* dengan skenario $Yf = 2x10^7$ 95

DAFTAR TABEL

Tabel 2. 1 Tabel Matriks Admitansi <i>Primitive</i> Urutan Saluran	12
Tabel 2. 2 Tabel Matriks Admitansi <i>Primitive</i> Urutan Transformator	14
Tabel 2. 3 Tabel Rasio efektif Regulator (aR) tegangan.	15
Tabel 2. 4 Tabel Matriks Admitansi <i>Primitive</i> Urutan Regulator Tegangan.	16
Tabel 3. 1 Jadwal Penelitian.....	20
Tabel 3. 2 Matriks Admitansi Urutan Gangguan	26

BAB I

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Hubung singkat merupakan salah satu fenomena penyebab gangguan sistem tenaga listrik yang paling sering terjadi. Sehingga studi gangguan hubung singkat sangatlah penting dalam analisis sistem tenaga listrik. Studi gangguan hubung singkat dilakukan sebagai acuan dalam menentukan pengaturan komponen sistem proteksi sistem tenaga listrik seperti relay dan *switchgears*. Gangguan hubung singkat meliputi gangguan hubung singkat seimbang dan gangguan hubung singkat tidak seimbang. Ketika terjadi gangguan hubung singkat seimbang maka besarnya arus dan tegangan sistem akan tetap seimbang. Gangguan hubung singkat seimbang meliputi gangguan hubung singkat tiga fasa dan tiga fasa ke tanah. Sedangkan, gangguan hubung singkat tidak seimbang adalah gangguan yang menyebabkan ketidakseimbangan arus dan tegangan sistem. Gangguan hubung singkat tidak seimbang meliputi gangguan hubung singkat satu fasa ke tanah, dua fasa dan dua fasa ke tanah [1] [2].

Dalam melakukan analisis gangguan hubung singkat, diperlukan suatu metode komputasi untuk menyelesaikan arus gangguan hubung singkat. Metode *general fault admittance* merupakan metode komputasi untuk penyelesaian gangguan

hubung singkat yang dilakukan dalam koordinat simetris. Berbeda dengan metode klasik, metode *general fault admittance* dapat menyelesaikan arus gangguan dan tegangan setelah gangguan secara terpisah dan dapat mengakomodir semua jenis gangguan hubung singkat menjadi satu formula yang umum [3].

Jaringan distribusi merupakan sistem yang paling kompleks dalam sistem tenaga listrik. Pada umumnya jaringan distribusi adalah jaringan radial yang tidak seimbang. Salah satu penyebab ketidakseimbangan tersebut adalah akibat dari adanya saluran fasa yang tidak lengkap. Pada sistem tiga fasa seimbang, nilai impedansi bersama antar komponen urutan simetris sangatlah kecil, sehingga dapat diabaikan. Sedangkan, pada sistem dengan fasa tak lengkap yaitu saluran sistem dua fasa dan satu fasa, terdapat impedansi bersama antar komponen urutan simetris yang tidak boleh diabaikan [3] [4].

Dari uraian diatas, pada penelitian ini akan membahas mengenai perhitungan dan analisis besarnya arus gangguan hubung singkat seimbang dan tidak seimbang dengan mempertimbangkan saluran fasa tak lengkap pada jaringan distribusi dan metode *general fault admittance* digunakan sebagai model komputasi dari formula arus gangguan hubung singkat.

1.2. Tujuan Penelitian

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis arus gangguan hubung singkat dengan mempertimbangkan saluran fasa tak lengkap pada jaringan distribusi. Perhitungan arus gangguan hubung singkat menggunakan metode *general fault admittance* bertujuan untuk mengakomodir semua jenis gangguan hubung singkat menjadi satu formula yang generik sehingga dapat mempermudah proses komputasi.

1.3. Rumusan Masalah

Metode perhitungan arus gangguan hubung singkat secara konvensional diselesaikan dengan berbagai formulasi sesuai dengan jenis gangguan hubung singkat, sehingga diperlukan sebuah metode komputasi untuk mengakomodir semua jenis gangguan hubung singkat menjadi satu formula yang generik, pada penelitian ini akan menggunakan metode *general fault admittance*.

Pada penelitian ini akan mempertimbangkan nilai impedansi bersama antar urutan sebagai konsekuensi dari saluran fasa tak lengkap. Hasil komputasi perangkat lunak metode *general fault admittance* berbasis pemrograman *python* berupa *magnitude* arus gangguan hubung singkat dibandingkan dengan hasil simulasi perangkat lunak yang dikembangkan oleh *Electric Power Research Institute* (EPRI) yaitu OpenDSS sebagai data pembanding untuk memastikan keakuratan hasil komputasi.

1.4. Batasan Masalah

Penelitian ini hanya melakukan analisis arus gangguan hubung singkat yang dimodelkan dengan metode *general fault admittance* dan tidak melakukan analisis terhadap tegangan sistem. Analisis juga hanya dilakukan pada titik gangguan saja dan tidak menganalisis terhadap titik yang tidak terganggu. Objek analisis pada penelitian ini hanya berada pada jaringan distribusi yang tak seimbang akibat dari saluran fasa yang tak lengkap.

Perangkat lunak pembanding sebagai parameter untuk memastikan keakuratan hasil komputasi metode *general fault admittance* hanya menggunakan OpenDSS. Hal ini dikarenakan OpenDSS mampu untuk memodelkan saluran fasa tak lengkap dua fasa, dimana beberapa perangkat lunak lain belum dapat memodelkannya.

1.5. Manfaat Penelitian

Penelitian ini diharapkan mampu memberikan pemahaman mengenai metode *General Fault Admittance* dalam menghitung arus gangguan hubung singkat sehingga mampu mengakomodir semua jenis gangguan hubung singkat ke dalam satu formula yang generik dengan mempertimbangkan saluran fasa tak lengkap. Selain itu, penelitian ini diharapkan menjadi bahan pembelajaran dan referensi bagi mahasiswa lain untuk mengembangkan penelitian ini selanjutnya.

1.6. Hipotesis

Metode yang digunakan dalam menghitung besarnya arus gangguan hubung singkat bersumber dari referensi [3]. Pada referensi tersebut, metode *general fault admittance* mampu mengakomodir semua jenis gangguan hubung singkat ke dalam satu formula. Tetapi, referensi tersebut menganalisis langsung dari bentuk komponen urutan sistemnya dan hanya mempertimbangkan sistem seimbang tiga fasa, sehingga mengabaikan besarnya impedansi bersama antar komponen urutan. Pada penelitian ini, dilakukan analisis komponen sistem dari bentuk fasa terlebih dahulu yang kemudian ditransformasikan ke bentuk komponen urutan simetrisnya, dengan demikian diasumsikan bahwa metode ini dapat mempertimbangkan besarnya impedansi bersama antar komponen urutan simetris dari saluran fasa tak lengkap. Oleh karena itu, perlu dilakukan uji gangguan hubung singkat pada beberapa kasus IEEE PES (*Power & Energy Society*) *Distribution Test Feeder* dan membandingkan hasil komputasi simulasi dengan program EPRI OpenDSS.

1.7. Sistematika Penulisan

BAB I PENDAHULUAN

Pada bab ini menjelaskan latar belakang, tujuan penelitian, manfaat penelitian, rumusan masalah, hipotesis dan sistematika penulisan.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

Pada bab ini memaparkan beberapa teori pendukung yang dijadikan sebagai referensi dalam penelitian yang bersumber dari buku manual, jurnal ilmiah dan artikel internet.

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

Pada bab ini menjelaskan waktu dan tempat, alat dan bahan, pelaksanaan serta pengamatan dalam pengerjaan penelitian tugas akhir.

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada bab ini menjelaskan hasil data komputasi dan pembahasan dari penelitian tugas akhir ini.

