

**ANALISIS GANGGUAN HUBUNG SINGKAT PADA SISTEM DISTRIBUSI  
DENGAN MEMPERTIMBANGKAN BEBAN MENGGUNAKAN METODE  
*GENERAL FAULT ADMITTANCE***

**(Skripsi)**

**Oleh**

**DESTALIA YUNITA PUTRI**

**2115031021**



**FAKULTAS TEKNIK  
UNIVERSITAS LAMPUNG  
BANDAR LAMPUNG  
2025**

## ABSTRAK

### ANALISIS GANGGUAN HUBUNG SINGKAT PADA SISTEM DISTRIBUSI DENGAN MEMPERTIMBANGKAN BEBAN MENGUNAKAN METODE *GENERAL FAULT ADMITTANCE*

Oleh

DESTALIA YUNITA PUTRI

Dalam sistem tenaga listrik, gangguan hubung singkat dapat menyebabkan arus yang sangat tinggi sehingga berpotensi merusak peralatan jika tidak segera ditangani. Dalam menganalisis arus gangguan hubung singkat pada sistem distribusi dengan mempertimbangkan impedansi beban, analisis dilakukan menggunakan metode *General Fault Admittance*, yang dapat menyelesaikan semua jenis gangguan hubung singkat, baik simetris maupun tidak simetris. Data masukan 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*. Hasil penelitian menunjukkan bahwa dengan mempertimbangkan impedansi beban, nilai arus gangguan menjadi lebih kecil dibandingkan tidak mempertimbangkan impedansi beban. Selisih terbesar nilai arus gangguan hubung singkat setelah mempertimbangkan beban yaitu 3.889 *Ampere* untuk 13 *Node*, 228 *Ampere* untuk 34 *Node*, dan 6.477 *Ampere* untuk 123 *Node*. Hal tersebut penting untuk perencanaan proteksi sistem tenaga listrik. Perangkat lunak yang dikembangkan dalam penelitian ini dibandingkan dengan perangkat lunak OpenDSS dan diperoleh selisih magnitude arus tidak lebih dari  $3.0 \times 10^{-4}$  p.u.

Kata kunci: gangguan hubung singkat, jaringan distribusi, beban, *general fault admittance*, OpenDSS

## **ABSTRACT**

### **ANALYSIS OF SHORT-CIRCUIT FAULTS IN DISTRIBUTION SYSTEMS CONSIDERING LOAD IMPEDANCE USING GENERAL FAULT ADMITTANCE METHOD**

**By**

**DESTALIA YUNITA PUTRI**

In power systems, short-circuit faults can result in extremely high currents, potentially damaging equipment if not promptly addressed. To analyze fault currents in distribution systems while considering load impedance, this study employs the General Fault Admittance method, which can accommodate all types of short-circuit faults, both symmetrical and asymmetrical. The input data for the software is sourced from the IEEE PES (Power & Energy Society) Distribution Test Feeder, specifically the IEEE 13 Node Test Feeder, IEEE 34 Node Test Feeder, and IEEE 123 Node Test Feeder. The results indicate that considering load impedance leads to lower fault current magnitudes compared to cases where load impedance is ignored. The maximum difference in short-circuit fault current after considering the load is 3.889 Amperes for the 13-Node system, 228 Amperes for the 34-Node system, and 6.477 Amperes for the 123-Node system. This is crucial for power system protection planning. The developed software was compared with OpenDSS, revealing a fault current magnitude difference of no more than  $3.0 \times 10^{-4}$  p.u.

**Keywords:** short circuit fault, distribution network, load, general fault admittance, OpenDSS.

**ANALISIS GANGGUAN HUBUNG SINGKAT PADA SISTEM DISTRIBUSI  
DENGAN MEMPERTIMBANGKAN BEBAN MENGGUNAKAN METODE  
*GENERAL FAULT ADMITTANCE***

Oleh

DESTALIA YUNITA PUTRI

Skripsi

Sebagai Salah Satu Syarat Mencapai Gelar  
SARJANA TEKNIK

Pada

Jurusan Teknik Elektro  
Fakultas Teknik Universitas Lampung



**FAKULTAS TEKNIK  
UNIVERSITAS LAMPUNG  
BANDAR LAMPUNG  
2025**

Judul Skripsi : ANALISIS GANGGUAN HUBUNG SINGKAT  
PADA SISTEM DISTRIBUSI DENGAN  
MEMPERTIMBANGKAN BEBAN  
MENGGUNAKAN METODE *GENERAL FAULT  
ADMITTANCE*

Nama Mahasiswa : DESTALIA YUNITA PUTRI

Nomor Pokok Mahasiswa : 2115031021

Jurusan : Teknik Elektro

Fakultas : Teknik



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

  
**Zulmiftah Huda, S.T., M.Eng.**  
NIP 19880624 201903 1 015

2. Mengetahui

Ketua Jurusan Teknik Elektro



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

Ketua Program Studi Teknik Elektro



**Sumadi, S.T., M.T.**  
NIP 19731104 200003 1 001

**MENGESAHKAN**

1. Tim Penguji

Ketua : **Dr. Eng. Ir. Lukmanul Hakim, S.T., M.Sc., I.P.M.** 

Sekretaris : **Zulmiftah Huda, S.T., M.Eng.** 

Penguji  
Bukan Pembimbing : **Ir. Herri Gusmedi, S.T., M.T., I.P.M.** 

2. Dekan Fakultas Teknik Universitas Lampung



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

Tanggal Lulus Ujian Skripsi : **22 Januari 2025**

## 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, 11 Februari 2025



**Destalia Yunita Putri**  
NPM 2115031021

## RIWAYAT HIDUP



Penulis dilahirkan di Tanjung Senang, Bandar Lampung pada tanggal 25 Desember 2002, sebagai anak pertama dari dua bersaudara, dari bapak Yogi Himawan dan Ibu Wiwin Gusnita.

Riwayat pendidikan penulis dimulai dari Sekolah Dasar Negeri (SDN) 1 Perumnas Way Halim, pada tahun 2009 hingga tahun 2015, Sekolah Menengah Pertama Negeri (SMPN) 19 Bandar Lampung, pada tahun 2015 hingga tahun 2018, dan Sekolah Menengah Atas Negeri (SMAN) 9 Bandar Lampung pada tahun 2018 hingga tahun 2021.

Penulis menjadi mahasiswa Jurusan Teknik Elektro, Universitas Lampung, pada tahun 2021 melalui jalur SNMPTN. Selama menjadi mahasiswa penulis berkesempatan menjadi asisten dosen mata kuliah Menggambar Teknik dan Praktikum Analisa Sistem Tenaga tahun 2023-2024 dan tergabung dalam keanggotaan asisten Laboratorium Sistem Tenaga Listrik dari tahun 2023. Selain itu, penulis juga tergabung dalam organisasi intra kampus Himpunan Mahasiswa Teknik Elektro (Himatro) yang pada tahun 2022 diamanahkan sebagai anggota Departemen Pengembangan Keteknikan Divisi Pengembangan Masyarakat dan pada tahun 2023 diamanahkan sebagai Sekretaris Umum. Penulis melaksanakan kerja praktik di PT. PLN UID Kalimantan Selatan dan Kalimantan Tengah, dalam Satuan Kerja Pemeliharaan dan Operasi Jaringan Distribusi dan membuat laporan yang berjudul “Analisis Perbaikan Tegangan Ujung Dengan Metode Pecah Beban di PT PLN (Persero) Rayon Martapura Penyulang CPK06 Berbasis ETAP 19.0.1”.



Kupersembahkan karya ini pada semesta,  
yang merangkai jejak langkah dalam doa dan asa.

**Untuk Ayah dan Ibu,**  
penopang langkah, pelita jiwa,  
dengan doa yang tak pernah lelah,  
dengan cinta yang tak berbatas arah.

Untuk keluarga, sahabat, dan guru kehidupan,  
yang menyemai semangat saat lelah mendera,  
yang percaya saat ragu menyelimuti,  
yang hadir meski dalam diam menemani.

Untuk setiap malam yang panjang,  
untuk setiap lelah yang menjelma harapan,  
untuk ilmu yang kini terpatri,  
semoga menjadi cahaya yang berarti.

Karya ini bukan sekadar tulisan,  
melainkan bukti perjalanan,  
tentang tekad, perjuangan,  
dan doa yang selalu mengiringi.

**Terima kasih atas segala cinta dan restu,  
karena tanpa-Nya, aku tak akan sampai disini.**

## MOTTO

“Allahu laa ilaaha illaa huwal hayyul qoyyuum, laa takhudzuhuu sinatuw walaa naum, la huu maa fis samaawaati wa maa fil ardh, mann dzal ladzii yasyfau indahuu illa biidznih, ya lamu maa baina aidiihim wa maa kholfahum, wa laa yuhiituuna bisyai im min ilmihii illaa bimaa syaa, wasia kursiyyuhus samaawaati walardh, wa laa yaudluhuhu hifdzuhumaa, wa huwal aliyyul adziim.”

“Allah, tidak ada Tuhan (yang berhak disembah) melainkan Dia Yang Hidup kekal lagi terus menerus mengurus (makhluk-Nya), tidak mengantuk dan tidak tidur. Kepunyaan-Nya apa yang di langit dan di bumi. Tiada yang dapat memberi syafaat di sisi Allah tanpa izin-Nya? **Allah mengetahui apa-apa yang di hadapan mereka dan di belakang mereka, dan mereka tidak mengetahui apa-apa dari ilmu Allah melainkan apa yang dikehendaki-Nya.** Kursi Allah meliputi langit dan bumi. Dan Allah tidak merasa berat memelihara keduanya, dan Allah Maha Tinggi lagi Maha Besar.”

**(QS. Al-Baqarah 2:255)**

## SANWACANA

Segala puji bagi Allah SWT atas rahmat dan karunia-Nya yang telah diberikan kepada penulis, sehingga Tugas Akhir ini dapat diselesaikan dengan baik. Selawat serta salam senantiasa tercurah kepada Nabi Muhammad SAW, teladan bagi umat manusia yang membawa cahaya kebenaran, penyempurna ajaran sebelumnya, dan pembimbing menuju jalan yang lurus.

