

**OPTIMASI DAYA REAKTIF DENGAN PENEMPATAN *CAPACITOR*
BANK MENGGUNAKAN METODE *MIXED INTEGER LINEAR*
PROGRAMMING PADA SISTEM DISTRIBUSI TIGA FASA**

(Skripsi)

Oleh

FAHRUR RIZA PRIYANA



**FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG**

2016

ABSTRACT

REACTIVE POWER DISPATCH WITH *CAPACITOR BANK* PLACEMENT USING *MIXED INTEGER LINEAR PROGRAMMING* FOR THREE-PHASE DISTRIBUTION SYSTEM

By

FAHRUR RIZA PRIYANA

The three-phase distribution system with long feeder line causes an increase the value of voltage drop and power losses, thus the need for power flow optimization studies to improve the voltage profile are in the range of $\pm 5\%$ according to the standard IEC 60038 1983. Mixed Integer Linear Programming (MILP) method on this research is used to solve reactive power optimization by minimizing the addition of new reactive power. The electrical power distribution system is a simulated three-phase feeder bus 11, Katu 119 Bus Menggala substation, IEEE 34 bus models constant power load and load conditions of balanced and unbalanced.

The built of simulation program optimization (UnilaLPOPF) is a three phase power system integration with *Newton Raphson* method in rectangular form, so that the process of comparison is done when numerical take places.

Integer variable in MILP can be represented as a point of optimum tap control capacitor bank and bus of capacitor bank placements in three-phase distribution system. The results showed that this method can improve the voltage profile in range 0.95 up to 1.05 per unit and reduce power losses up to 50% in used cases.

Keywords: reactive power dispatch, capacitor bank allocation, three-phase power distribution system, *mixed integer linear programming*

ABSTRAK

OPTIMASI DAYA REAKTIF DENGAN PENEMPATAN *CAPACITOR BANK* MENGGUNAKAN METODE *MIXED INTEGER LINEAR PROGRAMMING* PADA SISTEM DISTRIBUSI TIGA FASA

Oleh

FAHRUR RIZA PRIYANA

Sistem distribusi tiga fasa dengan saluran yang panjang menyebabkan adanya peningkatan nilai *voltage drop* dan *power losses*, sehingga perlu adanya studi optimasi aliran daya untuk memperbaiki profil tegangan berada pada *range* $\pm 5\%$ sesuai standar *IEC 60038* tahun 1983. Metode *Mixed Integer Linear Programming (MILP)* pada tugas akhir ini digunakan untuk menyelesaikan optimasi daya reaktif dengan meminimisasi penambahan daya reaktif baru. Sistem distribusi tiga fasa yang disimulasikan adalah Penyulang 11 bus, Katu 119 Bus GI Menggala, IEEE 34 bus dengan model beban *constant power* dan kondisi beban yang setimbang maupun tidak setimbang.

Program simulasi optimasi (UnilaLPOPF) yang dibangun merupakan integrasi daya tiga fasa *UnilaPF* dengan metode *Newton Raphson* bentuk *rectangular* sehingga proses komparasi dilakukan saat komputasi numerik berlangsung. Variabel integer pada *MILP* dapat direpresentasikan sebagai titik optimum *tap control capacitor bank* dan bus penempatan *capacitor bank* pada sistem distribusi tiga fasa. Hasil simulasi menunjukkan bahwa metode ini dapat memperbaiki tegangan sistem berada pada *range* 0.95 hingga 1.05 pu dan mereduksi rugi-rugi daya hingga 50% pada kasus yang digunakan.

Kata kunci : optimasi daya reaktif, penempatan *capacitor bank*, sistem distribusi tiga fasa, *mixed integer linear programming*

**OPTIMASI DAYA REAKTIF DENGAN PENEMPATAN *CAPACITOR*
BANK MENGGUNAKAN METODE *MIXED INTEGER LINEAR*
PROGRAMMING PADA SISTEM DISTRIBUSI TIGA FASA**

Oleh

Fahrur Riza Priyana

Skripsi

**Sebagai Salah Satu Syarat Mencapai Gelar
SARJANA TEKNIK**

Pada

**Jurusan Teknik Elektro
Fakultas Teknik Universitas Lampung**



**FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG
2016**

Judul Skripsi : **OPTIMASI DAYA REAKTIF DENGAN
PENEMPATAN *CAPACITOR BANK*
MENGUNAKAN METODE *MIXED
INTEGER LINEAR PROGRAMMING*
PADA SISTEM DISTRIBUSI TIGA FASA**

Nama Mahasiswa : **Fahrur Riza Priyana**

Nomor Pokok Mahasiswa : 1215031029

Jurusan : Teknik Elektro

Fakultas : Teknik

MENYETUJUI

1. Komisi Pembimbing



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



Osea Zebua, S.T., M.T.
NIP 19700609 199903 1 002

2. Ketua Jurusan Teknik Elektro



Dr. Ing. Ardian Ulvan, S.T., M.Sc.
NIP 19731128 199903 1 005

MENGESAHKAN

1. Tim Penguji

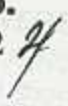
Ketua : **Dr. Eng. Lukmanul Hakim, S.T., M.Sc.** 

Sekretaris : **Osea Zebua, S.T., M.T.** 

Penguji
Bukan Pembimbing : **Dr. Eng. Dikpride Despa, S.T., M.T.** 

2. Dekan Fakultas Teknik



Prof. Suharno, M.Sc., Ph.D.
NIP 19620717 198703 1 002 

Tanggal Lulus Ujian Skripsi : **29 Juli 2016**

SURAT PERNYATAAN

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

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

Bandar Lampung, 29 Juli 2016



Fahrur Riza Priyana
NPM. 1215031029

RIWAYAT HIDUP

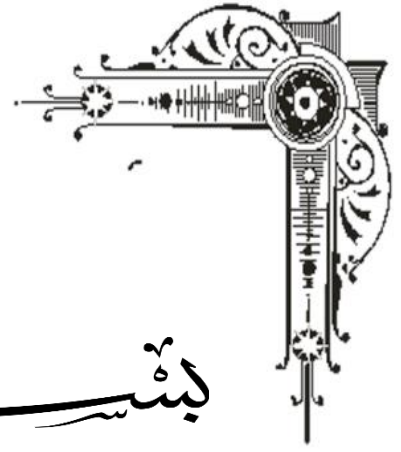


Penulis dilahirkan di Metro pada tanggal 9 April 1994. Penulis merupakan anak ketiga dari ketiga bersaudara dari pasangan Bapak Supriyono dan Ibu Suwarni.

Riwayat pendidikan penulis yaitu TK Aisyah Bustanul Athfal, Batanghari, pada tahun 1999 hingga tahun 2000. SDN 3 Banjarrejo, pada tahun 2000 hingga tahun 2006, MTs Muhammadiyah Metro, pada tahun 2006 hingga tahun 2009, SMA Muhammadiyah 1 Metro, pada tahun 2009 hingga tahun 2012.

Penulis menjadi mahasiswa Jurusan Teknik Elektro, Universitas Lampung, pada tahun 2012 melalui SNMPTN Seleksi Undangan. Selama menjadi mahasiswa, penulis berkesempatan menjadi asisten dosen mata kuliah Pendidikan Agama Islam, Rangkaian Listrik 1, Instrumentasi dan Pengukuran, Dasar Telekomunikasi, serta menjadi asisten praktikum Fisika Dasar, Rangkaian Listrik, Instrumentasi dan Pengukuran. Penulis juga terdaftar sebagai koordinator asisten Laboratorium Pengukuran Besaran Elektrik sejak tahun 2013 hingga 2016, Sekretaris Departemen Kerohanian HIMATRO Unila periode 2013-2014, Kepala Biro Akademik FOSSI FT Unila periode 2014-015, anggota Departemen Sosial-Kewirausahaan HIMATRO Unila periode 2014-2015. Selama berkiprah dikampus, penulis mengikut sertakan diri dalam kegiatan akademik maupun non akademik seperti, peserta PKM-KC 2016, *peserta PLC and SCADA System 2016* oleh *Schneider*

Electric dan UGM, IC-STAR Committe 2015, Surveyor SKP-PLN 2013, Suveyor ILP-PLN 2016, Surveyor Inventarisasi GRK 2016 oleh Kementrian Lingkungan Hidup Daerah Provinsi Lampung, Surveyor Perencanaa Listrik Desa 2017-2021 oleh PLN pada tahun 2016. Penulis melaksanakan kerja praktik di PT. Gunung Madu Plantations pada bulan Agustus-September 2016 dan mengambil judul “Penggunaan Inverter SPWM Tiga Fasa Type Toshiba VF-P7 400V 4132KP sebagai Pengendali Kecepatan Putar Motor Shreder Elevator pada Proses Penggilingan Tebu di PT.Gunung Madu Plantations”.



بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

Karya ini kupersumbahkan untuk

Ayah Tercinta dan Ibu Tercinta

Supriyono dan Suwarni

Kakak-kakaku Tersayang

Andrian Harmoko, S.E.

Dwi Wulandari, S.Pd.I

Sri Endah Pitria, S.Pd

Jajat Mardiansyah, S.Hum

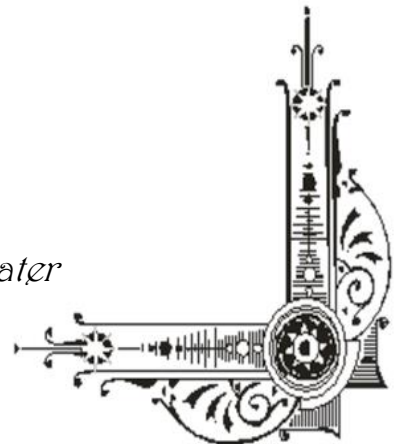
Keponakanku Tersayang

Fathi Faiz Jihadi

Asmahana Nadia

Mufti Hasan Al Basri

Keluarga Besar, Dosen, Teman, dan Almamater





MOTTO

“Karena Sesungguhnya sesudah kesulitan itu ada kemudahan.

Sesungguhnya sesudah kesulitan itu ada kemudahan.”

(Al-Quran, Surat Al – Insyirah, 94 : 5 – 6)

“Tidak ada balasan untuk kebaikan selain kebaikan (pula)”

(Al-Quran, Surat Ar – Rahman, 55 : 60)

“Apabila manusia telah meninggal dunia maka terputuslah semua amalnya kecuali tiga amalan : shadaqah jariyah, ilmu yang bermanfaat, dan anak sholih yang mendoakan dia.”

(HR. Muslim)


“Manusia yang berakal ialah manusia yang suka menerima dan meminta nasihat.”

(Umar bin Khatab RA)

“Ilmu itu lebih baik daripada harta. Ilmu menjaga engkau dan engkau menjaga harta. Ilmu itu penghukum (hakim) dan harta terhukum. Harta itu kurang apabila dibelanjakan tapi ilmu bertambah bila dibelanjakan.”

(Ali bin Abi Talib RA)

“



SANWACANA

Segala puji bagi Allah SWT atas nikmat kesehatan dan kesempatan serta kemudahan yang diberikan kepada penulis sehingga penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir ini. Sholawat serta salam selalu penulis haturkan kepada Nabi Muhammad SAW sebagai suri teladan bagi umat manusia.

Tugas Akhir dengan judul "*Optimasi Daya Reaktif Dengan Penempatan Capacitor Bank Menggunakan Metode Mixed Integer Linear Programming pada Sistem Distribusi Tiga Fasa*" ini merupakan salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik pada Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Lampung.

Pada kesempatan ini, penulis mengucapkan terima kasih kepada:

1. Bapak Prof. Dr. Ir. Hasriadi Mat Akin, M.P. selaku Rektor Universitas Lampung
2. Bapak Prof. Suharno, M.Sc., Pd.D. selaku Dekan Fakultas Teknik Universitas Lampung
3. Bapak Dr. Ing Ardian Ulvan, S.T., M.Sc. selaku Ketua Jurusan Teknik Elektro, Universitas Lampung.

4. Bapak Dr. Eng. Lukmanuk Hakim, S.T., M.Sc. selaku Pembimbing Utama yang telah memberikan bimbingan, arahan dan pandangan hidup kepada penulis di setiap kesempatan dengan baik dan ramah.
5. Bapak Osea Zebua, S.T., M.T. selaku Pembimbing Pendamping yang telah memberikan bimbingan dan arahan kepada penulis dengan baik dan ramah.
6. Ibu Dr. Eng. Dikpride Despa, S.T., M.T. selaku Dosen Penguji sekaligus Kepala Laboratorium Pengukuran Besaran Elektrik yang telah memberikan nasihat, kritik dan saran yang membangun kepada penulis dalam mengerjakan skripsi ini maupun selama mengabdikan di Laboratorium.
7. Ibu Yetti Yuniarti, S.T., M.T. selaku dosen pembimbing akademik yang telah memberikan nasihat, arahan dan bimbingan yang membangun bagi penulis dalam mempersiapkan diri menjadi seorang Sarjana Teknik.
8. Segenap Dosen di Jurusan Teknik Elektro yang telah memberikan ilmu yang bermanfaat, wawasan, dan pengalaman bagi penulis.
9. Segenap Staff di Jurusan Teknik Elektro dan Fakultas Teknik yang telah membantu penulis baik dalam hal administrasi dan hal-hal lainnya terutama Mbak Dian Rustiningsih.
10. Ayah dan Ibu tercinta, Bapak Supriyono dan Ibu Suwarni, Kakak dan Ayuk tersayang, Andrian Harmoko, S.E., Dwi Wulandari, S.Pd.I., Sri Endah Pitria, S.Pd., Jajat Mardiansyah, S.Hum., Keponakan yang tersayang, Fathi Faiz Jihadi, Asmahana Nadia, Mufti Hasan Al-Basri, atas kasih sayang, dukungan, serta doanya yang selalu diberikan kepada penulis.
11. Segenap Penghuni Laboratorium Pengukuran Besaran Elektrik, Pak Makmur, Muhammad Ikromi, Rasyid Hakim, Agus Surinanto, Ubaidah, Niken, Yona,

Citra, Nurul, Rahma, Erik, Jofanda, Mas Ruri, Ega, dan Manda atas kerjasama dalam mengabdikan dan berkarya.