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

Pada bab ini menjelaskan kesimpulan dari hasil pembahasan masalah yang dikaji dalam penelitian tugas akhir dan berisi saran penulis untuk meningkatkan wawasan bagi pembaca.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Penelitian Terdahulu

Analisis menggunakan komponen simetris urutan sebagai metode penyelesaian jaringan fasa banyak pertama kali diperkenalkan oleh *paper* “*Method of Symmetrical Coordinates Applied to the Solution of Polyphase Network*” (C. L. Fortescue, 1918) [5]. Penggunaan komponen simetris urutan dalam analisis gangguan hubung singkat pertama kali diperkenalkan melalui buku “*Electric Energy System Theory, an Introduction*” (Elgerd O.I., 1971) [6] dan dikembangkan metode *General Fault Admittance* untuk mengakomodir semua jenis gangguan hubung singkat seimbang oleh *paper* “*General Fault Admittance Method Solution of a Balanced Line to Line to Line to Ground Fault*” (Sakala J.D., 2016). Analisis gangguan hubung singkat dalam domain fasa pada jaringan transmisi diperkenalkan oleh *paper* “*Analysis of Transmission System Fault in the Phase Domain*” (Zhu, J., 2004) dan dikembangkan oleh *paper* “*A New Method for the Computation of Faults on Transmission Lines*” (Oswald, B.R., A. Panosyan, 2006) dengan mempertimbangkan model saluran π . Analisis gangguan hubung singkat dalam domain fasa pada jaringan distribusi diperkenalkan oleh *paper* “*Short Circuit Analysis of IEEE Test Feeders*” (W.H. Kersting, 2012) dengan menggunakan program komputasi RDAP (*Radial Distribution Analysis Program*)

dan Program komputasi *Windmil*, lalu dengan model yang sama, dilakukan simulasi dengan menggunakan program EPRI OpenDSS oleh *paper* “*Matching the IEEE Test Feeder Short Circuit Result*” (R.F. Arritt, 2012). Penelitian terkait penentuan lokasi gangguan juga telah dibahas oleh *paper* “*Fault Location Method using Phasor Measurement Units and Short Circuit Analysis for Power Distribution Networks*” (Ji-Song Hong, 2020)

Berdasarkan beberapa penelitian terdahulu tersebut, belum terdapat penelitian yang membahas mengenai analisis gangguan hubung singkat dalam koordinat simetris urutan pada jaringan distribusi dengan mempertimbangkan impedansi bersama antar komponen simetris urutan akibat saluran fasa tak lengkap. Oleh karena itu, penelitian ini membahas tentang “Analisis Gangguan Hubung Singkat Dalam Domain Urutan dengan Mempertimbangkan Saluran Fasa Tak Lengkap Menggunakan Metode *General Fault Admittance*”. Metode *General Fault Admittance* digunakan sebagai model komputasi untuk mengakomodir semua jenis gangguan hubung singkat dalam satu formula. Simulasi dirancang menggunakan perangkat lunak pemrograman *python* sebagai alat komputasi dan hasil komputasi akan dibandingkan dengan program EPRI OpenDSS.

2.2. Pemodelan Komponen Sistem Distribusi

2.2.1. Model Saluran

Model saluran yang digunakan bersumber dari buku yang berjudul “*Distribution System Modeling and Analysis with Matlab and Windmil Fifth Edition*” (William H. Kersting and Robert J. Kerestes, 2022) [7]. Pemodelan impedansi saluran dihitung berdasarkan nilai resistansi konduktor, induktansi sendiri dan bersama akibat pengaruh dari medan magnet disekitar konduktor.

Impedansi saluran dibagi menjadi dua yaitu, impedansi sendiri dan impedansi bersama antar konduktor. Nilai impedansi saluran dihitung berdasarkan formulasi modifikasi persamaan Carson, yang disederhanakan menjadi sebagai berikut,

$$\hat{z}_{ii} = r_i + \pi^2 f G + j4\pi f G \left(\ln \frac{1}{GMR_i} + 7.6786 + \frac{1}{2} \ln \frac{\rho}{f} \right) \quad (2.1)$$

$$\hat{z}_{ij} = \pi^2 f G + j4\pi f G \left(\ln \frac{1}{D_{ij}} + 7.6786 + \frac{1}{2} \ln \frac{\rho}{f} \right) \quad (2.2)$$

dengan,

\hat{z}_{ii} adalah impedansi sendiri konduktor i ($\Omega/mile$)

\hat{z}_{ij} adalah impedansi bersama antar konduktor i dan j ($\Omega/mile$)

r_i adalah resistansi konduktor i ($\Omega/mile$)

f adalah frekuensi sistem (Hz)

$G = 0.1609347 \times 10^{-3}$ ($\Omega/mile$)

GMR_i adalah *geometric mean radius* konduktor (ft)

ρ adalah resistansi tanah (Ωm)

D_{ij} adalah jarak antara konduktor i dan j (ft)

maka, nilai dari impedansi saluran tiga fasa $a-b-c$ dengan satu netral dinyatakan dalam bentuk matriks impedansi *primitive* berukuran 4x4 sebagai berikut,

$$\hat{\mathbf{z}}_{primitive} = \begin{bmatrix} \hat{z}_{aa} & \hat{z}_{ab} & \hat{z}_{ac} & \hat{z}_{an} \\ \hat{z}_{ba} & \hat{z}_{bb} & \hat{z}_{bc} & \hat{z}_{bn} \\ \hat{z}_{ca} & \hat{z}_{cb} & \hat{z}_{cc} & \hat{z}_{cn} \\ \hat{z}_{na} & \hat{z}_{nb} & \hat{z}_{nc} & \hat{z}_{nn} \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

Pada saluran dua fasa (misal fasa $b-c$) dengan satu netral, maka impedansi elemen fasa yang hilang adalah nol, sehingga matriks impedansi *primitive* menjadi sebagai berikut,

$$\hat{\mathbf{z}}_{primitive} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \hat{z}_{bb} & \hat{z}_{bc} & \hat{z}_{bn} \\ 0 & \hat{z}_{cb} & \hat{z}_{cc} & \hat{z}_{cn} \\ 0 & \hat{z}_{nb} & \hat{z}_{nc} & \hat{z}_{nn} \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

Pada saluran satu fasa (misal fasa a) dengan satu netral, maka impedansi elemen fasa yang hilang adalah nol, sehingga matriks impedansi *primitive* menjadi sebagai berikut,

$$\hat{\mathbf{z}}_{primitive} = \begin{bmatrix} \hat{z}_{aa} & 0 & 0 & \hat{z}_{an} \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ \hat{z}_{na} & 0 & 0 & \hat{z}_{nn} \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

Selama konduktor netral ditanahkan, maka matriks impedansi *primitive* perlu direduksi untuk menghilangkan elemen netral. Untuk mereduksi matriks impedansi *primitive* diperlukan formulasi modifikasi persamaan Kron yang telah disederhanakan menjadi sebagai berikut,

$$z_{ij} = \hat{z}_{ij} - [\hat{z}_{in}][\hat{z}_{nn}]^{-1}[\hat{z}_{jn}] \quad (2.6)$$

maka nilai impedansi saluran tiga fasa $a-b-c$ dinyatakan dengan matriks impedansi abc berukuran 3x3 sebagai berikut,

$$\mathbf{z}_{abc} = \begin{bmatrix} z_{aa} & z_{ab} & z_{ac} \\ z_{ba} & z_{bb} & z_{bc} \\ z_{cb} & z_{cb} & z_{cc} \end{bmatrix} \quad (2.7)$$

Pada saluran dua fasa (misal fasa $b-c$), maka impedansi elemen fasa yang hilang adalah nol, sehingga matriks impedansi abc menjadi sebagai berikut,

$$\mathbf{z}_{abc} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & z_{bb} & z_{bc} \\ 0 & z_{cb} & z_{cc} \end{bmatrix} \quad (2.8)$$

Pada saluran satu fasa (misal fasa a), maka impedansi elemen fasa yang hilang adalah nol, sehingga matriks impedansi abc menjadi sebagai berikut,

$$\mathbf{z}_{abc} = \begin{bmatrix} z_{aa} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (2.9)$$