Tugas Akhir dengan judul “Analisis Gangguan Hubung Singkat Pada Sistem Distrubsi Dengan Mempertimbangkan Beban Menggunakan Metode *General Fault Admittance*” 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., I.P.M. selaku dosen pembimbing utama sekaligus pembimbing akademik yang selalu memberikan semangat serta motivasi dengan sabar dan baik kepada penulis.
5. Bapak Zulmiftah Huda, S.T., M.Eng. selaku dosen pembimbing pendamping yang telah memberikan saran, dan arahan yang selalu membantu penulis.
6. Bapak Ir. Herri Gusmedi, S.T., M.T., I.P.M. selaku dosen penguji yang telah memberikan saran, bimbingan dan arahan dengan baik dan ramah
7. Bapak dan Ibu Dosen Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Lampung yang telah memberikan ilmu, nasihat dan pengalaman yang mengubah pola pikir penulis kearah yang lebih baik.
8. Staff administrasi Jurusan Teknik Elektro dan Fakultas Teknik Universitas Lampung yang telah membantu penulis dalam hal administrasi.

9. Keluarga penulis yang terus memberikan dukungan kepada penulis dalam bentuk apapun.
10. Irfan yang tidak disengaja hadir untuk terus membantu dan memberikan dukungan kepada penulis dan sasaran curhat dikala pusing akan tugas akhir, yang selalu menjadi *partner*, musuh, teman dan pasangan yang baik disetiap perannya.
11. Wantini, Saskia, Titis yang selalu membersamai sejak zaman mencari jati diri.
12. Tsania Zahra Taslima yang terus memberikan dukungan serta motivasi untuk terus semangat dan selalu bersedia dijadikan teman berdiskusi dan *partner* yang selalu mengerti, yang sangat paham usaha satu sama lain dan segala hal yang terjadi walau belum saling bicara.
13. Atika, Dina, Esa, Kezia yang selalu ada disaat suka dan duka melewati perjalanan tugas akhir ini. Atika yang selalu menenangkan dengan kata katanya, Dina sang penjelajah kuliner yang selalu ngajak makan penulis untuk memperbaiki *mood*, Esa yang selalu menularkan tawa, dan Kezia yang membuat penulis yakin dengan diri sendiri.
14. Kak Al Hadi, selaku alumni Jurusan Teknik Elektro Universitas Lampung yang telah berkenan diskusi disela sela waktu kerjanya dengan baik dan ramah.
15. Unedo dan Riehan yang menjadi partner skripsi yang selalu membantu penulis dalam mengerjakan tugas akhir ini.
16. Keluarga besar SOLIMI yang berisi orang-orang luar biasa sejak SMA yang selalu mendukung dan tidak berhenti untuk terus mendoakan.
17. Fatiyah dan Gihon yang siap diajak ngerjain skripsi bareng dan selalu menyenangkan.
18. Pengurus Harian Periode 2023 yang telah memberikan banyak Pelajaran berharga dalam berorganisasi.
19. Segenap Keluarga Besar Laboratorium Sistem Tenaga Listrik 2021 dan 2022.
20. Keluarga besar Angkatan 2021 EXCALTO, yang selalu membanggakan.
21. Keluarga besar HIMATRO UNILA Periode 2023, yang telah memberikan Pelajaran berharga untuk penulis dalam memimpin diri sendiri.

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

Bandarlampung, 11 Februari 2025



Destalia Yunita Putri

## DAFTAR ISI

	<b>Halaman</b>
<b>DAFTAR ISI .....</b>	<b>xiv</b>
<b>DAFTAR GAMBAR .....</b>	<b>xvii</b>
<b>DAFTAR TABEL .....</b>	<b>xxi</b>
<b>BAB 1 PENDAHULUAN .....</b>	<b>1</b>
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Tujuan Penelitian .....	2
1.3 Rumusan Masalah.....	3
1.4 Batasan Masalah .....	3
1.5 Manfaat Penelitian .....	4
1.6 Hipotesis.....	4
1.7 Sistematika Penulisan.....	5
<b>BAB II TINJAUAN PUSTAKA .....</b>	<b>6</b>
2.1 Penelitian Terdahulu .....	6
2.2 Komponen Sistem Distribusi.....	8
2.2.1 Model Saluran .....	8
2.2.2 Model Transformator.....	12
2.2.3 Model Regulator Tegangan.....	14
2.2.4 Model Beban.....	16
2.3 Metode <i>General Fault Admittance</i> .....	17
<b>BAB III METODOLOGI PENELITIAN.....</b>	<b>20</b>
3.1 Waktu dan Tempat .....	20
3.2 Alat dan Bahan.....	20
3.3 Metodologi Penelitian .....	21
3.4 Diagram Pelaksanaan Penelitian.....	23
3.5 Analisis Gangguan Hubung Singkat Menggunakan Metode <i>General Fault Admittance</i> ...	24
3.5.1 Menghitung Matriks Impedansi Urutan .....	24
3.5.1.1 Menghitung Matriks Impedansi Urutan Sistem .....	24
3.5.1.2 Menghitung Matriks Impedansi Urutan Beban.....	25
3.5.2 Menghitung Matriks Admitansi Urutan Gangguan.....	26
3.5.3 Menghitung Arus Gangguan Hubung Singkat.....	28
3.6 Proses Komputasi.....	30
3.7 Diagram Alir Komputasi Gangguan Hubung Singkat .....	31
<b>BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN .....</b>	<b>32</b>
4.1 Analisis Gangguan Hubung Singkat .....	32

4.2 Data Uji Sistem Jaringan Distribusi.....	36
4.3 Matriks Impedansi Urutan Sistem.....	38
4.4 Perbandingan Hasil Komputasi Metode <i>General Fault Admittance</i> dan OpenDSS.....	39
4.4.1 Gangguan Hubung Singkat Satu Fasa ke Tanah ( <i>Line to Ground Fault</i> ) pada Fasa A39	
4.4.2 Gangguan Hubung Singkat Satu Fasa ke Tanah ( <i>Line to Ground Fault</i> ) pada Fasa B43	
4.4.3 Gangguan Hubung Singkat Satu Fasa ke Tanah ( <i>Line to Ground Fault</i> ) pada Fasa C46	
4.4.4 Gangguan Hubung Singkat Dua Fasa ( <i>Double Line Fault</i> ) pada Fasa (A-B) .....	49
4.4.5 Gangguan Hubung Singkat Dua Fasa ( <i>Double Line Fault</i> ) pada Fasa (A-C) .....	52
4.4.6 Gangguan Hubung Singkat Dua Fasa ( <i>Double Line Fault</i> ) pada Fasa (B-C) .....	55
4.4.7 Gangguan Hubung Singkat Dua Fasa ke Tanah ( <i>Double Line to Ground Fault</i> ) pada Fasa (A-B) .....	58
4.4.8 Gangguan Hubung Singkat Dua Fasa ke Tanah ( <i>Double Line to Ground Fault</i> ) pada Fasa (A-C) .....	61
4.4.9 Gangguan Hubung Singkat Dua Fasa ke Tanah ( <i>Double Line to Ground Fault</i> ) pada Fasa (B-C) .....	64
4.4.10 Gangguan Hubung Singkat Tiga Fasa ( <i>Triple Line Fault</i> ) .....	67
4.4.11 Gangguan Hubung Singkat Tiga Fasa ke Tanah ( <i>Triple Line to Ground Fault</i> ).....	70
<b>BAB V PENUTUP .....</b>	<b>73</b>
5.1 Kesimpulan.....	73
5.2 Saran.....	74
<b>DAFTAR PUSTAKA.....</b>	<b>75</b>

## DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1 Representasi <i>General Fault Admittance</i> Tiga Fasa ke Tanah.....	17
Gambar 3. 1 Diagram Alir Penelitian Tugas Akhir. ....	23
Gambar 3. 2 Diagram Alir Komputasi Gangguan Hubung Singkat Dalam Domain Urutan dengan Mempertimbangkan Beban Menggunakan Metode <i>General Fault Admittance</i> .....	31
Gambar 4. 1 Cuplikan Kode Program Menghitung Matriks Impedansi Urutan Sistem .....	33
Gambar 4. 2 Cuplikan Kode Program Menghitung Matriks Impedansi Urutan Beban .....	34
Gambar 4. 3 Cuplikan Kode Program Membentuk Matriks Admitansi Urutan Gangguan.....	34
Gambar 4. 4 Cuplikan Kode Program Menghitung Arus Gangguan Urutan .....	35
Gambar 4.5 <i>One-line diagram IEEE 13 Node Test Feeder</i> .....	36
Gambar 4.6 <i>One-line diagram IEEE 34 Node Test Feeder</i> .....	37
Gambar 4. 7 Bentuk Matriks Impedansi Urutan Sistem dan Beban pada kasus <i>IEEE 13 Node Test Feeder</i> .....	38
Gambar 4. 8 Bentuk Matriks Impedansi Urutan Sistem dan Beban pada kasus <i>IEEE 34 Node Test Feeder</i> .....	38
Gambar 4. 9 Selisih nilai <i>magnitude</i> arus gangguan hubung singkat satu fasa (A) ke tanah hasil komputasi metode <i>general fault admittance</i> dan OpenDSS pada kasus <i>IEEE 13 Node Test Feeder</i> .....	40
Gambar 4. 10 Selisih nilai <i>magnitude</i> arus gangguan hubung singkat satu fasa (A) ke tanah hasil komputasi metode <i>general fault admittance</i> dan OpenDSS pada kasus <i>IEEE 34 Node Test Feeder</i> .....	41
Gambar 4. 11 Selisih nilai <i>magnitude</i> arus gangguan hubung singkat satu fasa (A) ke tanah hasil komputasi metode <i>general fault admittance</i> dan OpenDSS pada kasus <i>IEEE 123 Node Test Feeder</i> .....	42