12. Segenap Penghuni Laboratorium Sistem Tenaga Elektrik, Pak Abdurrahman, Kak Afrizal, Kak Seto, Kak Edi, Kak Andi, Kak Yusuf, Kak Yoga dan rekan-rekan Tim Tugas Akhir Studi Aliran Daya yaitu Kak Richard, Kak Fikri, Mbak Rani dan Mbak Fanny.
13. Marbot dan Jamaah Musola Miftahul Jannah Perumahan Griya Gedong Meneng Indah, Kak Yetno, Kak Dirya, Carta dan Dedy, Pakde Nugroho, Mas Chandra, Pak Zainudin, Pak Sumadi, atas kehangatan dalam menjalin persaudaraan.
14. Teman – Teman Jones (Jomblo Always Happiness), Novitoyono, Riski Alandani, Ghumelar, Surya Andika, Angga, Eko, Teman-Teman Elektro 2012, atas kehangatan dan kebersamaan serta semangat yang ditularkan kepada penulis.
15. Rekan-rekan Himatro Unila, serta Kakak – Kakak dan Adik-Adik Tingkat di Jurusan Teknik Elektro.
16. Rekan-rekan KP P.T Gunung Madu Plantations, Deni, Danis, Wahid, Ihsan dan Wahabi, semoga kesolidan tetap terjaga.
17. Teman-teman kelompok KKN Desa Setia Negara, Zulhijri, Oliv, Aan, Opi, Kharisa, Dhana, Azmi, Bayu, Dhana, Heidy, Esti, dan Wulan.
18. Teman-teman Grapitasi IPA 3 dan Teman-teman Konco Kentel (K2), Khairul Hidayat, Teguh Muzaki, Adi Saputra, Septian Nurcahyo, Ardi Saputra, Isna, Willy, Ardiana, semoga kesuksesan dan keberkahan Allah SWT senantiasa menyertai kita.

19. Teman-teman RISMA Jami Nurul Iman periode 2009-2012, Bambang Wahyudi, Deni Sugiarto, Isah Nur Chasisa, Asih Nur Chasisa, Nur Alvilail, Khairul Hidayat, Akhmad kurniawan, dan Dian Purnama, atas persahabatan yang hangat.
20. Semua Pihak yang membantu penulis menyelesaikan skripsi ini.

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.

Bandar Lampung, 29 Juli 2016

Penulis

DAFTAR ISI

DAFTAR ISI	xvi
DAFTAR GAMBAR	xviii
DAFTAR TABEL	xxii
I. PENDAHULUAN	
1.1. Latar Belakang	1
1.2. Tujuan.....	3
1.3. Perumusan Masalah.....	3
1.4. Batasan Masalah.....	4
1.5. Manfaat.....	5
1.6. Hipotesis.....	6
1.7. Sistematika Penulisan.....	7
II. TINJAUAN PUSTAKA	
2.1. Alokasi Daya Reaktif dan Pengaturan pada Sistem Distribusi	8
2.2. Penggunaan <i>Capacitor Bank</i> pada Sistem Distribusi.....	14
2.2.1. <i>Series Capacitor</i> (Kapasitor Seri)	14
2.2.2. <i>Shunt Capacitor</i> (Kapasitor Pararel)	15
2.2.3. Model <i>Capacitor Bank</i> pada Sistem Distribusi.....	17
2.3. <i>Mixed Integer Linear Programming (MILP)</i> pada Sistem Distribusi	19

III. METODOLOGI PENELITIAN

3.1. Waktu dan Tempat	24
3.2. Alat dan Bahan	24
3.3. Tahap Pengerjaan Tugas Akhir	25
3.4. Diagram Alir Penelitian.....	26
3.5. Pemrograman Berorientasi Obyek (<i>Object-Oriented Programming</i>)	27
3.6. Langkah - langkah Perhitungan Program	29
3.7. Diagram Alir Program.....	41
3.8. Simulasi Program	42

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1. Data Penyulang Sistem Distribusi Tiga Fasa	44
4.2. Skenario Simulasi.....	44
4.3. Hasil Simulasi.....	45
4.3.1. Hasil Simulasi pada Penyulang 11 Bus dalam Kondisi Beban yang Setimbang	46
4.3.2. Hasil Simulasi pada Penyulang Katu 119 Bus dalam Kondisi Beban yang Tidak Setimbang.....	55
4.3.3. Hasil Simulasi pada Penyulang IEEE 34 Bus dalam Kondisi Beban yang Tidak Setimbang.....	62

V. KESIMPULAN DAN SARAN

5.1. Kesimpulan.....	71
5.2. Saran	72

DAFTAR PUSTAKA

LAMPIRAN A DATA PENYULANG UNTUK SIMULASI OPTIMASI DAYA REAKTIF

LAMPIRAN B DATA HASIL SIMULASI OPTIMASI DAYA REAKTIF

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1. Skema penyelesaian optimasi aliran daya konvensional.....	10
Gambar 2.2. Skema penyelesaian optimasi aliran daya secara langsung dan berbarengan	11
Gambar 2.3. Kurva kompensasi reaktansi induktif dengan pemasangan kapasitor seri	14
Gambar 2.4. Kurva kompensasi arus kapasitor untuk mereduksi <i>voltage drop</i> ...	16
Gambar 2.5. Capacitor bank satu fasa.....	18
Gambar 2.6. Konfigurasi capacitor bank hubung delta.....	19
Gambar 2.7. Konfigurasi capacitor bank hubung bintang (wye/star)	19
Gambar 3.1. Struktur Kelas Object-Oriented Programming.....	27
Gambar 4.1. Profil tegangan fasa A Penyulang 11 Bus saat sebelum dan setelah optimasi dengan beban yang dimodelkan seluruhnya sebagai <i>constant power</i>	46
Gambar 4.2. Profil tegangan fasa A Penyulang 11 Bus saat sebelum dan setelah optimasi dengan beban yang dimodelkan seluruhnya sebagai <i>constant power</i>	47
Gambar 4.3. Profil tegangan fasa C Penyulang 11 Bus saat sebelum dan setelah optimasi dengan beban yang dimodelkan seluruhnya sebagai <i>constant power</i>	48

Gambar 4.4. Perbandingan injeksi daya pada fasa A saat kondisi sebelum dan setelah optimasi pada Penyulang 11 Bus	49
Gambar 4.5. Perbandingan injeksi daya pada fasa B saat kondisi sebelum dan setelah optimasi pada Penyulang 11 Bus	50
Gambar 4.6. Perbandingan injeksi daya pada fasa C saat kondisi sebelum dan setelah optimasi pada Penyulang 11 Bus	51
Gambar 4.7. Total rugi-rugi daya aktif pada masing-masing fasa saat kondisi sebelum dan setelah optimasi pada Penyulang 11 Bus	52
Gambar 4.8. Total rugi-rugi daya reaktif pada masing-masing fasa saat kondisi sebelum dan setelah optimasi pada Penyulang 11 Bus	52
Gambar 4.9. Perbandingan profil tegangan fasa A setelah optimasi antara metode <i>MILP</i> dan <i>Newton Raphson</i>	54
Gambar 4.10. Perbandingan profil tegangan fasa B setelah optimasi antara metode <i>MILP</i> dan <i>Newton Raphson</i>	54
Gambar 4.11. Perbandingan profil tegangan fasa C setelah optimasi antara metode <i>MILP</i> dan <i>Newton Raphson</i>	55
Gambar 4.12. Profil tegangan fasa A Penyulang Katu 119 Bus saat sebelum dan setelah optimasi dengan beban yang dimodelkan seluruhnya sebagai <i>constant power</i>	56
Gambar 4.13. Profil tegangan fasa B Penyulang Katu 119 Bus saat sebelum dan setelah optimasi dengan beban yang dimodelkan seluruhnya sebagai <i>constant power</i>	57

Gambar 4.14. Profil tegangan fasa C Penyulang Katu 119 Bus saat sebelum dan setelah optimasi dengan beban yang dimodelkan seluruhnya sebagai <i>constant power</i>	57
Gambar 4.15. Perbandingan injeksi daya pada fasa A saat kondisi sebelum dan setelah optimasi pada Penyulang 119 Bus	58
Gambar 4.16. Perbandingan injeksi daya pada fasa B saat kondisi sebelum dan setelah optimasi pada Penyulang 119 Bus	59
Gambar 4.17. Perbandingan injeksi daya pada fasa C saat kondisi sebelum dan setelah optimasi pada Penyulang 119 Bus	60
Gambar 4.18. Total rugi-rugi daya aktif pada masing-masing fasa saat kondisi sebelum dan setelah optimasi pada Penyulang 119 Bus	61
Gambar 4.19. Total rugi-rugi daya reaktif pada masing-masing fasa saat kondisi sebelum dan setelah optimasi pada Penyulang 119 Bus	61
Gambar 4.20. Profil tegangan fasa A Penyulang IEEE 34 Bus saat sebelum dan setelah optimasi dengan beban yang dimodelkan seluruhnya sebagai <i>constant power</i>	63
Gambar 4.21. Profil tegangan fasa B Penyulang IEEE 34 Bus saat sebelum dan setelah optimasi dengan beban yang dimodelkan seluruhnya sebagai <i>constant power</i>	64
Gambar 4.22. Profil tegangan fasa C Penyulang IEEE 34 Bus saat sebelum dan setelah optimasi dengan beban yang dimodelkan seluruhnya sebagai <i>constant power</i>	64
Gambar 4.23. Perbandingan injeksi daya pada fasa A saat kondisi sebelum dan setelah optimasi pada Penyulang IEEE 34 Bus.....	66

- Gambar 4.24. Perbandingan injeksi daya pada fasa B saat kondisi sebelum
dan setelah optimasi pada Penyulang IEEE 34 Bus..... 67
- Gambar 4.25. Perbandingan injeksi daya pada fasa C saat kondisi sebelum
dan setelah optimasi pada Penyulang IEEE 34 Bus..... 68
- Gambar 4.26. Total rugi-rugi daya aktif pada masing-masing fasa saat kondisi
sebelum dan setelah optimasi pada Penyulang IEEE 34 Bus 69
- Gambar 4.27. Total rugi-rugi daya reaktif pada masing-masing fasa saat kondisi
sebelum dan setelah optimasi pada Penyulang IEEE 34 Bus 69

DAFTAR TABEL

Tabel 3.1. Tabel admitansi n-bus	30
----------------------------------------	----

I. PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Populasi manusia berdampak pada bertambahnya pertumbuhan beban dalam sistem tenaga listrik. Pertumbuhan beban tersebut diikuti dengan meningkatnya daya reaktif akibat beban induktif pada bus beban maupun pada saluran. Oleh karena itu, perlu dilakukan perencanaan dalam melakukan analisis studi aliran daya sistem distribusi. Pada sistem distribusi, jika suatu jaringan tidak memiliki sumber daya reaktif di daerah sekitar beban maka semua kebutuhan beban reaktifnya dipikul oleh gardu induk yang tersuplai dari generator pada pembangkit listrik, sehingga akan mengalir arus reaktif pada jaringan yang mengakibatkan faktor daya menurun, jatuh tegangan, dan bertambahnya rugi-rugi daya. Berdasarkan permasalahan tersebut, beberapa cara yang efektif dan efisien dipilih untuk mendapatkan nilai yang optimum pada sistem tenaga listrik, diantaranya adalah optimasi daya reaktif dengan cara membangun generator baru, pengaturan tap trafo, instalasi *auto voltage regulator*, dan instalasi kapasitor paralel^[3].

Studi analisis pemasangan kapasitor untuk optimasi aliran daya reaktif meliputi pemilihan titik kompensasi beban reaktif, pemilihan kapasitas unit kapasitor dan model matematis yang digunakan untuk *tap control* pada *capacitor bank*. Sehingga

hasil optimasi dengan penempatan *capacitor bank* dapat memperbaiki profil tegangan, faktor daya dan mengurangi rugi-rugi daya. Seiring berkembangnya penelitian yang dilakukan, telah didapatkan berbagai metode dalam studi optimasi aliran daya reaktif untuk memperbaiki profil tegangan pada sistem tenaga listrik, yaitu metode deterministik yang terdiri dari *Linear Programming*^[4], *Non Linear Programming* dan metode metaheuristik yang terdiri dari *Partial Swarm Optimization (PSO)*^[6], *Genetic Algorithm (GA)*^[7], *Tabu Search*^[8] dan lain sebagainya. Studi optimasi aliran daya reaktif menggunakan metode heuristik maupun deterministik seringkali memperoleh data hasil pemasangan kapasitas kapasitor yang bernilai bilangan *real*, sehingga seringkali terjadi tidak kesesuaian antara besar kapasitas kapasitor dari data hasil studi dengan kapasitas kapasitor yang diproduksi oleh produsen kapasitor. Pada tugas akhir ini, penulis akan membuat simulasi optimasi daya reaktif tiga fasa dengan penempatan dan pengaturan tap pada *capacitor bank* di jaringan sistem distribusi menggunakan metode *Mixed Integer Linear Programming (MILP)* yaitu metode pemrograman linier bernilai campuran yang terdiri dari bilangan integer ataupun biner^[9]. Penggunaan metode ini diharapkan mampu memperoleh nilai optimum *tap control* yang akan digunakan pada *capacitor bank* dan penentuan titik optimum penempatan *capacitor bank* yang akan dipasang pada penghantar penyulang sistem distribusi dengan menyesuaikan besar kapasitas kapasitor yang diproduksi oleh produsen kapasitor.