Dalam analisis hubung singkat, diperlukan nilai impedansi urutan. Impedansi urutan saluran diperoleh dari formulasi persamaan sebagai berikut,

$$\mathbf{z}_{012}^{primitive} = [\mathbf{A}]^{-1}[\mathbf{z}_{abc}][\mathbf{A}] \quad (2.10)$$

dengan matriks \mathbf{A} adalah

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \quad (2.11)$$

dengan a adalah $1.0 \angle 120^\circ$

maka diperoleh matriks $\mathbf{z}_{012}^{primitive}$ yang berukuran 3×3 .

dengan matriks $\mathbf{z}_{012}^{primitive}$ adalah

$$\mathbf{z}_{012}^{primitive} = \begin{bmatrix} \hat{z}_{00} & \hat{z}_{01} & \hat{z}_{02} \\ \hat{z}_{10} & \hat{z}_{11} & \hat{z}_{12} \\ \hat{z}_{20} & \hat{z}_{21} & \hat{z}_{22} \end{bmatrix} \quad (2.12)$$

dengan \hat{z}_{00} , \hat{z}_{11} dan \hat{z}_{22} (elemen diagonal) merupakan impedansi sendiri komponen urutan, sedangkan \hat{z}_{01} , \hat{z}_{10} , \hat{z}_{02} , \hat{z}_{20} , \hat{z}_{12} dan \hat{z}_{21} (elemen *off*-diagonal) merupakan impedansi bersama komponen urutan. matriks $\mathbf{z}_{012}^{primitive}$ bukan merupakan matriks simetris.

Untuk memperoleh matriks \mathbf{z}_{012}^{bus} , diperlukan matriks admitansi *primitive* urutan dari masing-masing elemen matriks $\mathbf{z}_{012}^{primitive}$. Matriks admitansi *primitive* urutan adalah matriks berukuran 2×2 yang terhubung dari dua buah simpul, yaitu simpul

h dan k , dimana h dan k adalah nomor bus. Adapun matriks admitansi *primitive* urutan untuk masing-masing komponen urutan saluran seperti pada Tabel 2.1

Tabel 2. 1 Tabel Matriks Admitansi *Primitive* Urutan Saluran

Urutan	Matriks Admitansi <i>Primitive</i> Urutan
0-0	$\mathbf{y}_{00}^{primitive} = \begin{bmatrix} 1/\hat{z}_{00hh} & -1/\hat{z}_{00hk} \\ -1/\hat{z}_{00kh} & 1/\hat{z}_{00kk} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \hat{y}_{00hh} & -\hat{y}_{00hk} \\ -\hat{y}_{00kh} & \hat{y}_{00kk} \end{bmatrix}$
1-1	$\mathbf{y}_{11}^{primitive} = \begin{bmatrix} 1/\hat{z}_{11hh} & -1/\hat{z}_{11hk} \\ -1/\hat{z}_{11kh} & 1/\hat{z}_{11kk} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \hat{y}_{11hh} & -\hat{y}_{11hk} \\ -\hat{y}_{11kh} & \hat{y}_{11kk} \end{bmatrix}$
2-2	$\mathbf{y}_{22}^{primitive} = \begin{bmatrix} 1/\hat{z}_{22hh} & -1/\hat{z}_{22hk} \\ -1/\hat{z}_{22kh} & 1/\hat{z}_{22kk} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \hat{y}_{22hh} & -\hat{y}_{22hk} \\ -\hat{y}_{22kh} & \hat{y}_{22kk} \end{bmatrix}$
0-1	$\mathbf{y}_{01}^{primitive} = \begin{bmatrix} 1/\hat{z}_{01hh} & -1/\hat{z}_{01hk} \\ -1/\hat{z}_{01kh} & 1/\hat{z}_{01kk} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \hat{y}_{01hh} & -\hat{y}_{01hk} \\ -\hat{y}_{01kh} & \hat{y}_{01kk} \end{bmatrix}$
1-0	$\mathbf{y}_{10}^{primitive} = \begin{bmatrix} 1/\hat{z}_{10hh} & -1/\hat{z}_{10hk} \\ -1/\hat{z}_{10kh} & 1/\hat{z}_{10kk} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \hat{y}_{10hh} & -\hat{y}_{10hk} \\ -\hat{y}_{10kh} & \hat{y}_{10kk} \end{bmatrix}$
0-2	$\mathbf{y}_{02}^{primitive} = \begin{bmatrix} 1/\hat{z}_{02hh} & -1/\hat{z}_{02hk} \\ -1/\hat{z}_{02kh} & 1/\hat{z}_{02kk} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \hat{y}_{02hh} & -\hat{y}_{02hk} \\ -\hat{y}_{02kh} & \hat{y}_{02kk} \end{bmatrix}$
2-0	$\mathbf{y}_{20}^{primitive} = \begin{bmatrix} 1/\hat{z}_{20hh} & -1/\hat{z}_{20hk} \\ -1/\hat{z}_{20kh} & 1/\hat{z}_{20kk} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \hat{y}_{20hh} & -\hat{y}_{20hk} \\ -\hat{y}_{20kh} & \hat{y}_{20kk} \end{bmatrix}$
1-2	$\mathbf{y}_{12}^{primitive} = \begin{bmatrix} 1/\hat{z}_{12hh} & -1/\hat{z}_{12hk} \\ -1/\hat{z}_{12kh} & 1/\hat{z}_{12kk} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \hat{y}_{12hh} & -\hat{y}_{12hk} \\ -\hat{y}_{12kh} & \hat{y}_{12kk} \end{bmatrix}$
2-1	$\mathbf{y}_{21}^{primitive} = \begin{bmatrix} 1/\hat{z}_{21hh} & -1/\hat{z}_{21hk} \\ -1/\hat{z}_{21kh} & 1/\hat{z}_{21kk} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \hat{y}_{21hh} & -\hat{y}_{21hk} \\ -\hat{y}_{21kh} & \hat{y}_{21kk} \end{bmatrix}$

2.2.2. Model Transformator

Model transformator yang digunakan bersumber dari *paper* yang berjudul “*Transformer Modeling for Three-Phase Distribution Network Analysis*” (Izudin Dzafic., 2014). Pemodelan transformator sudah dimodelkan sebagai komponen simetris kedalam hubungan tiga fasa yang berbeda. Model transformator dibagi berdasarkan hubungan belitan dan jumlah *clock*.

Impedansi transformator dihitung berdasarkan impedansi urutan transformator, dengan matriks $\mathbf{z}_{012}^{primitive}$ adalah

$$\mathbf{z}_{012}^{primitive} = \begin{bmatrix} \hat{z}_{00trf} & 0 & 0 \\ 0 & \hat{z}_{11trf} & 0 \\ 0 & 0 & \hat{z}_{22trf} \end{bmatrix} \quad (2.13)$$

dengan \hat{z}_{00} , \hat{z}_{11} dan \hat{z}_{22} (elemen diagonal) merupakan impedansi sendiri komponen urutan, sedangkan tidak ada impedansi bersama komponen urutan sehingga, elemen *off*-diagonal bernilai nol.

dimana,

$$\hat{y}_{00} = \frac{1}{\hat{z}_{00trf}} \quad (2.14. a)$$

$$\hat{y}_{11} = \frac{1}{\hat{z}_{11trf}} \quad (2.14. b)$$

$$\hat{y}_{22} = \frac{1}{\hat{z}_{22trf}} \quad (2.14. c)$$

Untuk mengakomodir *phase shift* transformator,

$$\bar{t} = t e^{j\alpha} \quad (2.15)$$

dengan t merupakan rasio *tap*, sedangkan α adalah

$$\alpha = n \times 30^\circ \quad (2.16)$$

dengan n adalah jumlah *clock*.