Gambar 4. 12 Selisih nilai magnitudo arus gangguan hubung singkat satu fasa (B) ke tanah hasil komputasi metode <i>general fault admittance</i> dan OpenDSS pada kasus IEEE 13 <i>Node Test Feeder</i> .....	43
Gambar 4. 13 Selisih nilai magnitudo arus gangguan hubung singkat satu fasa (B) ke tanah hasil komputasi metode <i>general fault admittance</i> dan OpenDSS pada kasus IEEE 34 <i>Node Test Feeder</i> .....	44
Gambar 4. 14 Selisih nilai <i>magnitudo</i> arus gangguan hubung singkat satu fasa (B) ke tanah hasil komputasi metode <i>general fault admittance</i> dan OpenDSS pada kasus IEEE 123 <i>Node Test Feeder</i> .....	45
Gambar 4. 15 Selisih nilai magnitudo arus gangguan hubung singkat satu fasa (C) ke tanah hasil komputasi metode <i>general fault admittance</i> dan OpenDSS pada kasus IEEE 13 <i>Node Test Feeder</i> .....	46
Gambar 4. 16 Selisih nilai magnitudo arus gangguan hubung singkat satu fasa (C) ke tanah hasil komputasi metode <i>general fault admittance</i> dan OpenDSS pada kasus IEEE 34 <i>Node Test Feeder</i> .....	47
Gambar 4. 17 Selisih nilai <i>magnitudo</i> arus gangguan hubung singkat satu fasa (C) ke tanah hasil komputasi metode <i>general fault admittance</i> dan OpenDSS pada kasus IEEE 123 <i>Node Test Feeder</i> .....	48
Gambar 4. 18 Selisih nilai magnitudo arus gangguan hubung singkat dua fasa pada fasa (A-B) hasil komputasi metode <i>general fault admittance</i> dan OpenDSS pada kasus IEEE 13 <i>Node Test Feeder</i> .....	49
Gambar 4. 19 Selisih nilai magnitudo arus gangguan hubung singkat dua fasa pada fasa (A-B) hasil komputasi metode <i>general fault admittance</i> dan OpenDSS pada kasus IEEE 34 <i>Node Test Feeder</i> .....	50
Gambar 4. 20 Selisih nilai <i>magnitudo</i> arus gangguan hubung singkat dua fasa ( <i>double line fault</i> ) pada Fasa (A-B) hasil komputasi metode <i>general fault admittance</i> dan OpenDSS pada kasus IEEE 123 <i>Node Test Feeder</i> .....	51
Gambar 4. 21 Selisih nilai magnitudo arus gangguan hubung singkat dua fasa pada fasa (A-C) hasil komputasi metode <i>general fault admittance</i> dan OpenDSS pada kasus IEEE 13 <i>Node Test Feeder</i> .....	52

Gambar 4. 22 Selisih nilai magnitude arus gangguan hubung singkat dua fasa pada fasa (A-C) hasil komputasi metode <i>general fault admittance</i> dan OpenDSS pada kasus IEEE 34 <i>Node Test Feeder</i> .....	53
Gambar 4. 23 Selisih nilai <i>magnitude</i> arus gangguan hubung singkat dua fasa ( <i>double line fault</i> ) pada Fasa (A-C) hasil komputasi metode <i>general fault admittance</i> dan OpenDSS pada kasus IEEE 123 <i>Node Test Feeder</i> .....	54
Gambar 4. 24 Selisih nilai magnitude arus gangguan hubung singkat dua fasa pada fasa (B-C) hasil komputasi metode <i>general fault admittance</i> dan OpenDSS pada kasus IEEE 13 <i>Node Test Feeder</i> .....	55
Gambar 4. 25 Selisih nilai magnitude arus gangguan hubung singkat dua fasa pada fasa (B-C) hasil komputasi metode <i>general fault admittance</i> dan OpenDSS pada kasus IEEE 34 <i>Node Test Feeder</i> .....	56
Gambar 4. 26 Selisih nilai <i>magnitude</i> arus gangguan hubung singkat dua fasa ( <i>double line fault</i> ) pada Fasa (B-C) hasil komputasi metode <i>general fault admittance</i> dan OpenDSS pada kasus IEEE 123 <i>Node Test Feeder</i> .....	57
Gambar 4. 27 Selisih nilai magnitude arus gangguan hubung singkat dua fasa ke tanah pada fasa (A-B) hasil komputasi metode <i>general fault admittance</i> dan OpenDSS pada kasus IEEE 13 <i>Node Test Feeder</i> .....	58
Gambar 4. 28 Selisih nilai magnitude arus gangguan hubung singkat dua fasa ke tanah pada fasa (A-B) hasil komputasi metode <i>general fault admittance</i> dan OpenDSS pada kasus IEEE 34 <i>Node Test Feeder</i> .....	59
Gambar 4. 29 Selisih nilai <i>magnitude</i> arus gangguan hubung singkat dua fasa ke tanah pada fasa (A-B) hasil komputasi metode <i>general fault admittance</i> dan OpenDSS pada kasus IEEE 123 <i>Node Test Feeder</i> .....	60
Gambar 4. 30 Selisih nilai magnitude arus gangguan hubung singkat dua fasa ke tanah pada fasa (A-C) hasil komputasi metode <i>general fault admittance</i> dan OpenDSS pada kasus IEEE 13 <i>Node Test Feeder</i> .....	61
Gambar 4. 31 Selisih nilai magnitude arus gangguan hubung singkat dua fasa ke tanah pada fasa (A-C) hasil komputasi metode <i>general fault admittance</i> dan OpenDSS pada kasus IEEE 34 <i>Node Test Feeder</i> .....	62
Gambar 4. 32 Selisih nilai <i>magnitude</i> arus gangguan hubung singkat dua fasa ke tanah ( <i>double line to ground fault</i> ) pada Fasa (A-C) hasil komputasi metode	

<i>general fault admittance</i> dan OpenDSS pada kasus IEEE 123 <i>Node Test Feeder</i> .....	63
Gambar 4. 33 Selisih nilai magnitude arus gangguan hubung singkat dua fasa ke tanah pada fasa (B-C) hasil komputasi metode <i>general fault admittance</i> dan OpenDSS pada kasus IEEE 13 <i>Node Test Feeder</i> .....	64
Gambar 4. 34 Selisih nilai magnitude arus gangguan hubung singkat dua fasa ke tanah pada fasa (B-C) hasil komputasi metode <i>general fault admittance</i> dan OpenDSS pada kasus IEEE 34 <i>Node Test Feeder</i> .....	65
Gambar 4. 35 Selisih nilai <i>magnitude</i> arus gangguan hubung singkat dua fasa ke tanah ( <i>double line to ground fault</i> ) Fasa (B-C) hasil komputasi metode <i>general fault admittance</i> dan OpenDSS pada kasus IEEE 123 <i>Node Test Feeder</i> .....	66
Gambar 4. 36 Selisih nilai magnitude 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> .....	67
Gambar 4. 37 Selisih nilai magnitude 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> .....	68
Gambar 4. 38 Selisih nilai <i>magnitude</i> arus gangguan hubung singkat tiga fasa ( <i>triple line fault</i> ) hasil komputasi metode <i>general fault admittance</i> dan OpenDSS pada kasus IEEE 123 <i>Node Test Feeder</i> .....	69
Gambar 4. 39 Selisih nilai magnitude 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> .....	70
Gambar 4. 40 Selisih nilai magnitude 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> .....	71
Gambar 4. 41 Selisih nilai <i>magnitude</i> arus gangguan hubung singkat tiga fasa ke tanah ( <i>triple line to ground</i> ) hasil komputasi metode <i>general fault admittance</i> dan OpenDSS pada kasus IEEE 123 <i>Node Test Feeder</i> .....	72

**DAFTAR TABEL**

Tabel 2. 1 Tabel Matriks Admitansi <i>Primitive</i> Urutan Saluran.....	11
Tabel 2. 2 Tabel Matriks Admitansi <i>Primitive</i> Urutan Transformator .....	13
Tabel 2. 3 Tabel Rasio efektif Regulator (aR) tegangan. ....	14
Tabel 2.4 Tabel Matriks Admitansi <i>Primitive</i> Urutan Regulator Tegangan. ....	15
Tabel 3. 1 Jadwal Penelitian .....	20
Tabel 3. 2 Matriks Admitansi Urutan Gangguan.....	26

# **BAB 1**

## **PENDAHULUAN**

### **1.1 Latar Belakang**

Dalam pengoperasian sistem tenaga listrik saat kondisi normal memiliki nilai arus yang melalui komponen – komponen sistem berada dalam nilai yang telah ditentukan. Namun saat terjadi gangguan nilai arus yang melalui komponen akan melebihi nilai normalnya. Nilai arus yang sangat tinggi ini akan menyebabkan kerusakan pada peralatan jika tidak diputus atau dibatasi secepatnya. Hubung singkat sendiri merupakan suatu gangguan *abnormal* yang terjadi akibat hubungan penghantar bertegangan atau penghantar tidak bertegangan secara langsung sehingga terjadi aliran arus yang tidak normal (nilainya sangat besar). Suatu sistem harus dilindungi terhadap aliran arus hubung singkat yang besar dengan memutus bagian sistem yang terganggu dengan menggunakan pemutus yang memiliki nilai yang sesuai dan berkoordinasi dengan pelindung lainnya [1].

Proses mengevaluasi tegangan dan arus sistem pada berbagai jenis hubung singkat disebut analisis gangguan. Jenis gangguan yang paling sering terjadi yaitu gangguan hubung singkat. Gangguan hubung singkat terbagi menjadi gangguan hubung singkat simetris dan gangguan hubung singkat tidak simetris. Gangguan hubung singkat simetris meliputi gangguan hubung singkat tiga fasa (LLL) dan tiga fasa ke tanah (LLLG), gangguan ini memiliki nilai tegangan dan arus yang sama. Sedangkan gangguan hubung singkat tidak simetris meliputi gangguan hubung singkat satu fasa ke tanah (LG), dua fasa (LL), dan dua fasa ke tanah (LLG) dimana gangguan hubung singkat ini menyebabkan ketidakseimbangan tegangan dan arus pada sistem [2]. Analisis gangguan hubung singkat merupakan alat penting untuk menentukan nilai arus hubung singkat dari perangkat proteksi

dan berbagai peralatan yang akan dipasang dalam sistem distribusi serta untuk koordinasi perangkat proteksi.

Telah diamati bahwa 80% kegagalan layanan terjadi karena adanya gangguan pada sistem distribusi. Terjadinya gangguan dapat mempengaruhi keandalan, keamanan, dan kualitas daya sistem. Sistem distribusi sendiri ialah sistem yang paling rumit dan menyumbang sebagian besar gangguan yang terjadi dalam sistem. Sistem distribusi pada umumnya tidak seimbang, dan biasanya pengaruh beban diabaikan selama analisis gangguan hubung singkat. Hal tersebut karena kompleksitas beban yang digunakan dalam sistem distribusi[3].