1.2. Tujuan

Tujuan tugas akhir ini yaitu:

1. Untuk membuat sebuah program simulasi optimasi daya reaktif tiga fasa dengan penempatan dan pengaturan *tap capacitor bank* menggunakan metode *Mixed Integer Linear Programming*.
2. Untuk mendapatkan nilai simulasi aliran daya tiga fasa setimbang dan tidak setimbang menggunakan metode *Newton Raphson* dalam bentuk persamaan *rectangular* menggunakan software *UnilaPF*.
3. Untuk mendapatkan nilai tegangan, sudut tegangan, daya aktif, daya reaktif dan rugi-rugi daya pada sistem distribusi tiga fasa dari hasil simulasi optimasi daya reaktif.
4. Untuk mendapatkan nilai profil tegangan dari hasil optimasi daya reaktif dengan mengacu pada *International Electrotechnical Commission (IEC) 60038* tahun 1983.

1.3. Perumusan Masalah

Perumusan masalah pada tugas akhir ini terkait dengan nilai tegangan pada setiap bus sistem distribusi yang perlu dijaga yaitu $\pm 5\%$ ^[10]. Oleh, karena itu perlu dilakukan studi analisa optimasi daya reaktif untuk mendapatkan solusi dari permasalahan tersebut, yaitu penggunaan *capacitor bank* dan membangun generator baru. Adanya pertimbangan biaya investasi dan operasional maka pada tugas akhir ini mengakomodir penggunaan kapasitor. Optimisasi yang dilakukan menggunakan metode heuristik menghasilkan nilai besaran kapasitor dalam

bilangan *real* sehingga sering tidak ada kesesuaian dengan besaran kapasitor yang tersedia oleh produsen kapasitor. Oleh karena hal tersebut, maka penulis menggunakan metode *Mixed Integer Linear Programming (MILP)* untuk mendapatkan optimasi daya reaktif dengan penempatan dan pengaturan tap *capacitor bank* pada sistem distribusi tiga fasa.

1.4. Batasan Masalah

Batasan masalah pada tugas akhir ini yaitu:

1. Tugas akhir ini hanya membahas optimisasi daya reaktif tiga fasa pada sistem distribusi radial tiga fasa dengan skenario penempatan dan pengaturan tap *capacitor bank* yang disesuaikan dengan kapasitas kapasitor yang diproduksi oleh produsen kapasitor.
2. Metode optimasi pada tugas akhir ini menggunakan *Mixed Integer Linear Programming*.
3. Metode perhitungan aliran daya menggunakan metode *Newton Raphson* dalam bentuk persamaan *rectangular*.
4. Tidak membahas analisa gangguan yang terjadi di sistem tenaga.
5. Software yang digunakan untuk membuat simulasi optimasi daya reaktif adalah Python 2.7.3 dan terintegrasi dengan software *opensource* yang telah dikembangkan untuk perhitungan komputasi aliran daya, yaitu *UnilaPF*^[5].
6. Tidak membahas sistem proteksi dan harmonisa pada kapasitor.
7. Tugas akhir ini hanya membahas pengaruh kapasitor terhadap profil tegangan dan aliran daya pada sistem yang digunakan.

8. Tidak membahas instalasi pemasangan dan konfigurasi *capacitor bank* pada sistem distribusi radial tiga fasa.

1.5. Manfaat

Manfaat dari tugas akhir ini adalah:

1. Memberikan pemahaman kepada penulis tentang teknik optimasi *linear programming* dan penerapannya pada sistem tenaga listrik sehingga dapat menyimulasikannya pada sistem tenaga serta dapat menjadi acuan untuk mengevaluasi dan mengembangkan sistem yang ada.
2. Memberikan pemahaman kepada penulis mengenai studi analisa optimasi daya reaktif sebagai studi perencanaan dalam mengatasi permasalahan jatuh tegangan pada sistem distribusi agar dapat sesuai dengan nilai-nilai standar yang berlaku.
3. Dapat menjadi acuan bagi mahasiswa lain dalam menyempurnakan tugas akhir ini.

1.6. Hipotesis

Program UNILA LPOPF (*Linear Programming Optimal Power Flow*) merupakan program kombinasi antara program optimasi daya reaktif tiga fasa yang dikembangkan oleh penulis dengan program aliran daya *UnilaPF*, digunakan untuk menghitung optimasi daya reaktif tiga fasa setimbang dan tidak seimbang pada sistem distribusi radial tiga fasa. Maka dengan demikian akan diketahui data tegangan, sudut tegangan, daya dan rugi-rugi daya pada sebelum dan setelah dilakukan optimasi daya reaktif menggunakan pemasangan kapasitor. Metode *Mixed Integer Linear Programming* yang digunakan akan mendapatkan nilai integer yang merepresentasikan pengaturan tap pada *capacitor bank* dan nilai biner yang merepresentasikan lokasi pemasangan *fixed capacitor*, sehingga akan menjaga nilai tegangan setiap bus pada sistem distribusi tiga fasa berada pada Standar *International Electrotechnical Commission (IEC) 60038* tahun 1983 yaitu $\pm 5\%$ ^[10].

1.7. Sistematika Penulisan

Laporan akhir ini dibagi menjadi lima bab yaitu:

BAB I. PENDAHULUAN

Pada bab ini memaparkan latar belakang, masalah, tujuan tugas akhir, manfaat tugas akhir, perumusan masalah, batasan masalah, hipotesis, dan sistematika penulisan.

BAB II. TINJAUAN PUSTAKA

Pada bab ini menjelaskan teori-teori pendukung materi tugas akhir yang diambil dari berbagai sumber ilmiah yang digunakan dalam penulisan laporan tugas akhir ini.

BAB III. METODOLOGI PENELITIAN

Pada bab ini memaparkan waktu dan tempat, alat dan bahan, metode, dan pelaksanaan serta pengamatan dalam pengerjaan tugas akhir

BAB IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

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

BAB V. KESIMPULAN

Pada bab ini menjelaskan kesimpulan yang didasarkan pada hasil data dan pembahasan dari tugas akhir ini.

II. TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Alokasi Daya Reaktif dan Pengaturan Tegangan pada Sistem Distribusi

Sistem distribusi merupakan bagian penting dalam penyaluran energi listrik dari sistem pembangkitan yang melalui sistem transmisi kepada beban^[12]. Analisa aliran daya pada sistem distribusi bertujuan untuk mengetahui aliran daya pada setiap bus, besar tegangan pada setiap bus, dan rugi – rugi yang terjadi pada sistem distribusi dalam kondisi normal.

Hasil perhitungan yang diperoleh pada analisa aliran daya, dapat digunakan untuk menelaah berbagai hal yang berhubungan dengan jaringan yang dianalisa tersebut, yaitu:

1. Pengaturan tegangan, perbaikan faktor daya, kapasitas kawat penghantar, dan rugi – rugi daya.
2. Perluasan atau pengembangan jaringan, yaitu dengan menentukan lokasi bus beban baru, unit pembangkitan, dan gardu induk.
3. Perencanaan jaringan, yaitu kondisi jaringan yang dirancang untuk masa mendatang sesuai dengan pertumbuhan beban^[13].

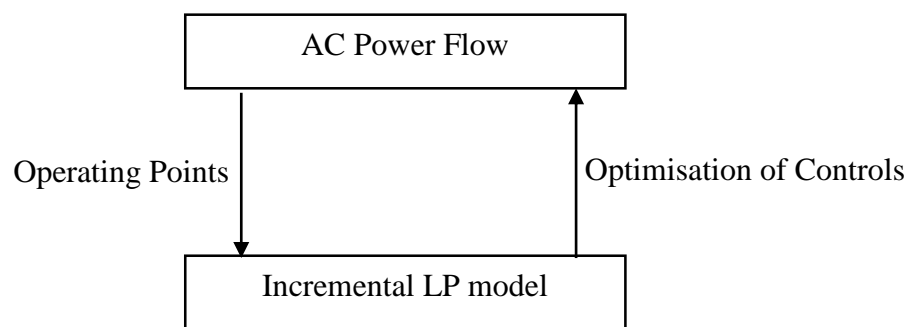
Optimasi aliran daya pada sistem distribusi pada umumnya digunakan untuk mendapatkan nilai minimum dari fungsi objektif yang telah terpenuhi oleh suatu

persamaan dan pertidaksamaan sehingga dapat diperoleh solusi terbaik dalam melakukan perencanaan desain maupun *control* dalam sistem tenaga listrik dengan memperhatikan batasan-batasan yang ada. Persamaan dan pertidaksamaan yang dijadikan sebagai sebagai fungsi kendala digunakan untuk memenuhi suatu fungsi objektif dalam optimasi aliran daya adalah persamaan aliran daya dan batasan yang mencakup batas nilai tegangan yang diizinkan, batas kapasitas saluran dan batasan *discrete control*^[15].

Berdasarkan penelitian tentang optimasi aliran daya yang telah dilakukan, fungsi objektif yang digunakan dalam optimasi aliran daya dapat digunakan untuk mendapatkan berbagai macam solusi diantaranya adalah mendapatkan nilai optimasi daya aktif baru yang akan dibangkitkan dalam suatu sistem tenaga, optimasi daya reaktif untuk mengurangi rugi-rugi daya, optimasi penempatan pemasangan kapasitor dan penentuan kapasitasnya dalam suatu sistem tenaga, optimisasi pelepasan beban dan lain sebagainya.

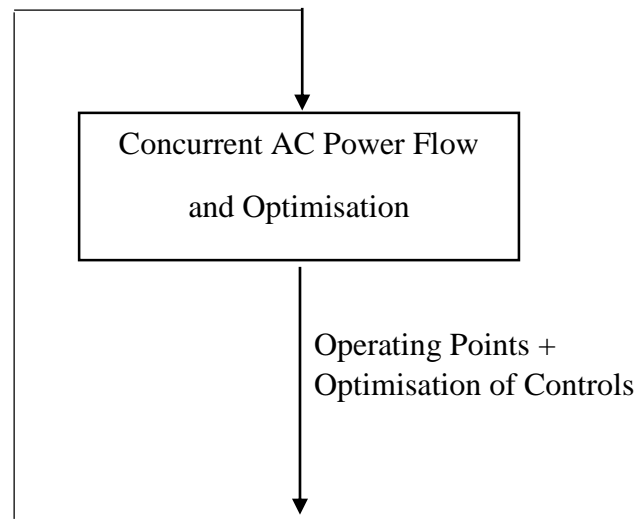
Berdasarkan model matematis dari fungsi objektif, persamaan dan pertidaksamaan yang telah direpresentasikan sebagai fungsi kendala, optimasi aliran daya dapat diformulasikan dengan metode *Linear Programming (LP)* dan *Non Linear Programming (NILP)* seperti metode *Genetic Algorithm*, *Partial Swarm Optimization* dan *Tabu Search*. Optimasi aliran daya menggunakan metode *Linear Programming (LP)* dinilai lebih unggul dibandingkan metode *Non Linear Programming (NILP)*, hal tersebut dikarenakan metode *Linear Programming (LP)* lebih cepat dalam melakukan perhitungan dan dinilai efisien jika diterapkan dalam berbagai studi kasus^[15].

Ada dua skema penyelesaian dasar dalam menyelesaikan optimasi aliran daya menggunakan metode *Linear Programming (LP)*. Skema pertama yang sangat umum adalah menerapkan optimasi aliran daya konvensional yang menggunakan metode *Linear Programming (LP)* untuk memperoleh solusi optimasi dari perhitungan aliran daya AC terlebih dahulu. Skema ini disebut sebagai optimasi aliran daya tidak langsung, karena perhitungan aliran daya dan proses perhitungan optimisasi dilakukan secara terpisah. Sehingga skema ini memiliki kelemahan yaitu, proses perhitungan optimasi tidak dapat dilakukan jika perhitungan aliran daya AC tidak mendapatkan nilai konvergensi, hal tersebut dapat dilihat pada gambar 2.1. Salah satu contoh optimasi aliran daya yang tidak dapat menerapkan skema ini adalah optimasi daya reaktif akibat adanya jatuh tegangan karena tidak tersedianya peralatan yang mampu memberikan kompensasi reaktif dan mampu memperbaiki nilai tegangan sesuai batas yang diinginkan.



Gambar 2.1. Skema penyelesaian optimasi aliran daya konvensional^[15]

Adanya permasalahan pada skema pertama maka diperkenalkan optimasi aliran daya langsung. Ide pokok pada skema ini adalah melakukan perhitungan aliran daya AC dan proses perhitungan optimasi secara bersamaan dengan meminimisasi nilai daya *mismatch* selama nilai dari variabel yang menjadi batasan masih terpenuhi. Skema tersebut dapat dilihat pada gambar 2.2.



