

TESIS

**OPTIMASI PENEMPATAN KAPASITOR
MEMPERTIMBANGKAN BEBAN NONLINEAR
MENGUNAKAN *PARTICLE SWARM OPTIMIZATION***

*Optimal Placement of Capacitor Consider Nonlinear Load
Using Particle Swarm Optimization*

**NUR NANINGSI
D032192003**



**PROGRAM STUDI MAGISTER TEKNIK ELEKTRO
DEPARTEMEN TEKNIK ELEKTRO
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS HASANUDDIN
GOWA
2023**



Optimized using
trial version
www.balesio.com

PENGAJUAN TESIS

OPTIMASI PENEMPATAN KAPASITOR MEMPERTIMBANGKAN BEBAN NONLINEAR MENGUNAKAN *PARTICLE SWARM OPTIMIZATION*

Tesis
Sebagai Salah Satu Syarat Untuk Mencapai Gelar Magister
Program Studi Teknik Elektro

Disusun dan diajukan oleh

**NUR NANINGSI
D032192003**

Kepada

**FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS HASANUDDIN
GOWA
2023**



TESIS**OPTIMASI PENEMPATAN KAPASITOR
MEMPERTIMBANGKAN BEBAN NONLINEAR
MENGUNAKAN *PARTICLE SWARM OPTIMIZATION*****NUR NANINGSI
D032192003**

Telah dipertahankan di hadapan Panitia Ujian yang dibentuk dalam rangka penyelesaian studi Program Magister Program Studi Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin.
Pada Tanggal 4 Januari 2024
dan dinyatakan telah memenuhi syarat kelulusan

Menyetujui,

Pembimbing Utama,



Dr. Ikhlas Kitta, S.T., M.T.
Nip. 19760914 200801 1 006

Pembimbing Pendamping,



Dr. Ir. Zaenab, M.T.
Nip. 19660201 199202 2 002

Dekan Fakultas Teknik
Universitas Hasanuddin

hammad Isran Ramli, S.T., M.T.,IPM
730926 200012 1 002

Ketua Program Studi
S2 Teknik Elektro

Dr. Eng. Ir. Wardi, S.T., M.Eng
NIP. 19720828 199903 1 003



PERNYATAAN KEASLIAN TESIS DAN PELIMPAHAN HAK CIPTA

Yang bertanda tangan di bawah ini :

Nama : Nur Naningsi
Nomor Mahasiwa : D032192003
Program Studi : Teknik Elektro

Dengan ini menyatakan bahwa, tesis berjudul “OPTIMASI PENEMPATAN KAPASITOR MEMPERTIMBANGKAN BEBAN NONLINEAR MENGGUNAKAN *PARTICLE SWARM OPTIMIZATION*” adalah benar karya saya dengan arahan dari komisi pembimbing (Dr. Ikhlas Kitta, S.T., M.T. dan Dr. Ir. Zaenab, M.T.). Karya ilmiah ini belum diajukan dan tidak sedang diajukan dalam bentuk apa pun kepada perguruan tinggi mana pun. Sumber informasi yang berasal atau dikutip dari karya yang diterbitkan maupun tidak diterbitkan dari penulis lain telah disebutkan dalam teks dan dicantumkan dalam Daftar Pustaka tesis ini. Sebagian dari isi tesis ini telah dipublikasikan di Prosiding 2023 International Conference on Advanced Mechatronics, Intelligent Manufacture and Industrial Automation (ICAMIMIA) sebagai artikel dengan judul “*Allocation of Reactive Power with Capacitor Bank Placement Considering the Use of Nonlinear Loads Using Particle Swarm Optimization*”.

Dengan ini saya melimpahkan hak cipta dari karya tulis saya berupa tesis ini kepada Universitas Hasanuddin.

Gowa, 17 Januari 2024

Yang menyatakan

A 1000 Indonesian Rupiah postage stamp with a signature over it. The stamp features the Garuda Pancasila emblem and the text 'METERAL TEMPEL' and '5FFFAALX081940389'.

Nur Naningsi



KATA PENGANTAR

Alhamdulillah, segala puji syukur penulis panjatkan kehadirat Allah Subhanahu Wa Ta'ala atas segala rahmat dan karunia-Nya yang Allah berikan sehingga penulisan tesis ini dapat diselesaikan. Tak lupa pula shalawat dan salam semoga tetap tercurahkan kepada Nabi Muhammad Shallallahu 'alaihi wasallam, yang telah menyinari dunia ini dengan keindahan ilmu dan akhlak yang diajarkan kepada seluruh umatnya dan sebaik-baik tauladan bagi yang mengharapkan rahmat dan hidayah-Nya.