Matriks admitansi *primitive* urutan adalah matriks berukuran 2x2 yang terhubung dari dua buah simpul, yaitu simpul h dan k , dimana h dan k adalah nomor bus dari sisi transformator. Adapun matriks admitansi *primitive* urutan untuk masing-masing komponen urutan transformator seperti pada Tabel 2.2

Tabel 2. 2 Tabel Matriks Admitansi *Primitive* Urutan Transformator

Urutan	Matriks Admitansi <i>Primitive</i> Urutan
0-0	$y_{00}^{primitive} = \begin{bmatrix} \hat{y}_{00hh} & -\frac{1}{t} \hat{y}_{00hk} \\ -\frac{1}{t} \hat{y}_{00kh} & \frac{1}{t^2} \hat{y}_{00kk} \end{bmatrix}$
1-1	$y_{11}^{primitive} = \begin{bmatrix} \hat{y}_{11hh} & -\frac{1}{\bar{t}} \hat{y}_{11hk} \\ -\frac{1}{\bar{t}^*} \hat{y}_{11kh} & \frac{1}{\bar{t} \cdot \bar{t}^*} \hat{y}_{11kk} \end{bmatrix}$
2-2	$y_{22}^{primitive} = \begin{bmatrix} \hat{y}_{22hh} & -\frac{1}{\bar{t}^*} \hat{y}_{22hk} \\ -\frac{1}{\bar{t}} \hat{y}_{22kh} & \frac{1}{\bar{t} \cdot \bar{t}^*} \hat{y}_{22kk} \end{bmatrix}$

2.2.3. Model Regulator Tegangan

Model regulator tegangan yang digunakan bersumber dari *paper* yang berjudul “*Nodal Admittance Modeling of Three Phase Step Voltage Regulators and their Application*” (Mancheol Shin, 2013). Terdapat dua model regulator tegangan, yaitu jenis A dan jenis B. Berdasarkan posisi *tap*, regulator tegangan dibagi menjadi posisi *lower* dan *raise*.

Besarnya rasio efektif (a_R) tegangan berdasarkan posisi tap seperti pada Tabel 2.3

Tabel 2. 3 Tabel Rasio efektif Regulator (a_R) tegangan.

Jenis A		Jenis B	
<i>Raise</i>	$a_R = 1 + 0.00625 \text{ Tap}$	<i>Raise</i>	$a_R = 1 - 0.00625 \text{ Tap}$
<i>Lower</i>	$a_R = 1 - 0.00625 \text{ Tap}$	<i>Lower</i>	$a_R = 1 + 0.00625 \text{ Tap}$

dengan Tap adalah posisi 0, +1, +2, ..., +16 dan 0, -1, -2, ..., -16

Impedansi regulator tegangan dihitung berdasarkan impedansi urutan regulator tegangan, dengan matriks $\mathbf{z}_{012}^{\text{primitive}}$ adalah

$$\mathbf{z}_{012}^{\text{primitive}} = \begin{bmatrix} \hat{z}_{00reg} & 0 & 0 \\ 0 & \hat{z}_{11reg} & 0 \\ 0 & 0 & \hat{z}_{22reg} \end{bmatrix} \quad (2.17)$$

dengan \hat{z}_{00} , \hat{z}_{11} dan \hat{z}_{22} (elemen diagonal) merupakan impedansi sendiri komponen urutan, sedangkan tidak ada impedansi bersama komponen urutan sehingga, elemen *off*-diagonal bernilai nol.

dimana,

$$\hat{y}_{00} = \frac{1}{\hat{z}_{00reg}} \quad (2.18. a)$$

$$\hat{y}_{11} = \frac{1}{\hat{z}_{11reg}} \quad (2.18. b)$$

$$\hat{y}_{22} = \frac{1}{\hat{z}_{22reg}} \quad (2.18. c)$$

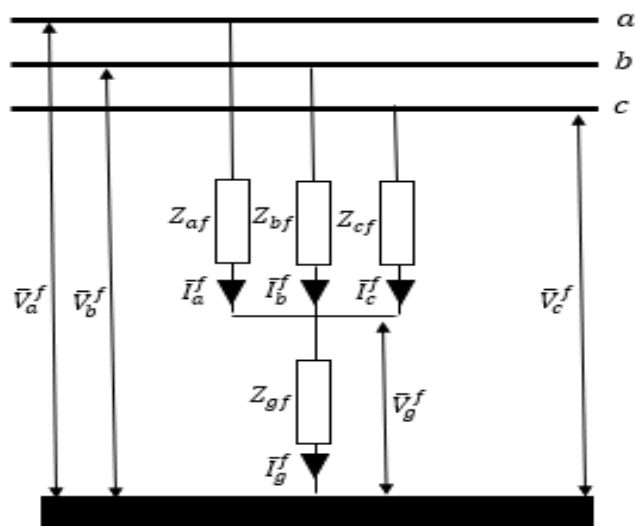
Matriks admitansi *primitive* urutan adalah matriks berukuran 2x2 yang terhubung dari dua buah simpul, yaitu simpul h dan k , dimana h dan k adalah nomor *bus* dari sisi regulator tegangan. Adapun matriks admitansi *primitive* urutan untuk masing-masing komponen urutan regulator tegangan seperti pada Tabel 2.4

Tabel 2. 4 Tabel Matriks Admitansi *Primitive* Urutan Regulator Tegangan.

Urutan	Matriks Admitansi <i>Primitive</i> Urutan	
	Primer	Sekunder
0-0	$y_{00}^{primitive} = \begin{bmatrix} \frac{1}{a_R^2} \hat{y}_{00hh} & -\frac{1}{a_R} \hat{y}_{00hk} \\ -\frac{1}{a_R} \hat{y}_{00hk} & \hat{y}_{00kk} \end{bmatrix}$	$y_{00}^{primitive} = \begin{bmatrix} \hat{y}_{00hh} & -\frac{1}{a_R} \hat{y}_{00hk} \\ -\frac{1}{a_R} \hat{y}_{00hk} & \frac{1}{a_R^2} \hat{y}_{00kk} \end{bmatrix}$
1-1	$y_{11}^{primitive} = \begin{bmatrix} \frac{1}{a_R^2} \hat{y}_{11hh} & -\frac{1}{a_R} \hat{y}_{11hk} \\ -\frac{1}{a_R} \hat{y}_{11hk} & \hat{y}_{11kk} \end{bmatrix}$	$y_{11}^{primitive} = \begin{bmatrix} \hat{y}_{11hh} & -\frac{1}{a_R} \hat{y}_{11hk} \\ -\frac{1}{a_R} \hat{y}_{11hk} & \frac{1}{a_R^2} \hat{y}_{11kk} \end{bmatrix}$
2-2	$y_{22}^{primitive} = \begin{bmatrix} \frac{1}{a_R^2} \hat{y}_{22hh} & -\frac{1}{a_R} \hat{y}_{22hk} \\ -\frac{1}{a_R} \hat{y}_{22hk} & \hat{y}_{22kk} \end{bmatrix}$	$y_{22}^{primitive} = \begin{bmatrix} \hat{y}_{22hh} & -\frac{1}{a_R} \hat{y}_{22hk} \\ -\frac{1}{a_R} \hat{y}_{22hk} & \frac{1}{a_R^2} \hat{y}_{22kk} \end{bmatrix}$

2.3. Metode *General Fault Admittance*

Metode *General Fault Admittance* merupakan salah satu metode yang digunakan untuk menganalisis gangguan hubung singkat dalam domain urutan yang bersumber dari paper “*General Fault Admittance Method Solution of a Balanced Line to Line to Line to Ground Fault*” (Sakala J.D., 2016). Metode tersebut mampu mengakomodir semua jenis gangguan hubung singkat dalam satu formula yang generik, sehingga memudahkan proses komputasi. Perhitungan arus gangguan hubung singkat dilakukan hanya dengan mengubah-ubah parameter matriks admitansi urutan gangguan tergantung dari jenis gangguan hubung singkat.