Gambar 2.2. Skema penyelesaian optimasi aliran daya secara langsung dan Berbarengan^[15]

Secara umum formulasi dari optimisasi menggunakan *Linear Programming* dapat dituliskan sebagai berikut^[15]:

$$\text{Minimisasi } C^T x \quad (1)$$

dengan syarat :

$$Ax \leq b \quad (2)$$

$$x^{\min} \leq x \leq x^{\max} \quad (3)$$

dimana :

C^T : *Cost coefficient* pada variabel x

x : variabel yang diminimisasi

A : Konstanta variabel x pada Pertidaksamaan Batasan (*Equality Constraint*)

b : Nilai tujuan pada Pertidaksamaan Batasan (*Inequality Constraint*)

Salah satu penelitian tentang optimasi aliran daya yang mengadopsi persamaan (1), (2) dan (3) adalah Lukmanul Hakim dalam jurnalnya yang berjudul *A Study On Reactive Power Allocation For Electrical Power Distribution System With Low Voltage Profile*^[4], Ia melakukan linearisasi terhadap persamaan *Jacobian*, *power mismatch* pada perhitungan aliran daya dan menambahkan nilai batasan seperti tegangan dan daya sehingga diperoleh formulasi optimasi daya reaktif menggunakan metode *linear programming* untuk penentuan lokasi pemasangan kapasitor.

$$\text{Minimisasi } \sum_{n \in (\text{load buses})} C_n^+ Qv_n^+ + C_n^- Qv_n^- \quad (4)$$

dengan syarat:

$$\frac{\partial P_i}{\partial e_i} \Delta e_i + \frac{\partial P_i}{\partial f_i} \Delta f_i + \frac{\partial P_k}{\partial e_k} \Delta e_k + \frac{\partial P_k}{\partial f_k} \Delta f_k - P_m^+ + P_m^- = -P_i + P_i^0 \quad (5)$$

$$\frac{\partial Q_i}{\partial e_i} \Delta e_i + \frac{\partial Q_i}{\partial f_i} \Delta f_i + \frac{\partial Q_k}{\partial e_k} \Delta e_k + \frac{\partial Q_k}{\partial f_k} \Delta f_k - Q_m^+ + Q_m^- - Qv_n^+ + Qv_n^- = -Q_i + Q_i^0 \quad (6)$$

Nilai yang menjadi batasan adalah:

$\forall i \in \{\text{semua bus}\}$:

$$\Delta e_{min} \leq \Delta e_i \leq \Delta e_{max} \quad (7)$$

$$\Delta f_{min} \leq \Delta f_i \leq \Delta f_{max} \quad (8)$$

$\forall m \in \{\text{bus generator}\}$:

$$P_{min}^+ \leq P_m^+ \leq P_{max}^+ \quad (9)$$

$$Q_{min}^+ \leq Q_m^+ \leq Q_{max}^+ \quad (10)$$

$$P_{min}^- \leq P_m^- \leq P_{max}^- \quad (11)$$

$$Q_{min}^- \leq Q_m^- \leq Q_{max}^- \quad (12)$$

$\forall i \in \{\text{semua bus}\}$:

$$Qv_{min}^+ \leq Qv_n^+ \leq Qv_{max}^+ \quad (13)$$

$$Qv_{min}^- \leq Qv_n^- \leq Qv_{max}^- \quad (14)$$

C_n^+ : *Cost coefficient* pada penambahan daya reaktif di bus n

C_n^- : *Cost coefficient* pada pengurangan daya reaktif di bus n

Qv_n^+ : Penambahan daya reaktif oleh kapasitor di bus n

Qv_n^- : Pengurangan daya reaktif oleh kapasitor di bus n

P_i^0 : Daya aktif awal di bus i

Q_i^0 : Daya reaktif awal di bus i

$-P_i$: Daya aktif baru di bus i

$-Q_i$: Daya reaktif baru di bus i

$\Delta e_i, \Delta e_k$: Selisih nilai tegangan dalam bentuk bilangan *real* di bus i dan k

$\Delta f_i, \Delta f_k$: Selisih nilai tegangan dalam bentuk bilangan *imaginer* di bus i dan k

P_m^+ : Penambahan daya aktif generator

P_m^- : Pengurangan daya aktif generator

Q_m^+ : Penambahan daya reaktif generator

Q_m^{-abc} : Pengurangan daya reaktif generator

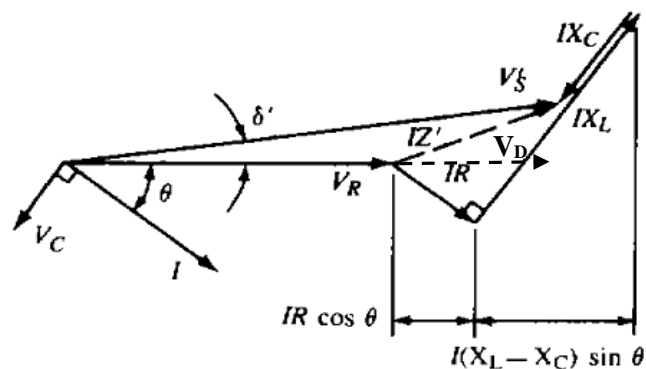
Persamaan (4) merupakan fungsi objektif dari optimasi daya reaktif untuk penentuan lokasi penempatan kapasitor pada sistem distribusi. Persamaan (5) dan (6) merupakan persamaan jacobian dan *power mismatch* dalam perhitungan aliran daya dalam bentuk *rectangular* yang telah dilinearisasi berdasarkan bentuk persamaan fungsi kendala $Ax = b$. Pertidaksamaan (7), (8), (9), (10), (11), (12), (13), dan (14) merupakan pertidaksamaan fungsi kendala yang terdiri dari nilai batasan tegangan dalam bentuk *rectangular*, batasan daya dan batasan daya reaktif baru yang akan diinjeksikan. Selain memformulasi optimasi daya reaktif menggunakan metode *linear programming*, Lukmanul Hakim juga mensimulasikannya kedalam study kasus Penyulusng Katu GI Menggala berjumlah

119 bus menggunakan software yang telah ia kembangkan. Berdasarkan hasil data diperoleh bahwa drop tegangan yang terjadi melebihi batas minimum 10%, sehingga hasil simulasi memberikan solusi untuk melakukan pemasangan 17 buah kapasitor berkapasitas 200 kVar di bus 5 hingga bus 7 agar profil tegangan pada setiap bus berada pada rentang 0.95 pu hingga 1.05 pu.

2.2. Penggunaan *Capacitor Bank* pada Sistem Distribusi

2.2.1. *Series Capacitor* (Kapasitor Seri)

Series Capacitor (Kapasitor Seri) merupakan kapasitor yang terpasang seri dengan saluran. Penggunaan kapasitor seri untuk mengkompensasi reaktansi induktif. Pada kurva gambar 2.3 dapat ditunjukkan bahwa kapasitor yang merupakan reaktansi negatif dan akan mengurangi reaktansi induktif yang bernilai positif. Sehingga penggunaan kapasitor seri dapat meminimisasi tegangan jatuh yang disebabkan oleh reaktansi induktif saluran dan menaikkan tegangan.



Gambar 2.3. Kurva kompensasi reaktansi induktif dengan pemasangan kapasitor seri.^[12]

Secara umum persamaan jatuh tegangan (*voltage drop*) setelah adanya kompensasi kapasitor seri dapat ditunjukkan pada persamaan (15).

$$V_D = IR \cos \theta + I(X_L - X_C) \sin \theta \quad (15)$$

Keterangan:

V_D : Jatuh tegangan

I : Arus yang mengalir pada sistem

R : Resistans

θ : Sudut tegangan

X_L : Reaktansi Induktif

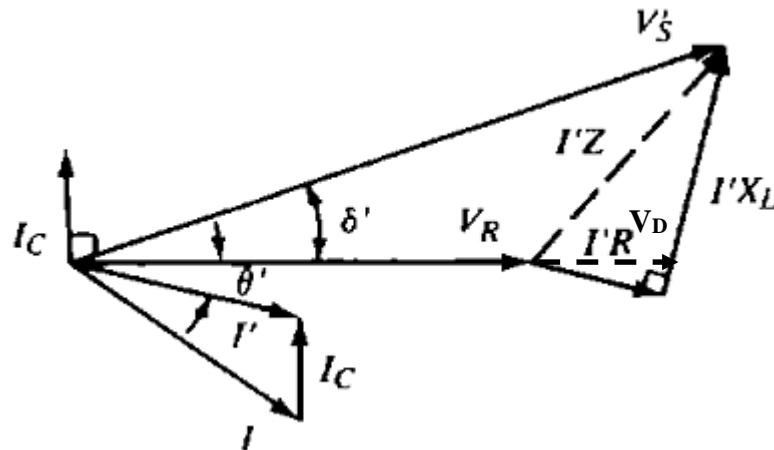
X_C : Reaktansi Kapasitif

Namun pemilihan kapasitas dari kapasitor seri yang terlalu besar dibandingkan nilai kompensasi reaktansi induktif yang diinginkan, maka akan menyebabkan mudah terjadi *over compensation* sehingga sistem akan mengalami *leading power factor*. Selain itu pemasangan kapasitor seri akan menyebabkan adanya fero resonansi pada transformer, resonansi *subsynchronous* selama *starting* pada beban motor, dan sulitnya pemasangan sistem proteksi untuk kapasitor seri, maka penerapan dari kapasitor seri jarang digunakan pada sistem distribusi^[12].

2.2.2 Shunt Capacitor (Kapasitor Pararel)

Shunt Capacitor (Kapasitor Pararel) merupakan kapasitor yang terpasang secara pararel dengan saluran, dan sering diterapkan pada sistem distribusi karena dapat mengatasi jatuh tegangan, mengurangi rugi-rugi daya, dan memperbaiki nilai faktor daya, serta mudah diterapkan sistem proteksi. Penggunaan kapasitor pararel dapat

memberikan kompensasi daya reaktif kepada beban. Pada kurva gambar 2.4 menunjukkan arus yang diinjeksikan oleh kapasitor paralel mampu mengubah vektor arus ke arah *leading* sehingga jatuh tegangan akibat beban induktif saluran dapat teratasi dan tegangan pada beban tetap terjaga pada kondisi yang diinginkan.



Gambar 2.4. Kurva kompensasi arus kapasitor untuk mereduksi jatuh tegangan (*voltage drop*)^[12]

Kapasitor yang dipasang secara paralel akan mereduksi jatuh tegangan (*voltage drop*) seperti yang ditunjukkan pada persamaan (16), sehingga tegangan yang dinaikkan oleh kapasitor paralel dapat ditunjukkan pada persamaan (17).

$$V_D = I_R R + I_L X_L - I_C X_C \quad (16)$$

$$V_{RISE} = I_C X_L \quad (17)$$

Keterangan:

V_D : Jatuh Tegangan

X_L : Reaktansi induktif

I_R : Arus yang mengalir pada beban resistif

X_C : Reaktansi kapasitif

I_C : Arus yang mengalir pada kapasitor

I_L : Arus yang mengalir pada beban induktif

V_{RISE} : Tegangan yang dibangkitkan oleh kapasitor paralel

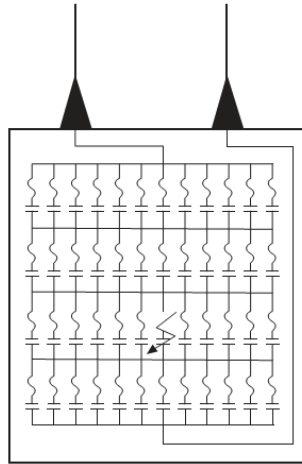
2.2.3. Model *Capacitor Bank* pada Sistem Distribusi

Capacitor Bank merupakan suatu kapasitor yang terdiri lebih dari satu unit kapasitor yang saling terhubung paralel maupun seri untuk menginjeksikan daya reaktif ke sistem tenaga listrik sehingga meminimisasi adanya jatuh tegangan dan rugi-rugi daya. Pada sistem distribusi, jika suatu jaringan tidak memiliki sumber daya reaktif di daerah sekitar beban maka semua kebutuhan beban reaktifnya dipikul oleh gardu induk yang tersuplai dari generator pada pembangkit listrik, sehingga akan mengalir arus reaktif pada jaringan yang mengakibatkan faktor daya menurun, jatuh tegangan, dan bertambahnya rugi-rugi daya. Sehingga dengan adanya pemasangan *capacitor bank* mampu memperbaiki kualitas dan stabilitas sistem pada kondisi yang baik.

Model *capacitor bank* yang digunakan pada sistem distribusi diantaranya adalah *fixed capacitor bank* dan *automatic capacitor bank*. Perbedaan dari kedua model *capacitor bank* ini yaitu, pada *automatic capacitor bank* memiliki kemampuan *men-switching* setiap unit kapasitor maupun setiap segmen kapasitor yang ada didalamnya sehingga penentuan kapasitas daya reaktif yang diinjeksikan dapat disesuaikan dengan kebutuhan sistem, sedangkan *fixed capacitor bank* hanya memiliki kemampuan injeksi besaran daya reaktif yang tetap.

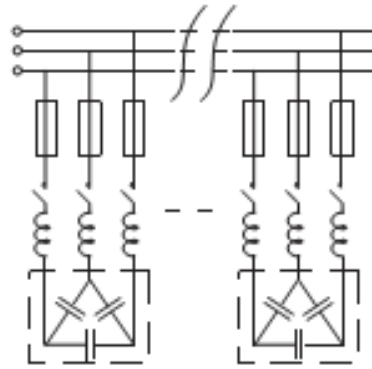
Sedangkan berdasarkan konfigurasinya, *capacitor bank* terdiri dari satu fasa dan tiga fasa. *Capacitor bank* satu fasa memiliki unit-unit kapasitor yang saling terhubung paralel dalam satu segmen, setiap segmen kapasitor dapat saling terhubung seri atau paralel sesuai kebutuhan, hal tersebut juga dimiliki oleh *Capacitor bank* tiga fasa. Namun *capacitor bank* tiga fasa memiliki konfigurasi belitan delta dan bintang (*star/wye*) sesuai kebutuhan dari penggunaan kapasitor.