Dalam melakukan analisis gangguan hubung singkat diperlukan metode komputasi untuk menyelesaikan perhitungan arus gangguan hubung singkat. Metode penerimaan kesalahan umum atau *general fault admittance* merupakan metode komputasi untuk menyelesaikan perhitungan gangguan hubung singkat yang mencakup semua jenis gangguan dengan satu formula umum. Metode *general fault admittance* ini menyelesaikan perhitungan gangguan hubung singkat yang dilakukan dalam koordinat simetris. Sedangkan metode pendekatan klasik berbeda dalam cara perhitungan tegangan dan arus gangguan pada semua jenis gangguan hubung singkat [4].

Berdasarkan uraian diatas, pada penelitian ini akan membahas mengenai analisis perhitungan besarnya arus gangguan hubung singkat simetris dan tidak simetris dengan mempertimbangkan beban yang biasanya diabaikan sehingga menyebabkan ketidakakuratan dalam nilai arus hubung singkat yang dihitung. Menggunakan metode komputasi *general fault admittance* pada jaringan distribusi guna memperoleh hasil perhitungan yang efisien dan akurat.

## **1.2 Tujuan Penelitian**

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis nilai arus gangguan hubung singkat dengan mempertimbangkan beban pada sistem distribusi. Perhitungan arus

gangguan dilakukan menggunakan komputasi dengan metode *general fault admittance* yang mencakup semua jenis gangguan hubung singkat menggunakan satu formula umum.

### 1.3 Rumusan Masalah

Dalam menghitung arus gangguan hubung singkat dibutuhkan metode komputasi yang dapat menyelesaikan semua jenis gangguan hubung singkat menggunakan satu formula umum. Pada penelitian ini menggunakan metode komputasi *general fault admittance* untuk perhitungan arus gangguan hubung singkat disemua jenis gangguan. Dengan mempertimbangkan impedansi beban pada analisis gangguan hubung singkat saluran distribusi, yang biasanya diabaikan sehingga menyebabkan ketidakakuratan dalam nilai arus hubung singkat yang dihitung.

Proses komputasi perhitungan arus gangguan hubung singkat menggunakan pemrograman *python* dengan hasil yang berupa *magnitude* arus gangguan hubung singkat, nantinya hasil pemrograman *python* akan dibandingkan dengan hasil simulasi perangkat lunak yang dikembangkan oleh *Electric Power Research Institute* (EPRI) atau biasanya lebih dikenal dengan *OpenDSS (Distribution System Simulator)* sebagai *software* pembanding hasil simulasi program untuk memastikan keakuratan hasil komputasi.

### 1.4 Batasan Masalah

Pada penelitian ini hanya membahas mengenai analisis arus gangguan hubung singkat yang dimodelkan menggunakan metode *general fault admittance* dan mempertimbangkan beban dengan menambah impedansi urutan beban pada impedansi urutan bus pada perhitungan arus gangguan hubung singkat. Penelitian ini tidak melakukan analisis terhadap nilai tegangan sistem. Analisis hanya dilakukan pada titik gangguan saja dan tidak melakukan analisis terhadap titik yang tidak terganggu. Objek analisis penelitian ini yaitu pada sistem distribusi yang menyediakan layanan untuk beban 3 fasa, 2 fasa dan 1 fasa yang menyebabkan ketidakseimbangan.

*Software* pembanding yang digunakan yaitu hanya OpenDSS sebagai parameter untuk memastikan keakuratan hasil komputasi menggunakan metode *general fault admittance*. Dengan menggunakan OpenDSS akan memudahkan pemodelan saluran fasa tidak lengkap untuk dua fasa, dimana belum ada *software* lain yang bisa memodelkannya.

### **1.5 Manfaat Penelitian**

Melalui penelitian ini diharapkan mampu memberikan pemahaman mengenai perhitungan arus gangguan hubung singkat menggunakan metode *general fault admittance* yang menggunakan formula umum untuk menyelesaikan semua jenis gangguan hubung singkat baik simetris maupun tidak simetris dengan mempertimbangkan beban yang berguna untuk perhitungan yang lebih akurat dan realistis untuk keperluan desain dan pengaturan proteksi sistem. Diharapkan melalui penelitian ini dapat menjadi bahan belajar dan referensi bagi mahasiswa lain untuk mengembangkan penelitian selanjutnya.

### **1.6 Hipotesis**

Biasanya pengaruh beban diabaikan selama analisis hubung singkat yang menyebabkan ketidakakuratan dalam nilai arus hubung singkat yang dihitung dari referensi [1]. Pada referensi tersebut, arus beban dapat memberikan dampak terhadap sistem terutama saat terjadi gangguan. Referensi tersebut menganalisa langsung pengaruh arus beban terhadap arus gangguan sehingga tegangan, admitansi dan impedansi juga harus mempertimbangkan beban. Pada penelitian ini, dilakukan analisis gangguan hubung singkat dengan hanya mempertimbangkan impedansi beban yang akan dijumlahkan dengan nilai impedansi bus untuk mencari nilai arus gangguan di setiap fasa. Dengan memasukkan model beban dalam perhitungan, dapat mengatasi ketidakakuratan yang muncul ketika efek beban diabaikan sehingga nilai arus lebih realistis untuk perencanaan dan perlindungan sistem. Dengan menggunakan metode *general fault admittance* untuk menghitung besarnya arus gangguan hubung singkat yang



mampu mengakomodir semua jenis gangguan ke satu formula dengan mengubah-ubah parameter matriks admitansi urutan gangguan tergantung jenis gangguan hubung singkatnya.

## **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 pegangan, jurnal ilmiah maupun artikel di internet.

### **BAB III METODOLOGI PENELITIAN**

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

### **BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN**

Pada bab ini menjelaskan data hasil komputasi dan pembahasan seperti tujuan dari penelitian tugas akhir ini dengan memperhatikan batasan masalah penelitian.

### **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 sebagai referensi baru dalam memahami topik.

## **BAB II**

### **TINJAUAN PUSTAKA**

#### **2.1 Penelitian Terdahulu**

Melalui paper "*Method of Symmetrical Coordinates Applied to the Solution of Polyphase Networks*" (C.L. Fortescue, 1918) pertama kalinya analisis komponen simetris urutan digunakan sebagai metode penyelesaian jaringan yang memiliki fasa banyak [5]. Penggunaan komponen simetris urutan untuk gangguan hubung singkat dikembangkan melalui buku "*Electric Energy System Theory, an Introduction*" (Elgerd Olle I., 1971) [6]. Dengan dasar mengenai penggunaan komponen simetris urutan dari referensi sebelumnya, dikembangkan metode *general fault admittance* untuk menyelesaikan gangguan hubung singkat pada semua jenis gangguan hubung singkat seimbang menggunakan komponen simetris pada paper "*General Fault Admittance Method Solution of a Balanced Line to Line to Line to Ground Fault*" (Sakala J.D., 2016) [7]. Analisis gangguan umum menggunakan koordinat fasa diperkenalkan oleh paper "*Analysis of Faulted Power Systems in Three Phase Coordinates-A Generic Approach*" (Rajeev Kumar Gajbhiye, 2006), sebagai pengembangan metode yang efisien untuk analisis gangguan dalam sistem tiga fasa yang digunakan untuk kondisi tidak seimbang [8]. Penelitian mengenai analisis gangguan hubung singkat pada jaringan distribusi diperkenalkan melalui paper "*Short Circuit Analysis of IEEE Test Feeders*" (W.H. Kersting, 2012) yang melakukan uji pada data IEEE 13 Node dengan menggunakan komputasi RDAP (*Radial Distribution Analysis Program*) dan *Windmil* [9]. Kemudian paper tersebut dilanjutkan untuk mensimulasikan pengumpulan uji 13 Node, 34 Node, 37 Node, dan 123 Node menggunakan program computer OpenDSS dengan judul yaitu "*Matching the*

*IEEE Test Feeder Short Circuit Result*” (R.F.Arritt, 2012) [10]. Dalam analisis gangguan hubung singkat kontribusi beban diabaikan dan direpresentasikan sebagai komponen admitansi konstan beban pada *paper* “*Handling Three-Winding Transformers and Load in Short Circuit Analysis by the Admittance Summation Method*” (Todorovski, Mirko, 2003) [11]. Analisis hubung singkat dengan mempertimbangkan pengaruh beban oleh *paper* “*Unsymmetrical short-circuit analysis for distribution system considering loads*” (Mathur, Akhilesh, 2015) [12]. Studi gangguan hubung singkat sering kali mengabaikan arus beban karena arus hubung singkat yang mengalir dari generator jauh lebih besar, bagaimana pengaruh beban impedansi tidak seimbang terhadap arus hubung singkat pada *paper* “*The Effect of Unbalanced Impedance Loads on the Short-Circuit Current*” (Insu Kim, 2018) [13]. “*Short-Circuit Analysis Models for Unbalanced Inverter-Based Distributed Generation Source and Loads* (Insu Kim, 2019), merupakan kelanjutan dari *paper* sebelumnya [14]. Pada *paper* “*Estimation Method of Short Circuit Current Contribution of Inverter-Based Resources for Symmetrical Faults*” (Murillo, Cobe Vargas, 2023), pada *paper* tersebut dipaparkan bahwa arus gangguan hubung singkat dihitung dari kontribusi IBR (*Inverter Based Resources*) dengan menambahkan impedansi *inverter* dalam perhitungan arus gangguan hubung singkat untuk gangguan simetris [15].