Bukan hal yang mudah untuk mewujudkan gagasan-gagasan yang terdapat dalam penulisan tesis ini, berkat bimbingan, arahan dan motivasi berbagai pihak maka tesis ini bisa disusun sebagaimana kaidah-kaidah yang dipersyaratkan, dan untuk itu penulis menyampaikan terimakasih kepada:

1. Kedua orang tua, bapak tercinta Mansyur Bella dan ibunda tercinta Nurhayati, terima kasih atas segala doa, kasih sayang, bimbingan dan dukungannya yang tak henti-henti selama saya menempuh pendidikan. Kalian merupakan anugerah terindah yang Allah Subhanahu wa ta'ala hadiahkan dalam hidup saya. Semoga anak mu ini bisa menjadi anak yang terus membanggakan dan membahagiakan kalian di dunia dan akhirat. Serta penghargaan yang besar juga saya sampaikan kepada kakak-kakak dan seluruh keluarga atas segala doa, motivasi dan dukungan yang tak ternilai.
2. Bapak Dr. Ikhlas Kitta, S.T., M.T., sebagai pembimbing utama dan Ibu Dr. Ir. Zaenab, M.T., sebagai pembimbing pendamping yang telah meluangkan waktu untuk membimbing, mengarahkan, memberikan masukan dan ilmunya dengan penuh rasa sabar dan tanggungjawab dalam penyelesaian tesis ini.
3. Bapak Dr. Yusran, S.T., M.T., Bapak Dr. Eng. Ir. Wardi, S.T., M.Eng. dan Bapak Muh. Anshar, S.T., M.Sc, (Research), Ph.D., sebagai penguji yang telah memberikan banyak arahan, masukan dan ilmunya dengan penuh rasa tanggungjawab dalam penyelesaian tesis ini.

Rektor Universitas Hasanuddin dan Dekan Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin serta Ketua Program Studi Magister (S2) Teknik Elektro



Universitas Hasanuddin yang telah memfasilitasi saya menempuh program magister serta seluruh dosen dan staf Departemen Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin.

5. Segenap staf PLN ULP Sungguminasa yang telah mengizinkan dan memberikan saya kesempatan untuk melakukan pengambilan data sesuai dengan kebutuhan saya dalam penelitian ini.
6. Teman-teman seperjuangan Program Magister Teknik Elektro Universitas Hasanuddin angkatan 2019 terkhusus program studi Teknik Energi yang telah banyak membantu dalam perkuliahan, administrasi dan lain-lain. Terima kasih juga atas kerjasamanya yang baik selama ini.
7. Kepala Dinas Lingkungan Hidup Kota Palopo yang selalu memberi dukungan dan motivasi. Serta teman-teman seperjuangan Best9 Dinas Lingkungan Hidup Kota Palopo yang telah membantu, mendoakan dan memberikan dukungan yang luar biasa

Akhir kata penulis memohon maaf yang sebesar-besarnya atas segala kesalahan yang penulis buat, baik yang disengaja maupun tidak disengaja selama berkuliah di Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin. Semoga Allah subhana wa ta'ala mengampuni segala kesalahan kita semua. Semoga segala sesuatu yang telah dihasilkan dalam pelaksanaan tesis ini dapat bermanfaat buat kita semua.

Penulis
NUR NANINGSI



ABSTRAK

NUR NANINGSI. Optimasi Penempatan Kapasitor Mempertimbangkan Beban Nonlinear Menggunakan *Particle Swarm Optimization* (dibimbing oleh **Ikhlas Kitta, Zaenab**).