Capacitor bank satu fasa dapat dilihat pada gambar 2.5. yang memiliki dua terminal output, yaitu terminal yang terhubung dengan fasa dan terminal yang terhubung dengan netral.

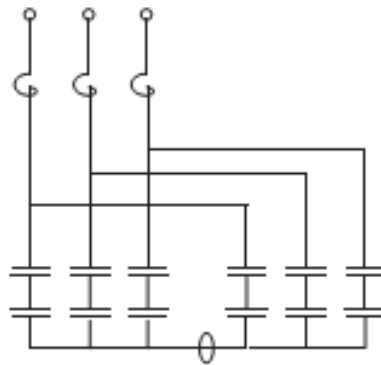


Gambar 2.5. *Capacitor bank* satu fasa^[20]

Pada gambar 2.6. dan 2.7. masing-masing menunjukkan konfigurasi *Capacitor bank* tiga fasa hubung delta dan bintang (*star/bye*). Kedua belitan tersebut masing-masing memiliki tiga terminal output yang terhubung pada masing-masing fasa R, S, T. Secara umum *capacitor bank* dengan konfigurasi belitan dellta digunakan untuk mengkompensasi daya reaktif pada beban motor tiga fasa sehingga penggunaannya banyak ditemukan di dunia industri, sedangkan *capacitor bank* dengan konfigurasi belitan bintang (*star/bye*) digunakan untuk mengkompensasi daya reaktif pada sistem tenaga listrik tingkat distribusi maupun transmisi.



Gambar 2.6. Konfigurasi *capacitor bank* hubung delta^[20]



Gambar 2.7. Konfigurasi *capacitor bank* hubung bintang (*wye/star*)^[20].

2.3. *Mixed Integer Linear Programming (MILP)* pada Sistem Distribusi

Mixed Integer Linear Programming (MILP) adalah metode optimasi linear programming yang menghasilkan tipe data integer, float, maupun binary pada variabel linear yang diinginkan^[9]. Secara umum model *Mixed Integer Linear Programming (MILP)* dapat direpresentasikan pada persamaan (18), (19), (20) dan (21) yang terdiri dari fungsi objektif, persamaan fungsi kendala (*equality constraint*) dan pertidaksamaan fungsi kendala (*inequality constraint*) serta variabel integer atau biner.

$$\text{Fungsi Objektif : } \textit{Minimisasi } C^T x \quad (18)$$

$$\text{dengan syarat : } Ax = b \quad (19)$$

$$Gx \leq h \quad (20)$$

$$x, \text{ integer atau biner} \quad (21)$$

dimana :

C^T : *Cost coefficient* pada variabel x

x : variabel yang diminimisasi

A : Konstanta x pada persamaan batasan (*Equality Constraint*)

b : Nilai tujuan pada persamaan batasan (*Equality Constraint*)

G : Konstanta x pada pertidaksamaan batasan (*Inequality Constraint*)

b : Nilai tujuan pada pertidaksamaan batasan (*Inequality Constraint*)

Mixed Integer Linear Programming (MILP) telah diterapkan pada berbagai bidang dan studi kasus, diantaranya adalah untuk mendapatkan nilai keuntungan maksimum hasil panen pada bidang pertanian dengan meminimumkan kendala yang ada, *The Facility Location Problem* untuk mendapatkan titik nilai optimum penempatan suatu fasilitas dengan biaya yang minimum, *Traveling Salesman Problem* untuk mendapatkan solusi tercepat dari suatu permasalahan dengan biaya minimum, *The Assignment Problem* untuk mendapatkan solusi dalam optimisasi penugasan pekerjaan dengan mempertimbangkan biaya yang minimum. Metode *Mixed Integer Linear Programming (MILP)* digunakan karena bilangan integer dan biner pada variabel dari hasil optimasi dianggap sesuai dengan representasi variabel pada dunia nyata, hal tersebut dikarenakan banyak variabel yang tidak dapat direpresentasikan pada bilangan *real*.

Mixed Integer Linear Programming (MILP) juga dapat diterapkan pada sistem distribusi, yaitu untuk optimasi aliran daya seperti yang dilakukan oleh S. Rama Iyer dalam jurnalnya yang diterbitkan *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, Vol. PAS-103, No. 6, June 1984 dengan judul *Optimal Reactive Power Allocation for Improved System*^[16]. Jurnal tersebut menyatakan bahwa *Mixed Integer Linear Programming (MILP)* digunakan untuk menentukan nilai tegangan magnitude system dengan pengaturan pada tap transformator dan penentuan lokasi penempatan static kapasitor pada sistem tenaga sehingga dapat meminimisasi rugi-rugi daya dan memperbaiki kemampuan aliran daya pada sistem. S. Rama Iyer merepresentasikan *binary variable* untuk memperoleh optimisasi penempatan *static capacitor* dan optimisasi *discatre control* pada tap transformator.

Metode *Mixed Integer Linear Programming (MILP)* juga digunakan oleh John F. Franco dalam jurnalnya yang berjudul *A Mixed-Integer LP Model for The Optimal Allocation of Voltage Regulators and Capacitors in Radial Distribution Systems*^[17]. Pada jurnal tersebut disebutkan bahwa optimasi daya reaktif dengan pengaturan *voltage regulator* dan *switch capacitor* menggunakan variabel integer sebagai representasi pengaturan tap, selain itu Metode *Mixed Integer Linear Programming (MILP)* juga digunakan untuk menentukan lokasi tempat pemasangan *voltage regulator*, *fixed capacitor* dan *switch capacitor* pada sistem distribusi radial dalam keadaan *steady state*.

Peneliti asal Brazil bernama Rogério R. Gonçalves menuliskan sebuah jurnal yang berjudul *Operation Planning of Electrical Distribution Systems Using a Mixed Integer Linear Model*^[18] yang menyatakan bahwa Metode *Mixed Integer Linear Programming (MILP)* digunakan optimasi daya reaktif salah satunya untuk

menentukan nilai pengaturan tap pada kapasitor bank yang dimodelkan pada penelitian ini. Pada penelitiannya Rogério R. Gonçalves mengasumsikan bahwa variabel integer adalah variabel pengali terhadap nilai modul kapasitornya, asumsi ini ditunjukkan pada persamaan (19) dan pertidaksamaan (20) sehingga *capacitor bank* yang dimodelkan dapat memperbaiki profil tegangan.

$$Q_n^{scb} = na_n^{scb} Q_n^{esp} \quad (22)$$

$$0 \leq na_n^{scb} \leq \overline{na}_n^{scb}, \quad na_n^{scb} \text{ sebagai variabel integer} \quad (23)$$

Keterangan:

Q_n^{scb} : Daya reaktif yang diinjeksikan dari *switch capacitor* pada bus n

Q_n^{esp} : Kapasitas daya reaktif dari setiap unit kapasitor dalam *switch capacitor bank*

na_n^{scb} : variabel integer yang direpresentasikan sebagai *discrete control* pada *switch capacitor bank*

\overline{na}_n^{scb} : variabel integer yang direpresentasikan sebagai *discrete control* tap maksimum pada *switch capacitor bank*

Pada sebuah hasil penelitian berjudul *A Mixed-Integer Linear Programming Approach To The Ac Optimal Power Flow In Distribution System*^[19] karya dari Rafael de Sá Ferreira menjelaskan bahwa Metode *Mixed Integer Linear Programming (MILP)* digunakan untuk menentukan lokasi pemasangan kapasitor pada sistem distribusi. Kapasitor yang digunakan adalah tipe *fixed capacitor* sehingga digunakan variabel biner untuk menentukan penempatan yang dianggap optimum. Model matematis tersebut tertuang pada persamaan (24).

$$Z^{CAPL} = \min\{\sum_{k \in \Omega_{cap}} C_k^{CAPL} \cdot (1 - \rho_k)\} \quad (24)$$

Keterangan:

Z^{CAPL} : Nilai dari model fungsi objektif penempatan kapasitor

Ω_{cap} : Bus kandidat yang akan dipasang kapasitor

C_k^{CAPL} : Nilai dari harga koefisien dari pemasangan pada bus k

ρ_k : nilai dari variabel binary yang apabila $\rho_k = 1$ jika kapasitor tidak dipasang pada bus kandidat dan akan $\rho_k = 0$ jika kapasitor dipasang pada bus kandidat.

III. METODOLOGI PENELITIAN

3.1. Waktu dan Tempat

Tugas akhir ini dilaksanakan pada bulan februari 2016 – Juli 2016 di Laboratorium Terpadu Teknik Elektro, Jurusan Teknik Elektro, Universitas Lampung.

3.2. Alat dan Bahan

Alat yang digunakan pada tugas akhir ini yaitu:

1. Satu unit Laptop dengan spesifikasi Intel Bay Trail M Dual Core 2840, prosesor 2.58GHz, dan sistem operasi Windows 8.1 Pro 64 bit sebagai media perancangan dan pengujian simulasi.
2. Perangkat lunak Python 2.7.3 sebagai perangkat lunak utama untuk perancangan dan perhitungan yang telah terinstal dalam sistem operasi virtual Debian 7-2 32 bit pada perangkat lunak VMware Player.
3. Data-data bus pembangkit, bus beban, serta diagram sistem radial tiga fasa Penyulang 11 bus, Penyulang Katu 119 Bus GI Menggala dan IEEE 34 bus.

3.3. Tahap Pengerjaan Tugas Akhir

Berikut ini adalah langkah kerja yang dilakukan untuk menyelesaikan tugas akhir yaitu:

1. Studi Literatur

Studi literatur yaitu mempelajari materi yang berkaitan dengan tugas akhir. Materi tersebut berasal dari berbagai referensi atau sumber – sumber ilmiah lainnya seperti jurnal ilmiah, skripsi – skripsi, buku – buku yang terkait dengan tugas akhir.

2. Studi Bimbingan

Penulis juga melakukan studi bimbingan yaitu dengan cara berdiskusi dan tanya jawab dengan dosen pembimbing untuk menambah wawasan dan menyelesaikan kendala yang terjadi saat melaksanakan tugas akhir.

3. Pengambilan dan Pengolahan Data

Pada tahap ini, penulis melakukan pengambilan data yang nantinya akan diolah dan dianalisa menggunakan perangkat lunak. Data yang akan digunakan yaitu :

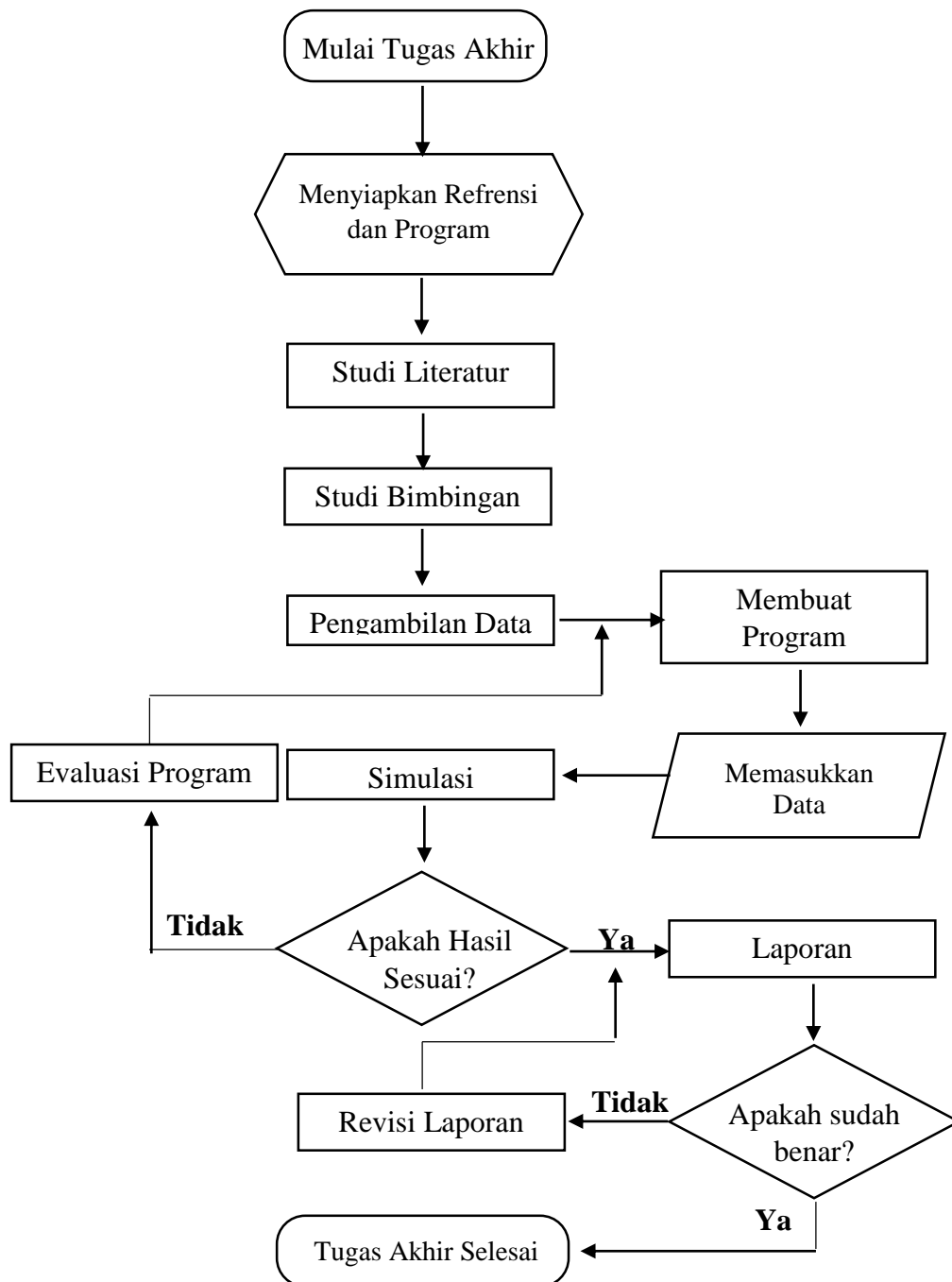
1. Data beban tiap fasa di trafo distribusi pada sistem distribusi tiga fasa.
2. Data impedansi urutan positif, urutan negatif, dan urutan nol.
3. Data *one-line* diagram sistem distribusi tiga fasa.