Berdasarkan beberapa penelitian terdahulu tersebut, belum terdapat penelitian yang membahas mengenai analisis gangguan hubung singkat dalam koordinat simetris urutan menggunakan metode *general fault admittance* pada jaringan distribusi dengan mempertimbangkan impedansi urutan beban. Oleh karena itu, penelitian ini membahas tentang “Analisis Gangguan Hubung Singkat Pada Sistem Distribusi Dengan Mempertimbangkan Impedansi Beban Menggunakan Metode *General Fault Admittance*”. Dengan menggunakan metode *general fault admittance* perhitungan arus gangguan hubung singkat dilakukan dengan mengubah-ubah parameter matriks admitansi urutan gangguan tergantung dari 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 Komponen Sistem Distribusi

### 2.2.1 Model Saluran

Saluran merupakan salah satu komponen yang ada dalam sistem distribusi, dalam memodelkan saluran digunakan sumber referensi dari buku yang berjudul “*Distribution System Modeling and Analysis with Matlab and Windmil Fifth Edition*”[16]. Dari buku tersebut pemodelan impedansi saluran dihitung berdasarkan nilai resistansi dan reaktansi konduktor baik impedansi sendiri dan bersama akibat pengaruh total medan magnet yang mengelilingi sebuah 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 ( $ft$ )

$\rho$  adalah resistansi tanah ( $\Omega m$ )

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

maka, pers. (2.1) dan pers. (2.2) digunakan untuk menghitung matriks impedansi *primitive*. Contoh untuk saluran distribusi yang terdiri dari empat konduktor dengan tiga fasa  $a-b-c$  dengan satu netral dinyatakan dalam bentuk matriks impedansi *primitive* berukuran  $4 \times 4$  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. Dengan menggunakan pers. (2.3) sebagai bentuk awal matriks impedansi *primitive*, matriks akan disederhanakan dengan formulasi modifikasi persamaan Kron.

$$[\hat{\mathbf{z}}_{primitive}] = \begin{bmatrix} [\hat{z}_{ij}] & [\hat{z}_{in}] \\ [\hat{z}_{nj}] & [\hat{z}_{nn}] \end{bmatrix} \quad (2.6)$$

$$z_{ij} = \hat{z}_{ij} - [\hat{z}_{in}][\hat{z}_{nn}]^{-1}[\hat{z}_{jn}] \quad (2.7)$$

maka nilai impedansi saluran tiga fasa  $a$ - $b$ - $c$  dinyatakan dengan matriks impedansi  $abc$  ( $\mathbf{Z}_{abc}$ ) berukuran 3x3 sebagai berikut,

$$\mathbf{Z}_{abc} = \begin{bmatrix} Z_{aa} & Z_{ab} & Z_{ac} \\ Z_{ba} & Z_{bb} & Z_{bc} \\ Z_{cb} & Z_{cb} & Z_{cc} \end{bmatrix} \quad (2.8)$$

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

$$\mathbf{z}_{abc} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & z_{bb} & z_{bc} \\ 0 & z_{cb} & z_{cc} \end{bmatrix} \quad (2.9)$$

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

$$\mathbf{z}_{abc} = \begin{bmatrix} z_{aa} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (2.10)$$

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

$$\mathbf{z}_{012}^{primitive} = [\mathbf{A}]^{-1}[\mathbf{z}_{abc}][\mathbf{A}] \quad (2.11)$$

dengan matriks  $\mathbf{A}^{-1}$  adalah

$$\mathbf{A}^{-1} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \quad (2.12)$$

dan matriks  $\mathbf{A}$  adalah

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \quad (2.13)$$

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

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

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

$$\mathbf{z}_{012}^{primitive} = \begin{bmatrix} \hat{z}_{00} & \hat{z}_{01} & \hat{z}_{02} \\ \hat{z}_{10} & \hat{z}_{11} & \hat{z}_{12} \\ \hat{z}_{20} & \hat{z}_{21} & \hat{z}_{22} \end{bmatrix} \quad (2.14)$$

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  $2 \times 2$  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 Saluran
<b>0-0</b>	$\mathbf{y}_{00}^{primitive} = \begin{bmatrix} 1/\hat{z}_{00hh} & -1/\hat{z}_{00hk} \\ -1/\hat{z}_{00kh} & 1/\hat{z}_{00kk} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \hat{y}_{00hh} & -\hat{y}_{00hk} \\ -\hat{y}_{00kh} & \hat{y}_{00kk} \end{bmatrix}$
<b>1-1</b>	$\mathbf{y}_{11}^{primitive} = \begin{bmatrix} 1/\hat{z}_{11hh} & -1/\hat{z}_{11hk} \\ -1/\hat{z}_{11kh} & 1/\hat{z}_{11kk} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \hat{y}_{11hh} & -\hat{y}_{11hk} \\ -\hat{y}_{11kh} & \hat{y}_{11kk} \end{bmatrix}$
<b>2-2</b>	$\mathbf{y}_{22}^{primitive} = \begin{bmatrix} 1/\hat{z}_{22hh} & -1/\hat{z}_{22hk} \\ -1/\hat{z}_{22kh} & 1/\hat{z}_{22kk} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \hat{y}_{22hh} & -\hat{y}_{22hk} \\ -\hat{y}_{22kh} & \hat{y}_{22kk} \end{bmatrix}$
<b>0-1</b>	$\mathbf{y}_{01}^{primitive} = \begin{bmatrix} 1/\hat{z}_{01hh} & -1/\hat{z}_{01hk} \\ -1/\hat{z}_{01kh} & 1/\hat{z}_{01kk} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \hat{y}_{01hh} & -\hat{y}_{01hk} \\ -\hat{y}_{01kh} & \hat{y}_{01kk} \end{bmatrix}$
<b>1-0</b>	$\mathbf{y}_{10}^{primitive} = \begin{bmatrix} 1/\hat{z}_{10hh} & -1/\hat{z}_{10hk} \\ -1/\hat{z}_{10kh} & 1/\hat{z}_{10kk} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \hat{y}_{10hh} & -\hat{y}_{10hk} \\ -\hat{y}_{10kh} & \hat{y}_{10kk} \end{bmatrix}$
<b>0-2</b>	$\mathbf{y}_{02}^{primitive} = \begin{bmatrix} 1/\hat{z}_{02hh} & -1/\hat{z}_{02hk} \\ -1/\hat{z}_{02kh} & 1/\hat{z}_{02kk} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \hat{y}_{02hh} & -\hat{y}_{02hk} \\ -\hat{y}_{02kh} & \hat{y}_{02kk} \end{bmatrix}$
<b>2-0</b>	$\mathbf{y}_{20}^{primitive} = \begin{bmatrix} 1/\hat{z}_{20hh} & -1/\hat{z}_{20hk} \\ -1/\hat{z}_{20kh} & 1/\hat{z}_{20kk} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \hat{y}_{20hh} & -\hat{y}_{20hk} \\ -\hat{y}_{20kh} & \hat{y}_{20kk} \end{bmatrix}$
<b>1-2</b>	$\mathbf{y}_{12}^{primitive} = \begin{bmatrix} 1/\hat{z}_{12hh} & -1/\hat{z}_{12hk} \\ -1/\hat{z}_{12kh} & 1/\hat{z}_{12kk} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \hat{y}_{12hh} & -\hat{y}_{12hk} \\ -\hat{y}_{12kh} & \hat{y}_{12kk} \end{bmatrix}$

### 2.2.2 Model Transformator

Model transformator yang digunakan bersumber dari *paper* yang berjudul “*Transformer Modeling for Three-Phase Distribution Network Analysis*”[17]. 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

$$\mathbf{z}_{012}^{primitive} = \begin{bmatrix} \hat{z}_{00_{trf}} & 0 & 0 \\ 0 & \hat{z}_{11_{trf}} & 0 \\ 0 & 0 & \hat{z}_{22_{trf}} \end{bmatrix} \quad (2.15)$$

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,

$$\hat{y}_{00} = \frac{1}{\hat{z}_{00_{trf}}} \quad (2.16. a)$$

$$\hat{y}_{11} = \frac{1}{\hat{z}_{11_{trf}}} \quad (2.16. b)$$

$$\hat{y}_{22} = \frac{1}{\hat{z}_{22_{trf}}} \quad (2.16. c)$$

Untuk mengakomodir *phase shift* transformator,

$$\bar{t} = t e^{j\alpha} \quad (2.17)$$

dengan  $t$  merupakan rasio *tap*, sedangkan  $\alpha$  adalah

$$\alpha = n \times 30^\circ \quad (2.18)$$

dengan  $n$  adalah jumlah *clock*.

Matriks admitansi *primitive* urutan adalah matriks berukuran 2 x 2 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 Transformator
<b>0-0</b>	$y_{00}^{primitive} = \begin{bmatrix} \hat{y}_{00hh} & -\frac{1}{t}\hat{y}_{00hk} \\ -\frac{1}{t}\hat{y}_{00hk} & \frac{1}{t^2}\hat{y}_{00kk} \end{bmatrix}$
<b>1-1</b>	$y_{11}^{primitive} = \begin{bmatrix} \hat{y}_{11hh} & -\frac{1}{\bar{t}}\hat{y}_{11hk} \\ -\frac{1}{\bar{t}^*}\hat{y}_{11kh} & \frac{1}{\bar{t}\bar{t}^*}\hat{y}_{11kk} \end{bmatrix}$
<b>2-2</b>	$y_{22}^{primitive} = \begin{bmatrix} \hat{y}_{22hh} & -\frac{1}{\bar{t}^*}\hat{y}_{22hk} \\ -\frac{1}{\bar{t}}\hat{y}_{22kh} & \frac{1}{\bar{t}\bar{t}^*}\hat{y}_{22kk} \end{bmatrix}$

### 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*” [18]. 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  $\mathbf{z}_{012}^{primitive}$  adalah

$$\mathbf{z}_{012}^{primitive} = \begin{bmatrix} \hat{z}_{00reg} & 0 & 0 \\ 0 & \hat{z}_{11reg} & 0 \\ 0 & 0 & \hat{z}_{22reg} \end{bmatrix} \quad (2.19)$$