Sistem kelistrikan merupakan komponen vital dalam mendukung keberlanjutan operasional berbagai fasilitas, termasuk Unit Layanan Pelaksana (ULP) yang dioperasikan oleh PT. PLN (Persero) di Indonesia. Ketersediaan daya yang optimal dan efisien menjadi kunci untuk memastikan kelancaran aktivitas sehari-hari. Beban nonlinear, yang semakin umum dalam lingkungan modern, menimbulkan tantangan baru terkait optimalisasi sistem distribusi daya. Penelitian ini bertujuan untuk mengoptimalkan penempatan kapasitor dalam sistem kelistrikan pada *feeder* IPDN-BAROMBONG ULP Sungguminasa 165-bus sistem distribusi radial dengan mempertimbangkan penggunaan beban nonlinear yang mampu membangkitkan penyebaran distorsi harmonisa. Metode Particle Swarm Optimization (PSO) diadopsi sebagai alat optimasi, yang dapat menyesuaikan diri dengan kondisi sistem uji. Pendekatan ini memungkinkan peningkatan efisiensi energi dan pengurangan rugi daya melalui penempatan yang tepat dan optimal dari kapasitor dalam jaringan distribusi. Penelitian ini melibatkan pemodelan matematis dari karakteristik beban nonlinear dan formulasi masalah optimasi. PSO diimplementasikan untuk mencari solusi optimal dengan mempertimbangkan parameter sistem dan kendala teknis menggunakan pemrograman MATLAB 2018b. Adapun fungsi tujuan berupa meminimalkan total rugi rugi daya (losses) dan meminimalkan % THDv yang diuji dengan beberapa scenario untuk melihat efektivitas metode yang diusulkan. Hasil simulasi menunjukkan bahwa pendekatan ini mampu menghasilkan konfigurasi penempatan kapasitor dengan scenario yang telah ditentukan mampu meningkatkan level tegangan bus hingga 0.254%, menurunkan total losses hingga 8.85% dan menurunkan rata rata %THDv hingga 0.566%. Hasil penelitian ini diharapkan dapat menjadi pedoman untuk peningkatan performa sistem kelistrikan serupa dengan mempertimbangkan aspek-aspek penting dalam pengoperasian sistem distribusi tenaga listrik.

Kata kunci: Beban Nonlinear, Kapasitor, PSO, %THDv, ULP Sungguminasa



ABSTRACT

NUR NANINGSI. *Optimal Placement of Capacitor Consider Nonlinear Load Using Particle Swarm Optimization* (supervised by **Ikhlas Kitta, Zaenab**).

The electrical system is a vital component in supporting the operational sustainability of various facilities, including the Unit Layanan Pelaksana (ULP) operated by PT. PLN (Persero) in Indonesia. The availability of optimal and efficient power is crucial to ensure the smooth daily activities. Nonlinear loads, increasingly common in the modern environment, pose new challenges related to the optimization of power distribution systems. This research aims to optimize the capacitor placement in the electrical system on the IPDN-BAROMBONG feeder of the ULP Sungguminasa 165-bus radial distribution system, considering the use of nonlinear loads capable of generating harmonic distortion spread. Particle Swarm Optimization (PSO) method is adopted as the optimization tool, which can adapt to the test system conditions. This approach allows for improved energy efficiency and reduction of power losses through the precise and optimal placement of capacitors in the distribution network. The research involves the mathematical modeling of nonlinear load characteristics and optimization problem formulation. PSO is implemented to find the optimal solution, considering system parameters and technical constraints using MATLAB 2018b programming. The objective functions are to minimize total power losses and minimize % THDv, tested with several scenarios to assess the effectiveness of the proposed method. Simulation results indicate that this approach can generate capacitor placement configurations with predefined scenarios that can increase bus voltage levels by up to 0.254%, reduce total losses by 8.85%, and decrease the average %THDv by 0.566%. The findings of this research are expected to serve as a guideline for improving the performance of similar electrical systems, taking into account crucial aspects in the operation of power distribution systems.

Keyword: Nonlinear Load, Capacitor, PSO, %THDv, ULP Sungguminasa



DAFTAR ISI

| | <u>Halaman</u> |
|--|----------------|
| HALAMAN JUDUL | i |
| PENGAJUAN TESIS | ii |
| PERSETUJUAN TESIS | iii |
| PENGAJUAN KEASLIAN TESIS | iv |
| KATA PENGANTAR | v |
| ABSTRAK | vii |
| ABSTRACK | viii |
| DAFTAR ISI | ix |
| DAFTAR TABEL | xi |
| DAFTAR GAMBAR | xii |
| DAFTAR LAMPIRAN | xiii |
| BAB I PENDAHULUAN | 14 |
| 1.1 Latar Belakang | 14 |
| 1.2 Rumusan Masalah..... | 17 |
| 1.3 Tujuan Penelitian | 17 |
| 1.4 Manfaat Penelitian | 17 |
| 1.5 Ruang Lingkup | 17 |
| BAB II TINJAUAN PUSTAKA | 19 |
| 2.1 <i>State of the Art</i> | 19 |
| 2.2 Beban Nonlinear | 21 |
| 2.3 Sistem Distribusi Radial | 24 |
| 2.4 Harmonisa | 25 |
| 2.4.1 Definisi Harmonisa | 25 |
| 2.4.2 Indeks Harmonisa | 27 |
| 2.4.3 Standar Harmonisa | 27 |
| 2.5 Kapasitor Bank | 28 |
| 2.6 Aliran Daya Harmonisa | 29 |
| 1 Metode <i>Forward/Backward Sweep</i> | 29 |
| 2 Metode <i>Harmonic Laod Flow</i> | 33 |
| icle Swarm Optimization | 37 |