Kemudian data tersebut akan diolah menggunakan program yang telah dibuat.

4. Pembuatan Laporan

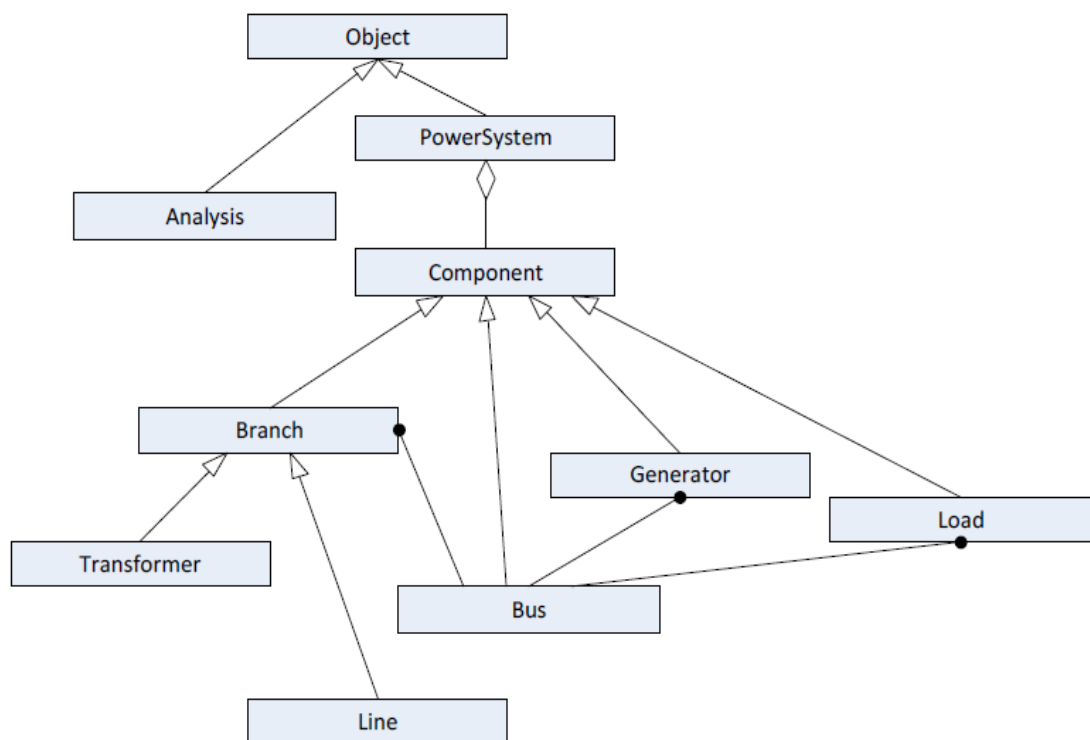
Tahap ini berfungsi untuk menuliskan hasil yang telah didapat dan sebagai sarana pertanggungjawaban terhadap tugas akhir yang telah dilakukan. Laporan dibagi kedalam dua tahap, yaitu laporan awal yang digunakan untuk seminar usul dan laporan akhir yang digunakan untuk seminar hasil.

3.4. Diagram Alir Tugas Akhir



3.5. Pemrograman Berorientasi Obyek (*Object-Oriented Programming*)

Pada studi aliran daya, semua model sistem dinyatakan dalam keadaan *steady-state*. Pemrograman berorientasi obyek adalah pendekatan program yang memberikan kemudahan dalam menyatakan obyek, sehingga dapat memberi keleuasaan untuk memodifikasi. Format data yang digunakan pada tugas akhir ini berupa format teks. Data – data tersebut diantaranya adalah data bus, data beban, dan data *line*. Berikut ini adalah diagram kelas pada tugas akhir ini :



Gambar 3.1. Struktur Kelas *Object-Oriented Programming*^[5]

Kelas – kelas yang terdapat pada program yaitu :

1. Kelas *Power System*

Kelas *Power System* merupakan kelas yang berisikan tentang pembacaan format data yang ada. Pada kelas ini akan dilakukan proses pengolahan data. Seluruh data disetiap komponen akan dipanggil oleh kelas *power system* dan kemudian akan diolah kedalam fungsi.

2. Kelas *Analysis*

Kelas *Analysis* adalah kelas yang berisikan tentang formulasi dan algoritma perhitunganaliran daya tiga fasa tak seimbang. Proses algoritma perhitungan dalam kelas ini diantaranya adalah membuat matriks admitansi, menghitung nilai *mismatch*, membuat matriks Jacobian, serta menyelesaikan persamaan matriks optimasi daya reaktif. Pada kelas ini juga terjadi proses iterasi yang akan terus dilakukan hingga nilai yang diperoleh sudah konvergen, yaitu nilainya lebih kecil dari nilai *mismatch* yang telah ditetapkan. Pada kelas ini juga akan ditunjukkan hasil *output* yang diharapkan, yaitu berupa besarnya tegangan dan sudut fasa pada tiap bus dan besarnya daya aktif dan daya reaktif, serta hasil optimasi daya reaktif berupa titik penempatan dan pengaturan tap pada kapasitor.

3.6. Langkah - langkah Perhitungan Program

Langkah – langkah yang akan dilakukan pada tugas akhir tentang perhitungan aliran daya tiga fasa tak seimbang ini yaitu :

1. Memasukkan data yang ada ke dalam proses analisis
2. Membentuk Matriks admitansi bus (Y_{abc})

Dalam perhitungan studi aliran daya, matriks admitansi diperoleh dari besarnya hambatan pada saluran. Pada sistem tiga fasa akan terdapat tiga buah variabel yaitu a menunjukkan fasa a, b menunjukkan fasa b, dan c menunjukkan fasa c. Sehingga untuk persamaan matriks impedansi jaringan 3 fasa yang saling terhubung antara bus i dan j adalah :

$$Z_{abc} = \begin{bmatrix} Z_{aa} & Z_{ab} & Z_{ac} \\ Z_{ba} & Z_{bb} & Z_{bc} \\ Z_{ca} & Z_{cb} & Z_{cc} \end{bmatrix} \quad (25)$$

Keterangan:

Z_{abc} : Impedansi saluran pada setiap fasa

Z_{aa}, Z_{bb}, Z_{cc} : Impedansi fasa sendiri

$Z_{ab}, Z_{ac}, Z_{ba}, Z_{bc}, Z_{ca}, Z_{cb}$: Bentuk impedansi fasa bersama

Dan nilai matriks admitansi bus per fasa di sistem tiga fasa tak seimbang yaitu :

$$\begin{bmatrix} Y_{aa} & Y_{aa} & Y_{aa} \\ Y_{aa} & Y_{aa} & Y_{aa} \\ Y_{aa} & Y_{aa} & Y_{aa} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} y_p & y_q & y_r \\ y_r & y_p & y_q \\ y_q & y_r & y_p \end{bmatrix} \quad (26)$$

Dimana :

$$y_p = (y_0 + y_1 + y_2) \quad (27)$$

$$y_q = (y_0 + a \cdot y_1 + a^2 \cdot y_2) \quad (28)$$

$$y_r = (y_0 + a^2 \cdot y_1 + a \cdot y_2) \quad (29)$$

Keterangan :

Y_{aa}, Y_{bb}, Y_{cc} : Admitansi fasa sendiri

Y_{abc} : Admitansi saluran pada setiap fasa

$Y_{ab}, Y_{ac}, Y_{ba}, Y_{bc}, Y_{ca}, Y_{cb}$: Bentuk impedansi fasa bersama

y_p, y_q, y_r : Bentuk admitansi urutan nol, positif dan negatif

Sehingga nilai admitansi untuk n bus adalah sebagai berikut :

Tabel 3.1. Tabel admitansi n-bus

		Bus j		
		Fasa a	Fasa b	Fasa c
Bus i	Fasa a	Y_{ij}^{aa}	Y_{ij}^{ab}	Y_{ij}^{ac}
	Fasa b	Y_{ij}^{ba}	Y_{ij}^{bb}	Y_{ij}^{bc}
	Fasa c	Y_{ij}^{ca}	Y_{ij}^{cb}	Y_{ij}^{cc}

Keterangan :

$Y_{ij}^{aa}, Y_{ij}^{bb}, Y_{ij}^{cc}$: Admitansi fasa bersama pada bus i yang terhubung dengan bus j

$Y_{ij}^{ab}, Y_{ij}^{ba}, Y_{ij}^{bc}, Y_{ij}^{cb}, Y_{ij}^{ca}, Y_{ij}^{ac}$: Admitansi fasa sendiri pada bus i yang terhubung dengan bus j

3. Menentukan Nilai Awal Tegangan $e^{(0)}$ dan $f^{(0)}$.

Nilai tegangan awal yang digunakan pada *slack bus* dan bus beban (PQ)

diasumsikan nilai tegangan awal yaitu :

$$|V_i^{abc}| \angle \theta^{abc} = 1 \angle 0^\circ \quad (30)$$

Bila diubah kedalam bentuk *rectangular* yaitu :

$$e_i^{abc} + jf_i^{abc} = 1 + j0 \quad (31)$$

Keterangan :

e^0 : Nilai tegangan awal dalam bentuk bilangan *real*

f^0 : Nilai tegangan awal dalam bentuk bilangan *imajiner*

V_i^{abc} : Tegangan setiap fasa pada bus i

θ^{abc} : Sudut tegangan pada setiap fasa

4. Menentukan Iterasi $n = 0$

5. Menghitung nilai daya injeksi (P_{inj} , Q_{inj} dan V_{inj})

Persamaan daya yang digunakan dalam persamaan *rectangular*:

$$S_i = (e_i + jf_i) \sum_{j=1}^n (G_{ij} - jB_{ij}) \cdot (e_i - jf_i) \quad (32)$$

Dan dipisah menjadi daya aktif dan daya reaktif :

$$P_i = \sum_{j=1}^n \left[e_i (e_j \cdot G_{ij} - f_j - B_{ij}) + f_i (e_j \cdot B_{ij} + f_j \cdot G_{ij}) \right] \quad (33)$$

$$Q_i = \sum_{j=1}^n \left[f_i (e_j \cdot G_{ij} - f_j - B_{ij}) + e_i (e_j \cdot B_{ij} + f_j \cdot G_{ij}) \right] \quad (34)$$

Dimana $i = 1, 2, 3, \dots$

Keterangan:

S_i : Daya semu pada bus i

P_i : Daya aktif pada bus i

Q_i : Daya reaktif pada bus i

B_i : Suseptansi pada bus i

G_i : konduktansi pada bus i

Untuk bus generator (PV) karena disini menggunakan rectangular, maka Q_{inj} yang sebenarnya dalam polar tidak diperhitungkan, maka diganti menjadi V_{inj} yang diperhitungkan dalam rectangular.

$$V_i = (e_i)^2 + (f_i)^2.$$

Keterangan :

V_i : Tegangan setiap fasa pada bus i

e_i : Nilai tegangan awal dalam bentuk bilangan *real* pada bus i

f_i : Nilai tegangan awal dalam bentuk bilangan *imaginer* pada bus i

6. Menghitung *Mismatch* (ΔP_i^{abc} , ΔQ_i^{abc} , ΔV_i^{abc})

Nilai selisih daya aktif (ΔP_i^{abc}) ditunjukkan oleh persamaan berikut :

$$\Delta P_i^{abc} = P_{i\ spec}^{abc} - P_{inj}^{abc} \quad (35)$$

$$\Delta P_i^{abc} = P_{gen}^{abc} - P_{load}^{abc} - P_{inj}^{abc} \quad (36)$$

Dimana :

$$P_{load}^{abc} = \left(P_{L0} \left(a \left((e_i^{abc})^2 + (f_i^{abc})^2 \right) + b \left((e_i^{abc})^2 + (f_i^{abc})^2 \right)^{\frac{1}{2}} + c \right) \right) \quad (37)$$

$$P_{inj}^{abc} = (e_i^{abc} \sum_{j \in i} (G_{ij}^{abc} e_j^{abc} - B_{ij}^{abc} f_j^{abc}) + f_i^{abc} \sum_{j \in 1} (G_{ij}^{abc} f_j^{abc} + B_{ij}^{abc} e_j^{abc})) \quad (38)$$

Keterangan :