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,

$$\hat{y}_{00} = \frac{1}{\hat{z}_{00reg}} \quad (2.20. a)$$

$$\hat{y}_{11} = \frac{1}{\hat{z}_{11reg}} \quad (2.20. b)$$

$$\hat{y}_{22} = \frac{1}{\hat{z}_{22reg}} \quad (2.20. c)$$

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 Regulator Tegangan	
	Primer	Sekunder
<b>0-0</b>	$\mathbf{y}_{00}^{primitive} = \begin{bmatrix} \frac{1}{\mathbf{a}_R^2} \hat{y}_{00hh} & -\frac{1}{\mathbf{a}_R} \hat{y}_{00hk} \\ -\frac{1}{\mathbf{a}_R} \hat{y}_{00hk} & \hat{y}_{00kk} \end{bmatrix}$	$\mathbf{y}_{00}^{primitive} = \begin{bmatrix} \hat{y}_{00hh} & -\frac{1}{\mathbf{a}_R} \hat{y}_{00hk} \\ -\frac{1}{\mathbf{a}_R} \hat{y}_{00hk} & \frac{1}{\mathbf{a}_R^2} \hat{y}_{00kk} \end{bmatrix}$
<b>1-1</b>	$\mathbf{y}_{11}^{primitive} = \begin{bmatrix} \frac{1}{\mathbf{a}_R^2} \hat{y}_{11hh} & -\frac{1}{\mathbf{a}_R} \hat{y}_{11hk} \\ -\frac{1}{\mathbf{a}_R} \hat{y}_{11hk} & \hat{y}_{11kk} \end{bmatrix}$	$\mathbf{y}_{11}^{primitive} = \begin{bmatrix} \hat{y}_{11hh} & -\frac{1}{\mathbf{a}_R} \hat{y}_{11hk} \\ -\frac{1}{\mathbf{a}_R} \hat{y}_{11hk} & \frac{1}{\mathbf{a}_R^2} \hat{y}_{11kk} \end{bmatrix}$
<b>2-2</b>	$\mathbf{y}_{22}^{primitive} = \begin{bmatrix} \frac{1}{\mathbf{a}_R^2} \hat{y}_{22hh} & -\frac{1}{\mathbf{a}_R} \hat{y}_{22hk} \\ -\frac{1}{\mathbf{a}_R} \hat{y}_{22hk} & \hat{y}_{22kk} \end{bmatrix}$	$\mathbf{y}_{22}^{primitive} = \begin{bmatrix} \hat{y}_{22hh} & -\frac{1}{\mathbf{a}_R} \hat{y}_{22hk} \\ -\frac{1}{\mathbf{a}_R} \hat{y}_{22hk} & \frac{1}{\mathbf{a}_R^2} \hat{y}_{22kk} \end{bmatrix}$

### 2.2.4 Model Beban

Model beban yang digunakan bersumber dari *paper* yang berjudul “*A Comparative of constant impedance and constant power loads in a distribution network*” [19], dimana dalam *paper* ini dijelaskan pemodelan beban impedansi *constant*, karena jaringan distribusi menggunakan bentuk radial menyebabkan beban dihubungkan melintasi transformator distribusi, dimana ketika jumlah beban meningkat akan mengakibatkan profil tegangannya buruk di ujung penerima dan mengurangi penyaluran daya. Dalam *paper* terdapat dua jenis beban yaitu beban impedansi *constant* dan beban daya *constant*. Jenis beban yang akan dipertimbangkan yaitu beban impedansi *constant*, yang mewakili beban rumah tangga yang umumnya terdiri dari pemanas, penerangan, dan peralatan rumah lainnya. Beban impedansi *constant* yaitu sebagai berikut :

$$z = \frac{V}{I} \quad (2.21)$$

dimana,

$$I = \frac{S}{V} \quad (2.22)$$

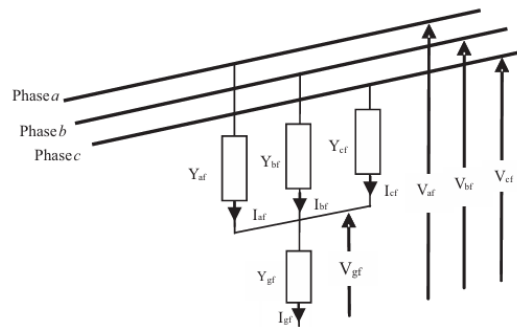
sehingga jika pers. (2.22) disubstitusi ke pers. (2.21) menjadi sebagai berikut,

$$z = \frac{V^2}{S} \quad (2.23)$$

dengan menggunakan pers. (2.23) beban dapat dimodelkan sebagai *constant impedance* atau impedansi konstan untuk masing masing bus yang memiliki beban.

### 2.3 Metode *General Fault Admittance*

Metode *General Fault Admittance* adalah 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*” [7]. Metode tersebut mampu menangani semua bentuk gangguan hubung singkat dalam satu formula yang umum, menjadikan proses komputasi lebih mudah. Perhitungan arus gangguan akibat hubung singkat dapat dilakukan dengan memodifikasi parameter matriks admittansi urutan, tergantung pada jenis hubung singkat yang terjadi.



Gambar 2. 1 Representasi *General Fault Admittance* 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,

$$\bar{V}_a^f = Z_a^f \cdot \bar{I}_a^f + Z_g^f (\bar{I}_a^f + \bar{I}_b^f + \bar{I}_c^f) \quad (2.24. a)$$

$$\bar{V}_b^f = Z_b^f \cdot \bar{I}_b^f + Z_g^f (\bar{I}_a^f + \bar{I}_b^f + \bar{I}_c^f) \quad (2.24. b)$$

$$\bar{V}_c^f = Z_c^f \cdot \bar{I}_c^f + Z_g^f (\bar{I}_a^f + \bar{I}_b^f + \bar{I}_c^f) \quad (2.24. c)$$

Pers. (2.24.a), pers. (2.24.b) dan pers. (2.24.c) dapat dinyatakan kedalam bentuk matriks sebagai berikut:

$$\begin{bmatrix} \bar{V}_a^f \\ \bar{V}_b^f \\ \bar{V}_c^f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_a^f + Z_g^f & Z_g^f & Z_g^f \\ Z_g^f & Z_b^f + Z_g^f & Z_g^f \\ Z_g^f & Z_g^f & Z_c^f + Z_g^f \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \bar{I}_a^f \\ \bar{I}_b^f \\ \bar{I}_c^f \end{bmatrix} \quad (2.25)$$

Pers. (2.25) dapat juga dinyatakan dalam bentuk persamaan vektor berikut

$$\bar{V}_{abc}^f = \bar{Z}_{abc}^f \cdot \bar{I}_{abc}^f \quad (2.26)$$

$$[A]^{-1} \cdot [A] \cdot \bar{V}_{abc}^f = [A]^{-1} \cdot \bar{Z}_{abc}^f \cdot [A] \cdot \bar{I}_{abc}^f \quad (2.27)$$

Metode *General Fault Admittance* dilakukan dalam domain urutan, sehingga pers. (2.27) merupakan langkah untuk transformasi dari bentuk fasa menjadi bentuk urutan. Sehingga diperoleh,

$$\bar{V}_{012}^f = \bar{Z}_{012}^f \cdot \bar{I}_{012}^f \quad (2.28)$$

dengan,

$$\bar{Z}_{012}^f = [A]^{-1} \cdot \bar{Z}_{abc}^f \cdot [A] \quad (2.29)$$

Dengan meng-*invers*-kan ( $\bar{Z}_{012}^f$ ) pada pers. (2.29) maka diperoleh matriks admitansi urutan gangguan sebagai berikut,

$$\bar{Y}_{012}^f = [\bar{Z}_{012}^f]^{-1} \quad (2.30)$$

dengan matriks *general fault admittance* matriks  $\bar{Y}_{012}^f$  adalah

$$\bar{Y}_{012}^f = \left( \frac{1}{Y_{af} + Y_{bf} + Y_{cf} + Y_{gf}} \right) \times \begin{bmatrix} Y_{fs11} & Y_{fs12} & Y_{fs31} \\ Y_{fs21} & Y_{fs22} & Y_{fs23} \\ Y_{fs31} & Y_{fs32} & Y_{fs33} \end{bmatrix} \quad (2.31)$$

dengan

$$Y_{fs11} = \frac{1}{3} Y_{gf} (Y_{af} + Y_{bf} + Y_{cf}) \quad (3.32. a)$$

$$Y_{fs22} = Y_{fs33} = \frac{1}{3} Y_{gf} (Y_{af} + Y_{bf} + Y_{cf}) + Y_{af} Y_{bf} + Y_{af} Y_{cf} + Y_{bf} Y_{cf} \quad (3.32. b)$$

$$Y_{fs12} = Y_{fs31} = \frac{1}{3}Y_{gf}(Y_{af} + a^2Y_{bf} + aY_{cf}) \quad (3.32. c)$$

$$Y_{fs21} = Y_{fs13} = \frac{1}{3}Y_{gf}(Y_{af} + aY_{bf} + a^2Y_{cf}) \quad (3.32. d)$$

$$Y_{fs23} = \frac{1}{3}Y_{gf}(Y_{af} + a^2Y_{bf} + aY_{cf}) - (aY_{af}Y_{bf} + a^2Y_{af}Y_{cf} + Y_{bf}Y_{cf}) \quad (3.32. e)$$

$$Y_{fs32} = \frac{1}{3}Y_{gf}(Y_{af} + aY_{bf} + a^2Y_{cf}) - (a^2Y_{af}Y_{bf} + aY_{af}Y_{cf} + Y_{bf}Y_{cf}) \quad (3.32. f)$$

Matriks admitansi urutan gangguan ( $\bar{Y}_{012}^f$ ) atau  $Y_{fs}$  diatas akan digunakan sebagai parameter penentu jenis hubung singkat. Perhitungan arus hubung singkat akan dijelaskan pada bab selanjutnya.

## BAB III METODOLOGI PENELITIAN

### 3.1 Waktu dan Tempat

Penelitian tugas akhir ini dilaksanakan sejak bulan Agustus 2024 hingga selesai pada bulan Januari 2025, bertempat di Laboratorium Sistem Tenaga Listrik (STL) Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Lampung. Adapun jadwal penelitian ditunjukkan pada Tabel 3.1 sebagai berikut.

Tabel 3. 1 Jadwal Penelitian

Agenda Kegiatan	Bulan					
	Agust	Sept	Okt	Nov	Des	Jan
Studi Literatur dan Studi Bimbingan						
Pengumpulan Data dan 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 yaitu :  
*Processor Intel ® Core i5 12<sup>th</sup> Gen, RAM 8 GB, system type 64-bit Windows 10,*



untuk mendukung proses komputasi menggunakan *software* Visual Studio Code versi 1.92.2 sebagai *editor* dan *compiler*, *software python* versi 3.12.5 sebagai bahasa pemrograman yang digunakan dengan *library-library* untuk mendukung proses komputasi yaitu *numpy*, *scipy*, *matplotlib*, dan *pandas*. *Software* OpenDSS sebagai *software* pembanding hasil analisis gangguan hubung singkat sehingga dapat memastikan keakuratan hasil. Serta data yang diolah yaitu menggunakan kasus IEEE PES (*Power and Energy Society*) *Distribution Test Feeder* sebagai *input data*.