Gambar 2. 1 Rangkaian Ekuivalen Gangguan Hubung Singkat Tiga Fasa ke Tanah

Berdasarkan Gambar 2.1, menunjukkan bahwa ketika gangguan hubung singkat tiga fasa ke tanah terjadi, maka akan terdapat impedansi gangguan yang terhubung dengan masing-masing fasa dan tanah (Z_a^f, Z_b^f, Z_c^f dan Z_g^f), maka berdasarkan hukum KVL,

$$\bar{V}_a^f = Z_a^f \cdot \bar{I}_a^f + Z_g^f (\bar{I}_a^f + \bar{I}_b^f + \bar{I}_c^f) \quad (2.19.a)$$

$$\bar{V}_b^f = Z_b^f \cdot \bar{I}_b^f + Z_g^f (\bar{I}_a^f + \bar{I}_b^f + \bar{I}_c^f) \quad (2.19.b)$$

$$\bar{V}_c^f = Z_c^f \cdot \bar{I}_c^f + Z_g^f (\bar{I}_a^f + \bar{I}_b^f + \bar{I}_c^f) \quad (2.19.c)$$

Pers. (2.19.a), pers. (2.19.b) dan pers. (2.19.c) dapat dinyatakan kedalam bentuk matriks sebagai berikut

$$\begin{bmatrix} \bar{V}_a^f \\ \bar{V}_b^f \\ \bar{V}_c^f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_a^f + Z_g^f & Z_g^f & Z_g^f \\ Z_g^f & Z_b^f + Z_g^f & Z_g^f \\ Z_g^f & Z_g^f & Z_c^f + Z_g^f \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \bar{I}_a^f \\ \bar{I}_b^f \\ \bar{I}_c^f \end{bmatrix} \quad (2.20)$$

Pers. (2.20) dapat juga dinyatakan dalam bentuk persamaan vektor berikut

$$\bar{V}_{abc}^f = \bar{Z}_{abc}^f \cdot \bar{I}_{abc}^f \quad (2.21)$$

Karena metode General Fault Admittance dilakukan dalam domain urutan, maka akan dilakukan transformasi dari bentuk fasa menjadi bentuk urutan. Dengan menggunakan pers. (2.11) maka diperoleh

$$[\bar{V}_{abc}^f] = [A] \cdot \bar{V}_{012}^f = \bar{Z}_{abc}^f \cdot [A] \cdot \bar{I}_{012}^f \quad (2.22)$$

$$[A]^{-1} \cdot [A] \cdot \bar{V}_{012}^f = [A]^{-1} \cdot \bar{Z}_{abc}^f \cdot [A] \cdot \bar{I}_{012}^f \quad (2.23)$$

sehingga,

$$\bar{V}_{012}^f = \bar{Z}_{012}^f \cdot \bar{I}_{012}^f \quad (2.24)$$

dengan,

$$\bar{Z}_{012}^f = [A]^{-1} \cdot \bar{Z}_{abc}^f \cdot [A] \quad (2.25)$$

Dengan meng-*invers*-kan (\bar{Z}_{012}^f) pada pers. (3.7) maka diperoleh matriks admitansi urutan gangguan sebagai berikut,

$$\bar{Y}_{012}^f = [\bar{Z}_{012}^f]^{-1} \quad (2.26)$$

dengan matriks \bar{Y}_{012}^f adalah

$$\bar{Y}_{012}^f = \left(\frac{1}{Y_{af} + Y_{bf} + Y_{cf} + Y_{gf}} \right) \times \begin{bmatrix} Y_{fs11} & Y_{fs12} & Y_{fs31} \\ Y_{fs21} & Y_{fs22} & Y_{fs23} \\ Y_{fs31} & Y_{fs32} & Y_{fs33} \end{bmatrix} \quad (2.27)$$

dengan

$$Y_{fs11} = \frac{1}{3} Y_{gf} (Y_{af} + Y_{bf} + Y_{cf}) \quad (2.28. a)$$

$$Y_{fs22} = Y_{fs33} = \frac{1}{3} Y_{gf} (Y_{af} + Y_{bf} + Y_{cf}) + Y_{af} Y_{bf} + Y_{af} Y_{cf} + Y_{bf} Y_{cf} \quad (2.28. b)$$

$$Y_{fs12} = Y_{fs31} = \frac{1}{3} Y_{gf} (Y_{af} + a^2 Y_{bf} + a Y_{cf}) \quad (2.28. c)$$

$$Y_{fs21} = Y_{fs13} = \frac{1}{3} Y_{gf} (Y_{af} + a Y_{bf} + a^2 Y_{cf}) \quad (2.28. d)$$

$$Y_{fs23} = \frac{1}{3} Y_{gf} (Y_{af} + a^2 Y_{bf} + a Y_{cf}) - (a Y_{af} Y_{bf} + a^2 Y_{af} Y_{cf} + Y_{bf} Y_{cf}) \quad (2.28. e)$$

$$Y_{fs32} = \frac{1}{3} Y_{gf} (Y_{af} + a Y_{bf} + a^2 Y_{cf}) - (a^2 Y_{af} Y_{bf} + a Y_{af} Y_{cf} + Y_{bf} Y_{cf}) \quad (2.28. f)$$

Matriks admitansi urutan gangguan (\bar{Y}_{012}^f) yang telah diperoleh diatas akan digunakan sebagai parameter penentu jenis hubung singkat. Pembahasan mengenai perhitungan arus hubung singkat akan dijelaskan pada bab berikutnya.

BAB III

METODOLOGI PENELITIAN

3.1. Waktu dan Tempat

Penelitian tugas akhir ini dimulai sejak September 2022 dan selesai pada Maret 2023, bertempat di Laboratorium Sistem Tenaga Listrik (STL) Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Lampung. Adapun Jadwal Penelitian seperti pada Tabel 3.1

Tabel 3. 1 Jadwal Penelitian

Agenda	Bulan						
	Sept	Okt	Nov	Des	Jan	Feb	Mar
Studi Literatur dan Studi Bimbingan							
Pengumpulan Data							
Perancangan Program							
Pengajuan Proposal Penelitian							
Pembuatan Program							
Simulasi Program							
Analisis Hasil							
Pengajuan Hasil Penelitian							
Ujian Komprehensif							

3.2. Alat dan Bahan

Penelitian tugas akhir ini menggunakan satu unit laptop dengan spesifikasi; *Processor Intel (R) Core i3 @2.0 GHz* (4 CPUs), memori sebesar 4096 MB RAM, dengan *Operating System Windows 10 64-bit*; perangkat lunak *Visual Studio Code v.1.70.2* sebagai *editor* dan *compiler*; perangkat lunak *python v.3.8.10* sebagai bahasa pemrograman komputasi beserta *library-library* seperti *Numpy* dan *Scipy*; dan kasus sistem tenaga jaringan distribusi yang bersumber dari IEEE PES (*Power & Energy Society*) *Distribution Test Feeder* sebagai data masukan.

3.3. Metodologi Penelitian

Penelitian tugas akhir ini dilakukan dengan langkah-langkah sebagai berikut

1. Studi Literatur

Studi literatur dilakukan dengan mengumpulkan dan mempelajari serta mengkaji literatur yang berkaitan dengan penelitian tugas akhir, yaitu mengenai metode analisis gangguan hubung singkat dan cara memodelkan komponen-komponen jaringan distribusi dalam domain komponen simetris urutan. Literatur tersebut diambil dari berbagai sumber, seperti buku manual analisa sistem tenaga listrik, jurnal ilmiah dan laporan-laporan penelitian terdahulu.

2. Studi Bimbingan

Studi bimbingan dilakukan dengan diskusi untuk menyelesaikan persoalan-persoalan selama penelitian bersama dosen pembimbing. Diskusi dilakukan secara

berkala, mulai dari diskusi mengenai pemodelan saluran dari bentuk *primitive*-nya hingga metode yang digunakan penulis untuk melakukan analisis gangguan hubung singkat. Dengan adanya studi bimbingan, penulis banyak mendapatkan pengetahuan serta arahan dalam pengerjaan penelitian tugas akhir.