ΔP_i^{abc} : Selisih daya aktif pada setiap fasa di bus i

P_{inj}^{abc} : Daya aktif injeksi pada setiap fasa

P_{gen}^{abc} : Daya aktif generator pada setiap fasa

P_{load}^{abc} : Daya aktif beban pada setiap fasa

P_{L0} : Daya aktif awal pada beban

e_i^{abc} : Tegangan dalam bentuk bilangan *real* pada setiap fasa di bus i

e_j^{abc} : Tegangan dalam bentuk bilangan *real* pada setiap fasa di bus j

f_i^{abc} : Tegangan dalam bentuk bilangan *imaginer* pada setiap fasa di bus i

f_j^{abc} : Tegangan dalam bentuk bilangan *imaginer* pada setiap fasa di bus j

B_{ij}^{abc} : Suseptansi bersama bus i dan bus j pada setiap fasa

G_{ij}^{abc} : Konduktansi bersama bus i dan bus j pada setiap fasa

Sedangkan nilai selisih daya reaktif (ΔQ_i^{abc}) ditunjukkan oleh persamaan berikut:

$$\Delta Q_i^{abc} = Q_{i\ spec}^{abc} - Q_{inj}^{abc} \quad (39)$$

$$\Delta Q_i^{abc} = Q_{gen}^{abc} - Q_{load}^{abc} - Q_{inj}^{abc} \quad (40)$$

Dimana :

$$Q_{load}^{abc} = \left(Q_{L0} \left(a \left((e_i^{abc})^2 + (f_i^{abc})^2 \right) + b \left((e_i^{abc})^2 + (f_i^{abc})^2 \right)^{\frac{1}{2}} + c \right) \right) \quad (41)$$

$$Q_{inj}^{abc} = (f_i^{abc} \sum_{j \in i} (G_{ij}^{abc} e_j^{abc} - B_{ij}^{abc} f_j^{abc}) - e_i^{abc} \sum_{j \in 1} (G_{ij}^{abc} f_j^{abc} + B_{ij}^{abc} e_j^{abc})) \quad (42)$$

Keterangan:

ΔQ_i^{abc} : Selisih daya reaktif pada setiap fasa di bus i

Q_{inj}^{abc} : Daya reaktif injeksi pada setiap fasa

Q_{gen}^{abc} : Daya reaktif generator pada setiap fasa

Q_{load}^{abc} : Daya reaktif beban pada setiap fasa

Q_{L0} : Daya reaktif awal pada beban

e_i^{abc} : Tegangan dalam bentuk bilangan *real* pada setiap fasa di bus i

e_j^{abc} : Tegangan dalam bentuk bilangan *real* pada setiap fasa di bus j

f_i^{abc} : Tegangan dalam bentuk bilangan *imajiner* pada setiap fasa di bus i

f_j^{abc} : Tegangan dalam bentuk bilangan *imajiner* pada setiap fasa di bus j

B_{ij}^{abc} : Suseptansi bersama bus i dan bus j pada setiap fasa

G_{ij}^{abc} : Konduktansi bersama bus i dan bus j pada setiap fasa

Dan untuk PV bus, nilai Q diganti dengan V^2 dengan persamaan :

$$\Delta V_i^{abc} = (e_i^{abc})^2 + (f_i^{abc})^2 \quad (43)$$

Keterangan:

ΔV_i^{abc} : Selisih tegangan pada setiap fasa di bus i

e_i^{abc} : Tegangan dalam bentuk bilangan *real* pada setiap fasa di bus i

f_i^{abc} : Tegangan dalam bentuk bilangan *imajiner* pada setiap fasa di bus i

7. Memeriksa nilai ΔP_i^{abc} , ΔQ_i^{abc} , ΔV_i^{abc} apakah sudah mencapai nilai toleransi yang ditentukan. Jika belum mencapai nilai toleransi, maka dilanjutkan ke langkah 8. Jika sudah mencapai nilai toleransi, dilanjutkan ke langkah 11.

8. Menghitung optimasi daya reaktif menggunakan *Mixed Integer Linear Programming*

Hasil perhitungan persamaan aliran daya dijadikan sebagai persamaan fungsi kendala. Kemudian ditambahkan pertidaksamaan fungsi kendala yang terdiri dari batas tegangan, batas daya pada bus *Slack* dan batas daya reaktif yang akan diinjeksikan oleh kapasitor. Selanjutnya akan diolah pada algoritma perhitungan optimasi daya reaktif menggunakan *Mixed Integer Linear Programming* berdasarkan fungsi objektif yang telah dibuat.

$$\text{Min } \sum_{n \in (\text{load buses})} C_n^+ t_n Q v_n^{abc+} + C_n^- t_n Q v_n^{abc-} \quad (44)$$

Subject to:

$$\begin{aligned} \frac{\partial P_i^{abc}}{\partial e_i^{abc}} \Delta e_i^{abc} + \frac{\partial P_i^{abc}}{\partial f_i^{abc}} \Delta f_i^{abc} + \frac{\partial P_k^{abc}}{\partial e_k^{abc}} \Delta e_k^{abc} + \frac{\partial P_k^{abc}}{\partial f_k^{abc}} \Delta f_k^{abc} - P_m^{abc} + P_m^{-abc} = \\ -P_i^{abc} + P_i^0{}^{abc} \end{aligned} \quad (45)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial Q_i^{abc}}{\partial e_i^{abc}} \Delta e_i^{abc} + \frac{\partial Q_i^{abc}}{\partial f_i^{abc}} \Delta f_i^{abc} + \frac{\partial Q_k^{abc}}{\partial e_k^{abc}} \Delta e_k^{abc} + \frac{\partial Q_k^{abc}}{\partial f_k^{abc}} \Delta f_k^{abc} - Q_m^+{}^{abc} + Q_m^-{}^{abc} - \\ Q v_n^+{}^{abc} + Q v_n^-{}^{abc} = -Q_i^{abc} + Q_i^0{}^{abc} \end{aligned} \quad (46)$$

$$0 \leq t_n \leq \bar{t}_n, t_n \text{ sebagai variabel integer untuk switch capacitor} \quad (47)$$

$$0 \leq t_n \leq \bar{t}_n, t_n \text{ sebagai variabel biner untuk fixed capacitor} \quad (48)$$

Keterangan:

C_n^+ : Cost coefficient pada penambahan daya reaktif di bus n

C_n^- : Cost coefficient pada pengurangan daya reaktif di bus n

t_n : Nilai tap pada kapasitor n

$Q v_n^{abc+}$: Penambahan daya reaktif pada setiap fasa
oleh kapasitor di bus n

$Q v_n^{abc-}$: Pengurangan daya reaktif pada setiap fasa
oleh kapasitor di bus n

P_i^{abc} : Daya aktif pada setiap fasa di bus i

Q_i^{abc} : Daya reaktif pada setiap fasa di bus i

P_k^{abc} : Daya aktif pada setiap fasa di bus k

Q_k^{abc} : Daya reaktif pada setiap fasa di bus k

Δe_i^{abc} : Selisih nilai tegangan dalam bentuk bilangan *real*
pada setiap fasa di bus i

Δf_i^{abc} : Selisih nilai tegangan dalam bentuk bilangan *imajiner*
pada setiap fasa di bus i

Δe_k^{abc} : Selisih nilai tegangan dalam bentuk bilangan *real*
pada setiap fasa di bus k

Δf_k^{abc} : Selisih nilai tegangan dalam bentuk bilangan *imajiner*
pada setiap fasa di bus k

P_m^{+abc} : Penambahan daya aktif generator pada setiap fasa

P_m^{-abc} : Pengurangan daya aktif generator pada setiap fasa

Q_m^{+abc} : Penambahan daya reaktif generator pada setiap fasa

Q_m^{-abc} : Pengurangan daya reaktif generator pada setiap fasa

Nilai yang menjadi batasan adalah:

$\forall i \in \{all\ buses\}$:

$$\Delta e_{min}^{abc} \leq \Delta e_i^{abc} \leq \Delta e_{max}^{abc} \quad (49)$$

$$\Delta f_{min}^{abc} \leq \Delta f_i^{abc} \leq \Delta f_{max}^{abc} \quad (50)$$

$\forall m \in \{substation\ bus\}$:

$$P_{min}^{+abc} \leq P_m^{+abc} \leq P_{max}^{+abc} \quad (51)$$

$$Q_{min}^{+abc} \leq Q_m^{+abc} \leq Q_{max}^{+abc} \quad (52)$$

$$P_{min}^{-abc} \leq P_m^{-abc} \leq P_{max}^{-abc} \quad (53)$$

$$Q_{min}^{-abc} \leq Q_m^{-abc} \leq Q_{max}^{-abc} \quad (54)$$

$\forall i \in \{all\ buses\}$:

$$Qv_{min}^{+abc} \leq Qv_n^{+abc} \leq Qv_{max}^{+abc} \quad (55)$$

$$Qv_{min}^{-abc} \leq Qv_n^{-abc} \leq Qv_{max}^{-abc} \quad (56)$$

Keterangan:

Δe_{min}^{abc} : Selisih tegangan minimum dalam bilangan *real* pada setiap fasa

Δe_{max}^{abc} : Selisih tegangan maximum dalam bilangan *real* pada setiap fasa

Δf_{min}^{abc} : Selisih tegangan minimum dalam bilangan *imajiner* pada setiap fasa

Δf_{max}^{abc} : Selisih tegangan maximum dalam bilangan *imajiner* pada setiap fasa

Δe_i^{abc} : Selisih tegangan dalam bilangan *real* pada setiap fasa di bus *i*

Δf_i^{abc} : Selisih tegangan dalam bilangan *imajiner* pada setiap fasa di bus *i*

P_{min}^{+abc} : Penambahan minimum daya aktif generator pada setiap fasa

P_{max}^{+abc} : Penambahan maximum daya aktif generator pada setiap fasa

P_m^{+abc} : Penambahan daya aktif generator pada setiap fasa di bus *m*

P_{min}^{-abc} : Pengurangan minimum daya aktif generator pada setiap fasa

P_{max}^{-abc} : Pengurangan maximum daya aktif generator pada setiap fasa

P_m^{-abc} : Pengurangan daya aktif generator pada setiap fasa di bus *m*

Q_m^{+abc} : Penambahan daya reaktif generator pada setiap fasa di bus *m*

Q_{min}^{+abc} : Penambahan minimum daya reaktif generator pada setiap fasa

Q_{max}^{+abc} : Penambahan maximumm daya reaktif generator pada setiap fasa

Q_m^{-abc} : Pengurangan daya reaktif generator pada setiap fasa di bus *m*

Q_{min}^{-abc} : Pengurangan minimum daya reaktif generator pada setiap fasa

Q_{max}^{-abc} : Pengurangan maximum daya reaktif generator pada setiap fasa

Qv_n^{abc+} : Penambahan daya reaktif pada setiap fasa oleh kapasitor *n*

Qv_{min}^{abc+} : Penambahan minimum daya reaktif pada setiap fasa oleh kapasitor

Qv_{max}^{abc+} : Penambahan maximum daya reaktif pada setiap fasa oleh kapasitor

Qv_{min}^{abc-} : Pengurangan minimum daya reaktif pada setiap fasa oleh kapasitor

Qv_{max}^{abc-} : Pengurangan maximum daya reaktif pada setiap fasa oleh kapasitor

9. Menghitung Tegangan Bus Baru

$$e_i^{abc(n+1)} = e_i^{abc(n)} + \Delta e_i^{abc(n)} \quad (57)$$

$$f_i^{abc(n+1)} = f_i^{abc(n)} + \Delta f_i^{abc(n)} \quad (58)$$

Keterangan:

$e_i^{abc(n+1)}$: Tegangan dalam bilangan *real* pada setiap fasa pada iterasi $n + 1$

$f_i^{abc(n+1)}$: Tegangan dalam bilangan *imajiner* pada setiap fasa pada iterasi $n + 1$

$e_i^{abc(n)}$: Tegangan dalam bilangan *real* setiap fasa pada iterasi n

$f_i^{abc(n)}$: Tegangan dalam bilangan *imajiner* setiap fasa pada iterasi n

$\Delta e_i^{abc(n)}$: Selisih tegangan dalam bilangan *real* setiap fasa pada iterasi n

$\Delta f_i^{abc(n)}$: Selisih tegangan dalam bilangan *imajiner* setiap fasa pada iterasi n

10. Kembali ke langkah 5 untuk menghitung nilai daya injeksi (P_{inj} , Q_{inj} dan V_{inj})

11. Menghitung Aliran Daya di *Slack Bus* dan Bus Beban

Setelah itu menghitung aliran daya P dan Q di bus slack dan Bus Beban.

$$P_i^{abc} = P_{gen}^{abc} - P_{load}^{abc} - P_{inj}^{abc} \quad (59)$$

$$Q_i^{abc} = Q_{gen}^{abc} - Q_{load}^{abc} - Q_{inj}^{abc} \quad (60)$$

Keterangan:

P_i^{abc} : Daya aktif pada setiap fasa di bus i

P_{gen}^{abc} : Daya aktif generator pada setiap fasa

P_{load}^{abc} : Daya aktif beban pada setiap fasa

P_{inj}^{abc} : Daya aktif injeksi pada setiap fasa

Q_i^{abc} : Daya reaktif pada setiap fasa di bus i

Q_{gen}^{abc} : Daya reaktif generator pada setiap fasa

Q_{load}^{abc} : Daya reaktif beban pada setiap fasa

Q_{inj}^{abc} : Daya reaktif injeksi pada setiap fasa

12. Penentuan *Constraint* Tegangan

Penentuan *constraint* tegangan menggunakan metode selisih sehingga didapatkan nilai Δe dan Δf pada masing-masing fasa yang digunakan sebagai *set point value* dalam mempersempit atau merenggangkan daerah solusi.

a. Batas Bawah Tegangan

$$\underline{V} \angle \theta = \underline{e} + j\underline{f} \quad (61)$$

$$\underline{e} = \underline{V} \times \cos(\text{rad}\theta) \quad (62)$$

$$\underline{f} = \underline{V} \times \sin(\text{rad}\theta) \quad (63)$$

$$\therefore \underline{\Delta e}_{pu} = e_0 - \underline{e} \quad (64)$$

$$\therefore \underline{\Delta f} = f_0 - \underline{f} \quad (65)$$

Keterangan :