### 3.3 Metodologi Penelitian

Penelitian tugas akhir ini dilakukan dengan langkah-langkah sebagai berikut;

1. Studi Literatur

Pada tahap ini, penulis mempelajari dan mengumpulkan serta mengkaji literatur yang berkaitan dengan penelitian tugas akhir. Literatur bersumber dari buku dan *paper* yang sesuai dengan topik seperti memahami metode – metode yang digunakan untuk analisis gangguan hubung singkat, memahami cara memodelkan komponen – komponen sistem distribusi baik dalam domain fasa maupun urutan. Mempelajari persamaan-persamaan yang digunakan untuk keperluan tugas akhir dan gambaran hasil mengenai persamaan tersebut. Yang terpenting dari semuanya yaitu memahami konsep dari setiap permasalahan yang diangkat di sumber literatur.

2. Studi Bimbingan

Pada tahap ini, penulis melakukan diskusi secara berkala dengan dosen pembimbing untuk menyelesaikan permasalahan yang ditemukan dari studi literatur untuk menyelesaikan analisis gangguan hubung singkat dimulai dari pemodelan, metode komputasi, implementasi program, hingga mendapatkan gambaran mengenai hasil apakah sesuai dengan teori, sehingga penulis dapat memperoleh pengetahuan lebih dan dapat menyelesaikan penelitian tugas akhir ini.

3. Pengumpulan dan Pengolahan Data

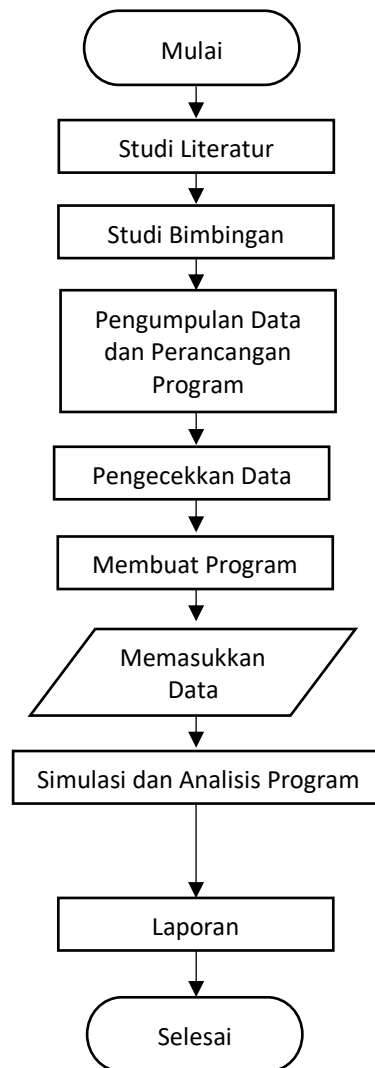
Pada tahap ini, penulis melakukan pengumpulan data yang berasal dari IEEE PES (*Power and Energy Society*) *Distribution Test Feeder*, lalu mengolah data tersebut untuk dilakukan komputasi analisis gangguan hubung singkat menggunakan bahasa pemrograman *Python*.

#### 4. Pembuatan Laporan

Pada tahap ini, penulis menjelaskan mengenai rencana penelitian dalam bentuk laporan proposal dan laporan hasil yang dituangkan kedalam sebuah laporan tugas akhir penelitian atau skripsi. Laporan ini digunakan sebagai bentuk tanggung jawab penulis terhadap syarat kelulusan yang berupa tugas akhir penelitian.

### 3.4 Diagram Pelaksanaan Penelitian

Pada Gambar 3.1 berikut merupakan tahap – tahap pelaksanaan kegiatan penelitian tugas akhir.



Gambar 3. 1 Diagram Alir Penelitian Tugas Akhir.

### 3.5 Analisis Gangguan Hubung Singkat Menggunakan Metode *General Fault Admittance*

#### 3.5.1 Menghitung Matriks Impedansi Urutan

##### 3.5.1.1 Menghitung 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 ( $\bar{Z}_{012}$ ) atau ( $\bar{Z}_{012bus}$ ) berukuran  $3n \times 3n$  (dimana  $n$  merupakan jumlah *bus*) sebagai berikut,

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

### 3.5.1.2 Menghitung Matriks Impedansi Urutan Beban

Matriks Impedansi urutan sistem diperoleh dengan meng-*invers*-kan masing-masing matriks admitansi urutan sistem, sehingga diperoleh matriks impedansi urutan sistem ( $\bar{Z}_{012}$ ) berukuran  $3n \times 3n$  (dimana  $n$  merupakan jumlah *bus*). Sedangkan matriks impedansi urutan beban diperoleh dengan langkah awal yaitu dengan mencari matriks impedansi urutan fasa terlebih dahulu menggunakan pers. (2.23), ( $\bar{Z}_{abc}$ ) yaitu pembagian antara  $(\bar{V}_{mag})^2$  untuk setiap fasa dengan ( $S_{load}$ ) untuk setiap fasa dimana nilai  $(\bar{V}_{mag})$  dan ( $S_{load}$ ) didapatkan dari data beban. Matriks Impedansi Urutan Beban hanya dihitung pada *bus* yang memiliki beban.

$$(\bar{Z}_{abc}) = \frac{(\bar{V}_{mag}) \times (\bar{V}_{mag})}{(S_{load})} \quad (3.3)$$

Setelah nilai ( $\bar{Z}_{abc}$ ) diperoleh maka langkah selanjutnya yaitu dengan mengubah nilai impedansi yang masih dalam domain fasa ke domain urutan, dengan mengalikan ( $\bar{Z}_{abc}$ ) dan matriks  $A^{-1}$  dikali matriks  $A$ . Sehingga nanti akan diperoleh matriks ( $\bar{Z}_{012load}$ ) untuk bus yang memiliki beban dengan ukuran  $3 \times 3$  untuk masing-masing *bus*. Nantinya matriks impedansi urutan beban akan ditambahkan dengan matriks impedansi urutan sistem dan digunakan sebagai perhitungan dalam menghitung arus gangguan hubung singkat,

$$(\bar{Z}_{012bus}) + (\bar{Z}_{012load}) = (\bar{Z}_{012new}) \quad (3.4)$$

dimana ( $\bar{Z}_{012bus}$ ) merupakan impedansi urutan sistem yang berukuran  $3n \times 3n$  (dimana  $n$  merupakan jumlah *bus*), dan matriks ( $\bar{Z}_{012load}$ ) berukuran  $3 \times 3$  untuk masing – masing *bus* yang memiliki beban.

### 3.5.2 Menghitung 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 ( $\bar{Y}_{012}^f$ ) atau  $Y_{fs}$ . Terdapat beberapa 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 Menghitung Arus Gangguan Hubung Singkat

Besarnya tegangan sistem setelah gangguan diumpamakan dengan ( $\bar{V}_{abc,i}^f$ ) sehingga menjadi,

$$\bar{V}_{abc,i}^f = \bar{Z}_{abc}^f \cdot \bar{I}_{abc,i}^f \quad (3.5)$$

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

Untuk memperoleh tegangan urutan setelah gangguan ( $\bar{V}_{012,i}^f$ ) adalah dengan mengalikan tegangan fasa dengan komponen simetris, dimana komponen simetris sebagaimana pada pers. (2.12) dan pers. (2.13), maka besarnya tegangan urutan setelah gangguan ( $\bar{V}_{012,i}^f$ ) adalah dengan menggunakan pers. (3.5),

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

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

sehingga,

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

dengan,

$$\bar{Z}_{012}^f = [A]^{-1} \cdot \bar{Z}_{abc}^f \cdot [A] \quad (3.9)$$

untuk menghitung besarnya arus urutan gangguan ( $\bar{I}_{012,i}^f$ ), adalah dengan meng-invers-kan  $\bar{Z}_{012}^f$  pada pers. (3.8)

$$\bar{I}_{012,i}^f = [\bar{Z}_{012}^f]^{-1} \cdot \bar{V}_{012,i}^f \quad (3.10)$$

$$\bar{I}_{012,i}^f = \bar{Y}_{012}^f \cdot \bar{V}_{012,i}^f \quad (3.11)$$

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

$$\bar{V}_{012,i}^f = \bar{V}_{012,i}^0 + \Delta \bar{V}_{012,i}^f \quad (3.12)$$

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



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

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 *new* ( $\bar{Z}_{012new} = \bar{Z}_{012bus} + \bar{Z}_{012load}$ ) 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. (3.11) ke pers. (3.14) diperoleh,

$$\bar{V}_{012,i}^f = \bar{V}_{012,i}^0 - \bar{Z}_{012new} \cdot \bar{Y}_{012}^f \cdot \bar{V}_{012,i}^f \quad (3.15)$$

$$\bar{V}_{012,i}^f + \bar{Z}_{012new} \cdot \bar{Y}_{012}^f \cdot \bar{V}_{012,i}^f = \bar{V}_{012,i}^0 \quad (3.16)$$

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

$$\bar{V}_{012,i}^f = [\mathbf{1} + \bar{Z}_{012new} \cdot \bar{Y}_{012}^f]^{-1} \cdot \bar{V}_{012,i}^0 \quad (3.18)$$

dari pers. (3.18) diperoleh persamaan untuk menentukan tegangan urutan sistem setelah gangguan pada bus  $i$  dengan  $\mathbf{1}$  merupakan matriks identitas berukuran  $3 \times 3$ . Dengan mensubstitusikan pers. (3.18) ke pers. (3.11) diperoleh

$$\bar{I}_{012,i}^f = \bar{Y}_{012}^f \cdot [\mathbf{1} + \bar{Z}_{012new} \cdot \bar{Y}_{012}^f]^{-1} \cdot \bar{V}_{012,i}^0 \quad (3.19)$$