3. Pengumpulan dan Pengolahan Data

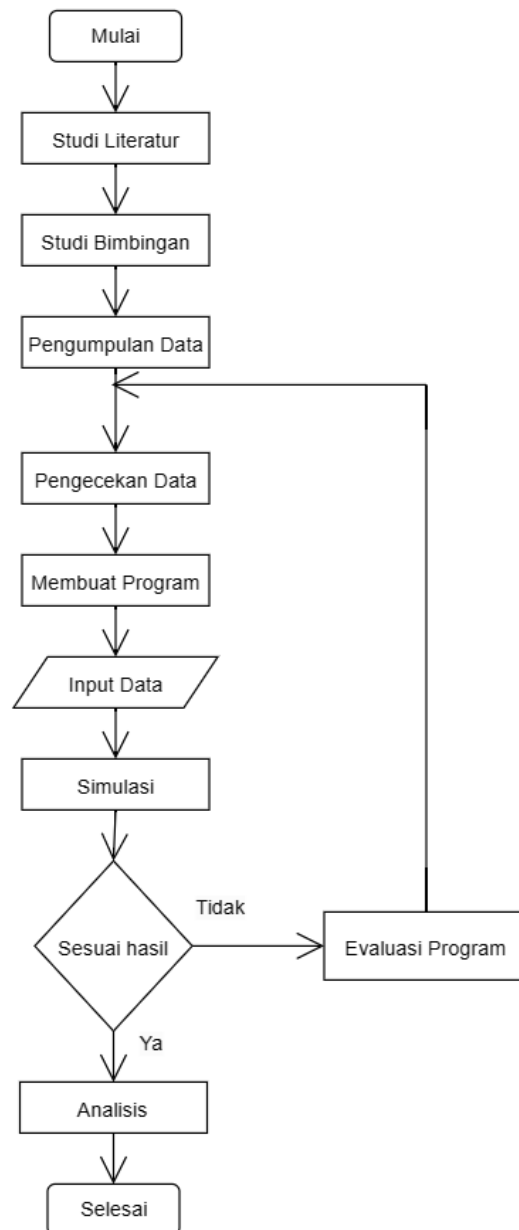
Pengumpulan data berasal dari IEEE PES (*Power & Energy Society*) *Distribution Test Feeder*, lalu data tersebut diolah dan disesuaikan menjadi data masukan dari program komputasi yang telah dibuat menggunakan perangkat lunak *python*.

4. Penulisan Laporan

Perancangan penelitian ini dituangkan kedalam sebuah laporan proposal penelitian. Lalu, hasil penelitian ini dituangkan kedalam sebuah laporan akhir penelitian/ skripsi. Laporan ini merupakan dokumentasi pengerjaan penelitian tugas akhir dan dapat dipertanggungjawabkan sebagaimana mestinya.

3.4. Diagram Pelaksanaan Penelitian

Tahap-tahap pelaksanaan penelitian tugas akhir ini seperti pada Gambar 3.1.



Gambar 3. 1 Diagram Pelaksanaan Penelitian

3.5. Analisis Gangguan Hubung Singkat dengan *Metode General Fault Admittance*

3.5.1. Perhitungan Matriks Impedansi Urutan Sistem

Pada bab sebelumnya telah membahas mengenai pemodelan masing-masing komponen sistem tenaga listrik menjadi bentuk matriks admitansi urutan *primitive*. Masing-masing matriks admitansi urutan sistem dijumlah dari setiap komponen sistem tenaga listrik, sehingga menghasilkan 9 matriks admitansi urutan sistem ($\bar{Y}_{00}, \bar{Y}_{11}, \bar{Y}_{22}, \bar{Y}_{01}, \bar{Y}_{10}, \bar{Y}_{02}, \bar{Y}_{20}, \bar{Y}_{12}, \bar{Y}_{21}$) dengan masing-masing matriks berukuran $n \times n$ (dimana n merupakan jumlah *bus*). Matriks impedansi urutan sistem diperoleh dengan meng-*invers*-kan masing-masing matriks admitansi urutan sistem sebagai berikut,

$$\bar{Z}_{00} = [\bar{Y}_{00}]^{-1} \quad (3.1. a)$$

$$\bar{Z}_{11} = [\bar{Y}_{11}]^{-1} \quad (3.1. b)$$

$$\bar{Z}_{22} = [\bar{Y}_{22}]^{-1} \quad (3.1. c)$$

$$\bar{Z}_{01} = [\bar{Y}_{01}]^{-1} \quad (3.1. d)$$

$$\bar{Z}_{10} = [\bar{Y}_{10}]^{-1} \quad (3.1. e)$$

$$\bar{Z}_{02} = [\bar{Y}_{02}]^{-1} \quad (3.1. f)$$

$$\bar{Z}_{20} = [\bar{Y}_{20}]^{-1} \quad (3.1. g)$$

$$\bar{Z}_{12} = [\bar{Y}_{12}]^{-1} \quad (3.1. h)$$

$$\bar{Z}_{21} = [\bar{Y}_{21}]^{-1} \quad (3.1. i)$$

Sehingga diperoleh matriks impedansi urutan sistem (\bar{Z}_{012}) berukuran $3n \times 3n$ (dimana n merupakan jumlah *bus*) sebagai berikut,

$$\bar{Z}_{012} = \begin{bmatrix} \bar{Z}_{00ii} & \bar{Z}_{01ii} & \bar{Z}_{02ii} & \cdots & \cdots & \cdots \\ \bar{Z}_{10ii} & \bar{Z}_{11ii} & \bar{Z}_{12ii} & \vdots & \ddots & \vdots \\ \bar{Z}_{20ii} & \bar{Z}_{21ii} & \bar{Z}_{22ii} & \cdots & \cdots & \cdots \\ \cdots & \cdots & \cdots & \bar{Z}_{00nn} & \bar{Z}_{01nn} & \bar{Z}_{02nn} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \bar{Z}_{10nn} & \bar{Z}_{11nn} & \bar{Z}_{12nn} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \bar{Z}_{20nn} & \bar{Z}_{21nn} & \bar{Z}_{22nn} \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

3.5.2. Perhitungan Matriks Admitansi Urutan Gangguan

Pada bab sebelumnya telah membahas mengenai pembentukan matriks admitansi urutan gangguan dengan mengakomodir semua jenis gangguan hubung singkat ke dalam satu bentuk umum (\bar{Y}_{012}^f). Terdapat 9 jenis gangguan hubung singkat yaitu; satu fasa ke tanah pada fasa a, fasa b, dan fasa c; dua fasa pada fasa a-b, fasa a-c, dan fasa b- c; dua fasa ke tanah pada fasa a-b, fasa a-c, dan fasa b- c; tiga fasa dan tiga fasa ke tanah. Besarnya nilai admitansi gangguan pada fasa yang terhubung dianggap sama (Y_f) dan bernilai sangat besar. Sedangkan admitansi gangguan fasa yang tidak terhubung bernilai nol. Berikut merupakan matriks admitansi urutan gangguan (\bar{Y}_{012}^f) untuk masing-masing jenis gangguan hubung singkat disajikan pada Tabel 3.2.

Tabel 3. 2 Matriks Admitansi Urutan Gangguan

Jenis Gangguan	Y_{af}	Y_{bf}	Y_{cf}	Y_{gf}	\bar{Y}_{012}^f
SLG Fasa A	Y_f	0	0	Y_f	$\frac{Y_f}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$
SLG Fasa B	0	Y_f	0	Y_f	$\frac{Y_f}{3} \begin{bmatrix} 1 & a^2 & a \\ a & 1 & a^2 \\ a^2 & a & 1 \end{bmatrix}$
SLG Fasa C	0	0	Y_f	Y_f	$\frac{Y_f}{3} \begin{bmatrix} 1 & a & a^2 \\ a^2 & 1 & a \\ a & a^2 & 1 \end{bmatrix}$
LL Fasa A-B	$2Y_f$	$2Y_f$	0	0	$Y_f \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -a \\ 0 & -a^2 & 1 \end{bmatrix}$
LL Fasa B-C	0	$2Y_f$	$2Y_f$	0	$Y_f \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -1 \\ 0 & -1 & 1 \end{bmatrix}$
LL Fasa A-C	$2Y_f$	$2Y_f$	0	0	$Y_f \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -a^2 \\ 0 & -a & 1 \end{bmatrix}$
LLG Fasa A-B	Y_f	Y_f	0	Y_f	$\frac{Y_f}{9} \begin{bmatrix} 2 & 1+a^2 & 1+a \\ 1+a & 5 & 1+a^2-3a \\ 1+a^2 & 1+a-3a^2 & 5 \end{bmatrix}$
LLG Fasa B-C	0	Y_f	Y_f	Y_f	$\frac{Y_f}{9} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 5 & -4 \\ -1 & -4 & 5 \end{bmatrix}$
LLG Fasa A-C	Y_f	0	Y_f	Y_f	$\frac{Y_f}{9} \begin{bmatrix} 2 & 1+a & 1+a^2 \\ 1+a^2 & 5 & 1+a-3a^2 \\ 1+a & 1+a^2-3a & 5 \end{bmatrix}$
LLL	Y_f	Y_f	Y_f	0	$Y_f \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$
LLLG	Y_f	Y_f	Y_f	Y_f	$Y_f \begin{bmatrix} 0.25 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$