\underline{e} : batas bawah nilai tegangan dalam bentuk bilangan *real*

\underline{f} : batas bawah nilai tegangan dalam bentuk bilangan *imajiner*

$\underline{\Delta e}$: Selisih antara batas bawah nilai tegangan dengan tegangan awal yang dalam bentuk bilangan *real*

$\underline{\Delta f}$: Selisih antara batas bawah nilai tegangan dengan tegangan awal yang dalam bentuk bilangan *imajiner*

e_0 : Tegangan awal dalam bentuk bilangan *real*

f_0 : Tegangan awal dalam bentuk bilangan *imajiner*

b. Batas Atas Tegangan

$$\overline{V} \angle \theta = \overline{e} + j\overline{f} \quad (66)$$

$$\overline{e} = \overline{V} \times \cos(\text{rad}\theta) \quad (67)$$

$$\overline{f} = \overline{V} \times \sin(\text{rad}\theta) \quad (68)$$

$$\therefore \overline{\Delta e} = \overline{e} - e_0 \quad (69)$$

$$\therefore \overline{\Delta f} = \overline{f} - f_0 \quad (70)$$

Keterangan:

\overline{e} : batas atas nilai tegangan dalam bentuk bilangan *real*

\overline{f} : batas atas nilai tegangan dalam bentuk bilangan *imajiner*

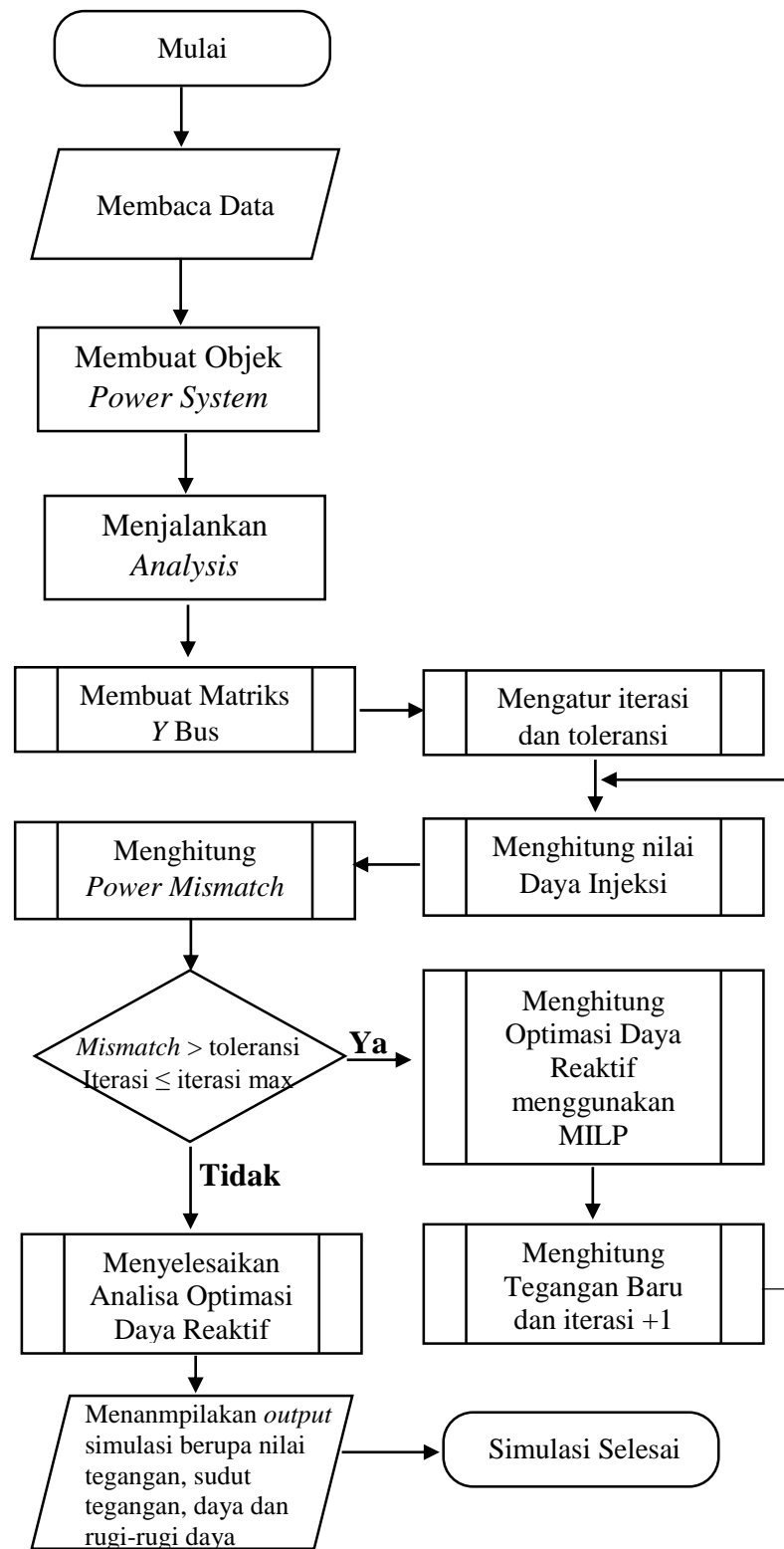
$\overline{\Delta e}$: Selisih antara batas atas nilai tegangan dengan tegangan awal
yang dalam bentuk bilangan *real*

$\overline{\Delta f}$: Selisih antara batas atas nilai tegangan dengan tegangan awal
yang dalam bentuk bilangan *imajiner*

e_0 : Tegangan awal dalam bentuk bilangan *real*

f_0 : Tegangan awal dalam bentuk bilangan *imajiner*

3.7. Diagram Alir Program



3.8. Simulasi Program

Simulasi optimasi daya reaktif tiga fasa setimbang dan tak seimbang pada sistem distribusi tiga fasa dilakukan dengan program Unila LPOPF yaitu pengembangan dari UnilaPF. Langkah – langkah simulasi yang akan dilakukan yaitu :

1. Membuat data kedalam format text atau notepad. Adapun data yang akan dibuat yaitu :

a. *MVA Base* (Daya Referensi)

MVA Base yang digunakan pada program yaitu 100 MVA.

b. Data Bus

Untuk mengidentifikasi bus yang ada pada jaringan, diberikan data berupa tegangan dan sudut fasa yang merupakan asumsi awal pada setiap fasa di setiap bus.

c. Data Beban

Data beban yang diberikan yaitu nama beban, hubungan antara beban dengan bus,serta daya aktif dan daya reaktif setiap fasa.

d. Data Line

Data line yang diberikan yaitu hubungan antara bus ke bus lainnya serta resistansi dan reaktansi urutan positif, negatif, dan nol.

2. Menjalankan program Python 2.7.3

Program python 2.7.3 yang telah diinstal ke dalam sistem operasi virtual Debian 7.2 digunakan untuk simulasi program. Kemudian perlu menginstal *numpy* dan *scipy* serta *cvxopt* sebagai *library* perhitungan.

3. Simulasi

Langkah selanjutnya adalah menjalankan program Unila LPOPF. Pertama – tama dibuat terlebih dahulu studi kasus yang akan disimulasikan berdasarkan data yang telah dibuat di *notepad*. Kemudian studi kasus yang telah dibuat akan disimulasikan dengan memasukkan nama studi kasus tersebut didalam program yang telah dibuat.

4. Membuat Analisa dari Seluruh Hasil Simulasi

Setelah itu, hasil simulasi dari program Unila LPOPF tersebut perlu dianalisa untuk mengetahui bagaimanakah hasil yang ditunjukkan.

V. KESIMPULAN DAN SARAN

5.1. Kesimpulan

Berdasarkan hasil simulasi pada tugas akhir ini maka dapat diambil kesimpulan yaitu:

1. Metode *Mixed Integer Linear Programming* (MILP) dapat digunakan untuk optimasi daya reaktif tiga fasa dengan implementasi pada penentuan titik optimum penempatan dan jumlah *tap capacitor bank*.
2. Hasil optimasi daya reaktif menggunakan metode *Mixed Integer Linear Programming* (MILP) mampu memperbaiki nilai jatuh tegangan *magnitude* setiap fasa menjadi berada pada range 0.95 hingga 1.05 pu sesuai standar *IEC 60038* tahun 1983.
3. Program optimasi daya reaktif tiga fasa *UnilaLPOPF* yang telah dibuat pada tugas akhir ini mampu menyelesaikan kasus diantaranya Penyulang 11 Bus, Penyulang Katu 119 Bus GI Menggala, dan Penyulang IEEE 34 Bus.
4. Hasil optimasi daya reaktif tiga fasa pada setiap kasus yang digunakan pada tugas akhir ini mampu mengurangi total rugi-rugi daya aktif dan daya reaktif hingga 50%.

5. Program optimasi *UnilaLPOPF* yang dibangun merupakan integrasi program aliran daya tiga fasa *UnilaPF* dengan metode *Newton Raphson* bentuk *rectangular* sehingga proses komparasi dilakukan saat komputasi numerik berlangsung.

5.2. Saran

Saran yang dapat diberikan untuk tugas akhir selanjutnya yaitu :

1. Perlu adanya model matematis persamaan *constraint* tambahan untuk optimasi daya reaktif tiga fasa dengan penempatan *capacitor bank* yang dapat diterapkan pada metode *Mixed Integer Linear Programming*, sehingga didapatkan hasil pemasangan *tap capacitor bank* di ketiga fasa pada bus yang sama.
2. Tugas akhir dapat dilanjutkan dengan membandingkan metode *Mixed Integer Linear Programming* dan *Mixed Integer Conic Programming* pada optimasi daya reaktif sistem distribusi tiga fasa.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Data Statistik Konsumsi Listrik di Indonesia. 2016.
<https://www.bps.go.id/linkTabelStatis/view/id/999>, diakses pada 28 April 2016 pukul 8.30 wib
- [2] Gusmau Rado Pratama, "Penerapan Model Beban ZIP untuk Analisa Aliran Daya Tiga Fasa Pada Penyulang Katu GI Menggala", Universitas Lmapung, Bandar Lampung, 2016.
- [3] B.M.Weedy, "*Electric Power Systems (Fifth Edition)*", A Jhon Willey Sons, United Kingdom, 2012.
- [4] Lukmanul Hakim Umi Murdika, Herri Gusmedi, Syamsuri Zaini, "*A Study on Reactive Power Allocation for Electrical Power Distribution System with Low Voltage Profile*", dalam *International Conference on Science, Technology and Interdisciplinary Research*, Bandar Lampung, 2015.
- [5] L. Hakim, M. Wahidi, T. Handoko, H. Gusmedi, N. Soedjarwanto dan F. Milano, "Development of a Power Flow Software for Distribution System Analysis Based on Rectangular Voltage Using Python Software Package," dalam *6th International Conference on Information Technology and Electrical Engineering (ICITEE)*, Yogyakarta, 2014.

- [6] S. Segura, R. Romero and M.J. Rider, "*Efficient Heuristic Algorithm used for Optimal Capacitor Placement in Distribution System*", *Int.J. Electr. Power Energy Syst.* vol.32 no. 1, pp 71-78, Jan.2010
- [7] S. Sundhararajan and A. Pahwa, "*Optimal Selection of Capacitor for Radial Distribution System using a Genetic Algorithm*", *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 9. no.3, pp. 1499-1507, 1994.
- [8] Y. C. Huang, H. T. Yang and C. L. Huang, "*Solving the Capacitor Placement Problem in a Radial Distribution System using Tabu Search Approach*", *IEEE Trans. Power. Syst*, vol.4, no. 11,pp. 1868-1873,1996.
- [9] Yusuke Motozawa, "*Analysis of Linear, Integer, and Binary Programming and their Applications*", University of Houston, Downtown, 2009.
- [10] International Electrotechnical Commission (IEC) 60038.1983.
- [11] W. H. Kersting, "*Radial Distribution Test Feeders*", New Mexico State University. 2000.
- [12] Turan Gonen, "*Electric Power Distribution System Engineering*", McGraw-Hill. Inc, United States, 1986.
- [13] K. Linden dan I. Segerqvist, "*Modelling of Load Devices and Studying Load/System Characteristics*," Chalmers University of Technology, Goteborg, 1993.
- [14] R. Aswani dan R. Sakthivel, "Power Flow Analysis of 110/11 KV Substation Using ETAP," *International Journal of Applied and Studies (iJARS)*, vol. 3, no. 1, 2014.

- [15] Lukmanul Hakim, "*Linear Programming Based-Optimal Power Flow*", UMIST, Manchester, 1998.
- [16] S. Rama Iyer, K. Ramachandran, "*Optimal Reactive Power Allocation for Improved System Performance*", IEEE Trans. Power Apparatus and Syst., vol.PAS-103, no.6,1984.
- [17] John F. Franco, Marcos. J. Rider, Marina Lavorato, Ruben Romero, "*A Mixed-Integer LP Model for Optimal Allocation of Voltage Regulators and Capacitor in Radial Distribution System*", UNESP, Brasil, 2012.
- [18] Rogero R. Goncalves, Raine P. Alves, J.F. Franco, M.J.Rider, "*Operation Planning of Electrical Distribution Systems Using a Mixed Integer Linear Model*", J Control Autom Electr Syst. 2013
- [19] Rafael de Sa Ferreira, "*A Mixed-Integer Linear Programming Approach to the AC Optimal Reactive Power Flow in Distribution System*", Brasil. 2013
- [20] Schneider Electric, "*Power Factor Correction and Harmonic Filtering Solutions*", Medium Voltage Catalogue, 2010
- [21] Abou Jawdeh S.A., Jabr R.A., "*Mixed Integer Conic Programming Approach for Optimal Capacitor Placement in Radial Distribution Networks*", International Universities Power Engineering Conference (UPEC). 2012