Berdasarkan pers. (3.19) dapat dihitung nilai arus urutan gangguan dengan mempertimbangkan beban. 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. (2.13), sehingga diperoleh

$$\bar{I}_{abc,i}^f = A \cdot \bar{I}_{012,i}^f \quad (3.20)$$

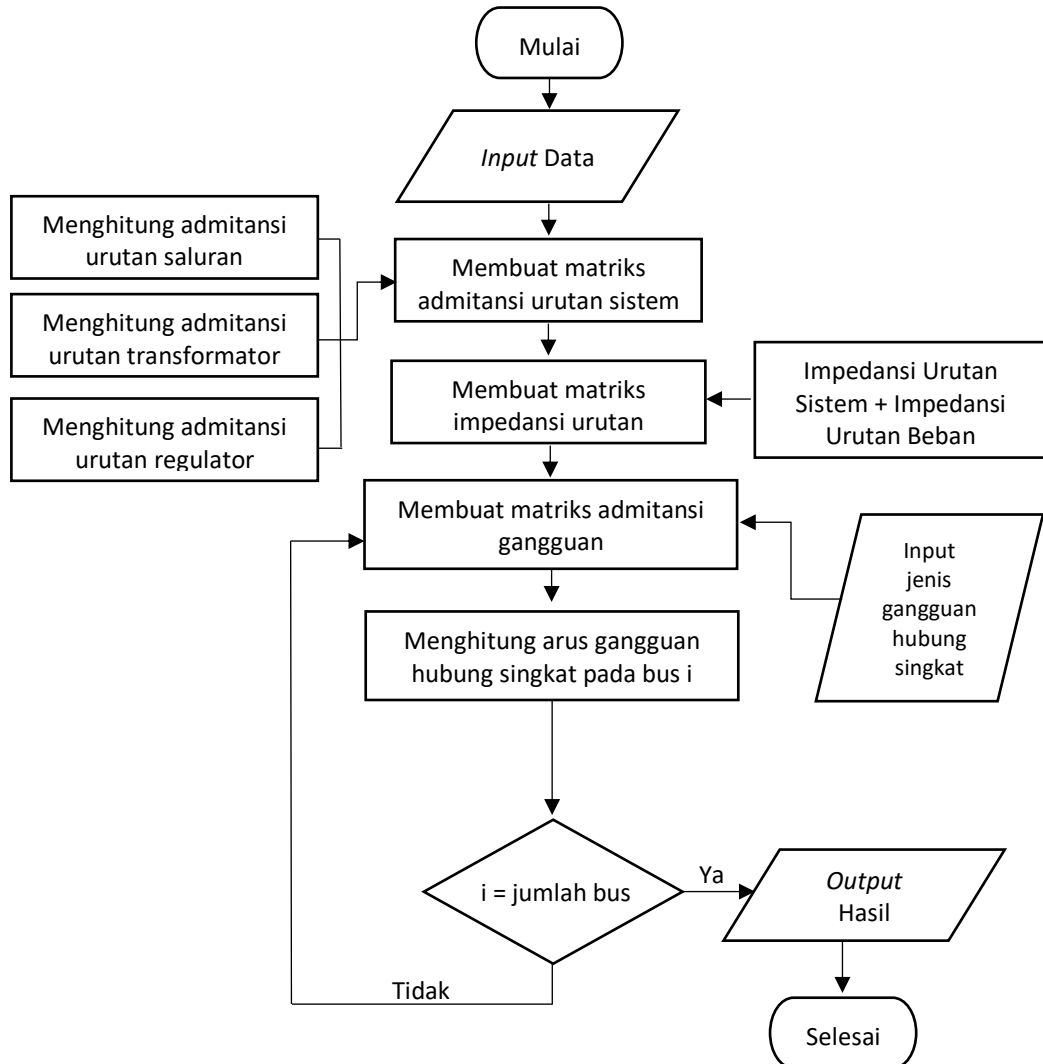
### 3.6 Proses Komputasi

Berikut adalah proses komputasi dari program yang akan 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 dengan langkah awal 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  $(\bar{Z}_{012bus})$  berukuran  $3n \times 3n$ , lalu dijumlahkan dengan matriks impedansi urutan beban  $(\bar{Z}_{012load})$  berukuran  $3 \times 3$  untuk bus yang memiliki beban, sehingga diperoleh matriks impedansi urutan yang baru  $(\bar{Z}_{012new})$ .
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. (3.19) pada bus  $i$ .
6. Menampilkan hasil komputasi dalam bentuk tabel.

### 3.7 Diagram Alir Komputasi Gangguan Hubung Singkat

Pada bagian ini akan diperlihatkan diagram alir komputasi gangguan hubung singkat dalam domain urutan dengan mempertimbangkan beban menggunakan metode *general fault admittance*. Tahap-tahap komputasi tersebut diperlihatkan pada Gambar 3.2 berikut.



Gambar 3. 2 Diagram Alir Komputasi Gangguan Hubung Singkat Dalam Domain Urutan dengan Mempertimbangkan Beban Menggunakan Metode *General Fault Admittance*

## BAB V PENUTUP

### 5.1 Kesimpulan

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

1. Metode *general fault admittance* dapat menghitung arus gangguan hubung singkat dengan mengakomodir semua jenis gangguan hubung singkat kedalam satu formula sehingga mempermudah proses komputasi.
2. Analisis gangguan hubung singkat dengan mempertimbangkan beban memberikan hasil arus gangguan yang lebih akurat dibandingkan perhitungan tanpa mempertimbangkan beban sehingga sehingga *setting* sistem proteksi lebih sensitif. Selisih nilai *magnitude* arus gangguan hubung singkat hasil komputasi antara metode *general fault admittance* dengan program OpenDSS tidak lebih dari  $3.0 \times 10^{-4} p.u.$
3. Selisih terbesar nilai arus gangguan hubung singkat setelah mempertimbangkan beban yaitu 3.889 *Ampere* untuk 13 *Node*, 228 *Ampere* untuk 34 *Node*, dan 6.477 *Ampere* untuk 123 *Node*, hal tersebut karena beberapa faktor utama yang berkaitan dengan konfigurasi jaringan, karakteristik beban, dan distribusi impedansi dalam sistem.

## 5.2 Saran

Adapun saran yang diberikan penulis untuk penelitian berikutnya yaitu:

1. Menggabungkan dua program besar yang digunakan dalam penelitian ini yaitu program *Load flow* dan *short circuit* sehingga memudahkan dalam melakukan analisis gangguan hubung singkat.
2. Merubah input data program secara otomatis dengan mengembangkan metode *general fault admittance* yang dapat diaplikasikan pada studi kestabilan transien.

## DAFTAR PUSTAKA

- [1] A. Mathur, V. Pant, and B. Das, “Unsymmetrical short-circuit analysis for distribution system considering loads,” *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, vol. 70, pp. 27–38, 2015, doi: 10.1016/j.ijepes.2015.02.003.
- [2] H. Saadat, *Power System Analysis*, 2nd ed. New York, 2004.
- [3] I. Kim, “Short-Circuit Analysis Models for Unbalanced Inverter-Based Distributed Generation Sources and Loads,” *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 34, no. 5, pp. 3515–3526, Sep. 2019, doi: 10.1109/TPWRS.2019.2903552.
- [4] J. D. Sakala and J. S. J. Daka, “General Fault Admittance Method Solution of a Line-to-Line Fault,” 2013.
- [5] C. L. Fortescue, “METHOD OF SYMMETRICAL CO-ORDINATES APPLIED TO THE SOLUTION OF POLYPHASE NETWORKS,” 1918.
- [6] O. I. Elgerd, *Electric Energy System Theory, an Introduction*. 1971.
- [7] J. D. Sakala and J. S. J. Daka, “General fault admittance method solution of a balanced line to line to line to ground fault,” *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, vol. 80, pp. 46–51, Sep. 2016, doi: 10.1016/j.ijepes.2015.11.066.
- [8] R. Kumar Gajbhiye, P. Kulkarni, and S. A. Soman, “Analysis of Faulted Power Systems in Three Phase Coordinates-A Generic Approach,” 2006.
- [9] W. H. Kersting, *Short Circuit Analysis of IEEE Test Feeders*. [IEEE], 2012.
- [10] R. F. Arritt, *Matching the IEEE Test Feeder Short Circuit Results*. [IEEE], 2012.
- [11] M. Todorovski and D. Rajcic, “Handling three-winding transformers and loads in short circuit analysis by the admittance summation method,” *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 18, no. 3, pp. 993–1000, Aug. 2003, doi: 10.1109/TPWRS.2003.814850

- [12] A. Mathur, V. Pant, and B. Das, “Unsymmetrical short-circuit analysis for distribution system considering loads,” *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, vol. 70, pp. 27–38, 2015, doi: 10.1016/j.ijepes.2015.02.003.
- [13] I. Kim, “The effect of unbalanced impedance loads on the short-circuit current,” *Energies (Basel)*, vol. 11, no. 6, Jun. 2018, doi: 10.3390/en11061447.
- [14] I. Kim, “Short-Circuit Analysis Models for Unbalanced Inverter-Based Distributed Generation Sources and Loads,” *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 34, no. 5, pp. 3515–3526, Sep. 2019, doi: 10.1109/TPWRS.2019.2903552.
- [15] M. C. Vargas, O. E. Batista, and Y. Yang, “Estimation Method of Short-Circuit Current Contribution of Inverter-Based Resources for Symmetrical Faults,” *Energies (Basel)*, vol. 16, no. 7, Apr. 2023, doi: 10.3390/en16073130.
- [16] W. H. Kersting, “Distribution System Modeling and Analysis, 5 th ed.”
- [17] I. Džafić, R. A. Jabr, and H. T. Neisius, “Transformer Modeling for Three-Phase Distribution Network Analysis,” *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 30, no. 5, pp. 2604–2611, Sep. 2015, doi: 10.1109/TPWRS.2014.2360812.
- [18] S. Mancheol, *Nodal Admittance Modeling of Three-phase Step-Voltage Regulators and their Applications*. [IEEE], 2013.
- [19] Ramya and R. Joseph, “A comparative analysis of constant impedance and constant power loads in a distribution network,” *International Journal of Electrical and Computer Engineering*, vol. 14, no. 6, pp. 6111–6121, Dec. 2024, doi: 10.11591/ijece.v14i6.pp6111-6121.