3.5.3. Perhitungan Arus Gangguan Hubung Singkat

Besarnya tegangan sistem setelah gangguan ($\bar{V}_{abc,i}^f$) adalah

$$\bar{V}_{abc,i}^f = \bar{Z}_{abc}^f \cdot \bar{I}_{abc,i}^f \quad (3.3)$$

dengan \bar{Z}_{abc}^f merupakan impedansi gangguan dalam bentuk fasa. Sedangkan, $\bar{I}_{abc,i}^f$ merupakan besarnya arus gangguan pada bus i (*bus* yang terganggu).

Untuk memperoleh tegangan urutan setelah gangguan adalah dengan mengalikan tegangan fasa dengan komponen simetris, dimana komponen simetris sebagaimana pada pers. (2.11), maka besarnya tegangan urutan setelah gangguan ($\bar{V}_{012,i}^f$) adalah

$$[\bar{V}_{abc,i}^f] = [A] \cdot \bar{V}_{012,i}^f = \bar{Z}_{abc}^f \cdot [A] \cdot \bar{I}_{012,i}^f \quad (3.4)$$

$$[A]^{-1} \cdot [A] \cdot \bar{V}_{012,i}^f = [A]^{-1} \cdot \bar{Z}_{abc}^f \cdot [A] \cdot \bar{I}_{012,i}^f \quad (3.5)$$

sehingga,

$$\bar{V}_{012,i}^f = \bar{Z}_{012}^f \cdot \bar{I}_{012,i}^f \quad (3.6)$$

dengan,

$$\bar{Z}_{012}^f = [A]^{-1} \cdot \bar{Z}_{abc}^f \cdot [A] \quad (3.7)$$

untuk menghitung besarnya arus urutan gangguan ($\bar{I}_{012,i}^f$), adalah dengan meng-invers-kan \bar{Z}_{012}^f pada pers. (3.6)

$$\bar{I}_{012,i}^f = [\bar{Z}_{012}^f]^{-1} \cdot \bar{V}_{012,i}^f \quad (3.8)$$

$$\bar{I}_{012,i}^f = \bar{Y}_{012}^f \cdot \bar{V}_{012,i}^f \quad (3.9)$$

Besarnya tegangan urutan sistem sistem setelah gangguan ($\bar{V}_{012,i}^f$) juga dapat diakomodir dari persamaan berikut

$$\bar{V}_{012,i}^f = \bar{V}_{012,i}^0 + \Delta\bar{V}_{012,i}^f \quad (3.10)$$

$$\bar{V}_{012,i}^f = \bar{V}_{012,i}^0 + \bar{Z}_{012,ii} \cdot (-\bar{I}_{012,i}^f) \quad (3.11)$$

$$\bar{V}_{012,i}^f = \bar{V}_{012,i}^0 - \bar{Z}_{012,ii} \cdot \bar{I}_{012,i}^f \quad (3.12)$$

dimana $\bar{V}_{012,i}^0$ merupakan tegangan urutan pada bus i (bus yang terganggu) sesaat sebelum terjadi gangguan dan $\Delta\bar{V}_{012,i}^f$ merupakan perubahan tegangan pada bus i akibat terjadinya gangguan, dimana $\Delta\bar{V}_{012,i}^f$ merupakan hasil kali impedansi urutan thevenin ($\bar{Z}_{012,ii}$) sistem dengan besarnya arus urutan gangguan ($\bar{I}_{012,i}^f$) pada bus i . karena arus urutan gangguan hanya diinjeksikan ke satu bus yaitu bus i maka arus urutan gangguan bertanda negatif ($-\bar{I}_{012,i}^f$). dengan mensubstitusikan pers. (3.9) ke pers. (3.12) diperoleh

$$\bar{V}_{012,i}^f = \bar{V}_{012,i}^0 - \bar{Z}_{012,ii} \cdot \bar{Y}_{012}^f \cdot \bar{V}_{012,i}^f \quad (3.13)$$

$$\bar{V}_{012,i}^f + \bar{Z}_{012,ii} \cdot \bar{Y}_{012}^f \cdot \bar{V}_{012,i}^f = \bar{V}_{012,i}^0 \quad (3.14)$$

$$[\mathbf{1} + \bar{Z}_{012,ii} \cdot \bar{Y}_{012}^f] \cdot \bar{V}_{012,i}^f = \bar{V}_{012,i}^0 \quad (3.15)$$

$$\bar{V}_{012,i}^f = [\mathbf{1} + \bar{Z}_{012,ii} \cdot \bar{Y}_{012}^f]^{-1} \cdot \bar{V}_{012,i}^0 \quad (3.16)$$

dari pers. (3.16) diperoleh persamaan untuk menentukan tegangan urutan sistem setelah gangguan pada bus i dengan $\mathbf{1}$ merupakan matriks identitas berukuran 3×3 .

Dengan mensubstitusikan pers. (3.16) ke pers. (3.9) diperoleh

$$\bar{I}_{012,i}^f = \bar{Y}_{012}^f \cdot [\mathbf{1} + \bar{Z}_{012,ii} \cdot \bar{Y}_{012}^f]^{-1} \cdot \bar{V}_{012,i}^0 \quad (3.17)$$

Berdasarkan pers. (3.17) dapat dihitung nilai arus urutan gangguan. Untuk mengakomodir jenis hubung singkat yaitu dengan cara menyesuaikan elemen-elemen matriks admitansi urutan gangguan \bar{Y}_{012}^f sesuai jenis hubung singkat.

Untuk memperoleh arus fasa gangguan yaitu dengan mengalikan arus gangguan urutan $\bar{I}_{012,i}^f$ dengan matriks operator simetris pada pers. (2.11), sehingga diperoleh

$$\bar{I}_{abc,i}^f = A \cdot \bar{I}_{012,i}^f \quad (3.18)$$

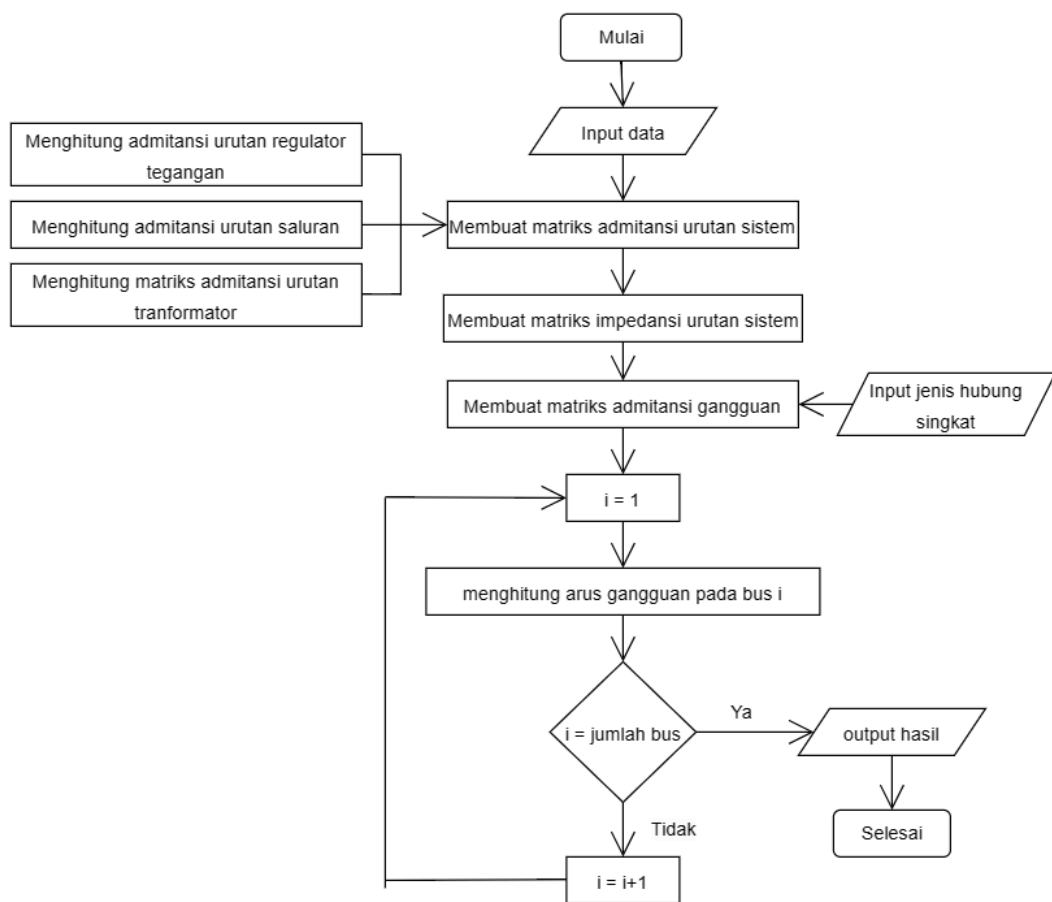
3.6. Proses Komputasi

Berikut adalah proses komputasi dari program yang telah dibuat,

1. Mengubah format data menjadi bentuk fungsi agar dapat dibaca oleh program
2. Menghitung dan membuat matriks admitansi urutan sistem ($\bar{Y}_{00}, \bar{Y}_{11}, \bar{Y}_{22}, \bar{Y}_{01}, \bar{Y}_{10}, \bar{Y}_{02}, \bar{Y}_{20}, \bar{Y}_{12}, \bar{Y}_{21}$) dengan masing-masing matriks berukuran $n \times n$. Matriks admitansi urutan sistem dihitung dari data impedansi konfigurasi saluran, regulator tegangan dan transformator.
3. Menghitung matriks impedansi urutan sistem dengan meng-*invers*-kan masing-masing matriks admitansi urutan sistem ($\bar{Z}_{00}, \bar{Z}_{11}, \bar{Z}_{22}, \bar{Z}_{01}, \bar{Z}_{10}, \bar{Z}_{02}, \bar{Z}_{20}, \bar{Z}_{12}, \bar{Z}_{21}$) sehingga diperoleh matriks impedansi urutan sistem (\bar{Z}_{012}) berukuran $3n \times 3$
4. Menentukan matriks admitansi urutan gangguan (\bar{Y}_{012}^f) sesuai dengan jenis gangguan hubung singkat
5. Menghitung besarnya arus urutan gangguan hubung singkat ($\bar{I}_{012,i}^f$) menggunakan pers. (3.17) pada bus i .
6. $i = i + 1$
7. Lakukan langkah nomor 5 hingga $i = \text{jumlah bus}$
8. Menampilkan hasil komputasi dalam bentuk tabel.

3.7. Diagram Alir Komputasi Gangguan Hubung Singkat dalam Domain Urutan dengan Mempertimbangkan Saluran Fasa tak Lengkap Menggunakan Metode *General Fault Admittance*

Tahap-tahap komputasi gangguan Hubung Singkat dalam Domain Urutan dengan Mempertimbangkan Saluran Fasa tak Lengkap Menggunakan Metode *General Fault Admittance* seperti pada Gambar 3.2.



Gambar 3. 2 Diagram Alir Komputasi Gangguan Hubung Singkat

BAB V

KESIMPULAN

5.1. Kesimpulan

Berdasarkan hasil komputasi arus gangguan hubung singkat dengan mempertimbangkan saluran fasa tak lengkap menggunakan metode *general fault admittance*, serta perbandingan nilai komputasi, maka dapat disimpulkan bahwa,

1. Metode *general fault admittance* mampu menghitung arus gangguan hubung singkat dengan mengakomodir semua jenis gangguan hubung singkat kedalam satu formula sehingga mempermudah proses komputasi.
2. Konsekuensi dari saluran fasa tak lengkap adalah adanya impedansi bersama antar urutan (elemen *off-diagonal* matriks impedansi urutan) dan nilainya selalu lebih kecil dari impedansi sendiri urutan (elemen diagonal matriks impedansi urutan)
3. Selisih nilai *magnitude* arus gangguan hubung singkat hasil komputasi antara metode *general fault admittance* dengan program OpenDSS tidak lebih dari 3.0×10^{-4} p.u.

5.2. Saran

Saran yang dapat diberikan penulis untuk penelitian berikutnya adalah:

1. Mengembangkan metode *general fault admittance* menjadi model *iterative* yaitu dengan melakukan iterasi nilai admitansi gangguan (Y_f) terhadap besarnya arus gangguan hubung singkat sehingga mencapai suatu nilai yang konvergen.
2. Analisis gangguan hubung singkat dengan metode *general fault admittance* dapat diaplikasikan pada studi kestabilan transien.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] H. Saadat, *Power System Analysis*, 2nd ed., New York: McGraw Hill, 2004, pp. 353-459.
- [2] W. Stevenson, *Power System Analysis*, 1st ed., New York: McGraw Hill, 1994, pp. 380-530.
- [3] J. D. Sakala and J. S. J. Daka, "General fault admittance method solution of a balanced line to line," *Electrical Power and Energy Systems*, pp. 46-51, 2016.
- [4] M. P. Selvan, *Unbalanced Distribution System Short Circuit Analysis An Object-Oriented Program*, 2006.
- [5] C. L. Fortesque, "Method of Symmetrical Coordinates Applied to the Solution of Polyphase Network," pp. 1027-1140, 28 June 1918.
- [6] O. I. Elgerd, *Electric Energy Sistem Theory an Introduction*, 2nd ed., McGraw Hill, 1971.
- [7] W. H. Kersting., R. Kerestes, *Distribution System Modelling and Analysis with Mathlab and Windmil*, 5th ed., 2022.
- [8] J.-S. Hong, "fault Location Method using Phasor Measurement units and Short Circuit Analysis for Power Distribution Networks," pp. 1-23, 2020.

- [9] M. Shin, C. Park, J. Jung, K. Kim, and S. So, "Nodal Admittance Modelling of Three-phase Step-voltage Regulators and their Applications," pp. 362-367, 2013.
- [10] Distribution System Analysis Subcommittee, "IEEE 13 Node Test Feeder Report," pp. 1-11, 2001.
- [11] Distribution System Analysis Subcommittee, "IEEE 34 Node Test Feeder," pp. 1-16, 2010.
- [12] Distribution System Analysis Subcommittee, "IEEE 123 Node Test Feeder".
- [13] I. Dzafic, R. A. Jabr, and H. T. Neisius, "Transformer Modelling for Three-phase Distribution Network Analysis," vol. 30, no. 5, pp. 2604-2611, 2015.
- [15] Q. Cui, Y. Weng, "Enhance High Impedance Fault Detection and Location Accuracy via-PMUs," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 11, no. 1, pp.797-809, January 2020.
- [16] J. D. Garcia, C. O. Henao, "High impedance fault modelling and location for transmission line," vol. 196, 2021.
- [17] O. A. Gashteroodkhani, M. Majidi, and M. Etezadi-Amoli, "A Fault Data Based Method for Zero-Sequence Impedance Estimation of Mutually Coupled Transmission Lines," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 36, no. 5, pp. 2768–2776, Oct. 2021, doi: 10.1109/TPWRD.2020.3026672.