| | |
|---|----|
| 2.7.1 Dasar <i>Particle Swarm Optimization</i> | 37 |
| 2.7.2 Ukuran Swarm | 39 |
| 2.7.3 Koefisien Akselerasi | 39 |
| 2.7.4 <i>Inertia Weight</i> | 39 |
| BAB III METODE PENELITIAN | 41 |
| 3.1 Teknik Pengumpulan Data | 41 |
| 3.1.1 Studi Literatur | 41 |
| 3.1.2 Pengumpulan Data | 41 |
| 3.1.3 Pemodelan dan Simulasi | 41 |
| 3.1.4 Dokumentasi | 41 |
| 3.2 Fungsi Tujuan (<i>Objective Function</i>) | 41 |
| 3.2.1 Minimum Rugi-Rugi Daya Saluran | 41 |
| 3.2.2 Minimum <i>Total Harmonic Distortion</i> | 42 |
| 3.3 Batasan (<i>Constrain</i>) | 42 |
| 3.3.1 <i>Bus Voltage Limit</i> | 42 |
| 3.3.2 <i>Total Harmonic Distortion</i> | 42 |
| 3.3.3 Kapasitas Kapasitor | 43 |
| 3.4 Integrasi Kapasitor Pada Jaringan Distribusi | 43 |
| 3.5 Data Sistem (<i>Object Data</i>) | 44 |
| 3.5.1 Sumber Harmonisa | 44 |
| 3.5.2 ULP Sungguminasa 165-bus | 45 |
| BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN | 63 |
| 4.1 Kondisi Injeksi Sumber Harmonisa | 63 |
| 4.2 Kondisi Optimasi Kapasitor Setelah Injeksi Sumber Harmonisa | 65 |
| BAB V KESIMPULAN DAN SARAN | 77 |
| 5.1 Kesimpulan | 77 |
| 5.2 Saran | 78 |
| DAFTAR PUSTAKA | 79 |
| LAMPIRAN | 82 |



DAFTAR TABEL

| | <u>Halaman</u> |
|--|----------------|
| Tabel 1 <i>State of the art</i> | 19 |
| Tabel 2 <i>Voltage distortion limits</i> | 28 |
| Tabel 3 <i>Curren distortion limit</i> | 28 |
| Tabel 4 Spektrum harmonisa beban nonlinear..... | 44 |
| Tabel 5 Tipe dan lokasi injeksi beban nonlinear | 45 |
| Tabel 6 Data saluran penyulang BAROMBONG-IPDN | 50 |
| Tabel 7 Data teknis penghantar AAAC tegangan 20 kV | 54 |
| Tabel 8 Data teknis penghantar XLPE berisolasi tegangan 12 / 20 kV | 55 |
| Tabel 9 Data teknis penghantar AAAC dan XLPE | 55 |
| Tabel 10 Data beban gardu distribusi penyulang BAROMBONG-IPDN | 56 |
| Tabel 11 Rugi-rugi daya saluran setelah injeksi arus harmonisa | 63 |
| Tabel 12 Parameter optimasi PSO | 67 |
| Tabel 13 Hasil simulasi optimasi pada skenario pertama | 68 |
| Tabel 14 Perbandingan rugi-rugi daya saluran pada seluruh studi <i>case</i> pada skenario 1..... | 69 |
| Tabel 15 Hasil simulasi optimasi pada skenario kedua | 72 |
| Tabel 16 Perbandingan rugi-rugi daya saluran pada seluruh studi <i>case</i> pada skenario 2 | 73 |



DAFTAR GAMBAR

| | <u>Halaman</u> |
|--|----------------|
| Gambar 1 Jenis beban nonlinear..... | 22 |
| Gambar 2 Gelombang arus dan tegangan pada beban non linier | 22 |
| Gambar 3 Bentuk gelombang terdistorsi | 23 |
| Gambar 4 Sistem distribusi radial | 25 |
| Gambar 5 Gelombang nonlinear dengan menambahkan beberapa orde harmonisa dengan frekuensi <i>fundamental</i> | 26 |
| Gambar 6 <i>Single line diagram</i> sistem distribusi radial 6-bus | 30 |
| Gambar 7 Flowchart <i>forward-backward sweep</i> pada sistem distribusi radial..... | 32 |
| Gambar 8 <i>Single line diagram distorted</i> sistem distribusi radial 6-bus | 33 |
| Gambar 9 Flowchart <i>harmonic load flow - forward backward sweep</i> | 36 |
| Gambar 10 Penentuan lokasi DG dan kapasitor pada sistem distribusi | 43 |
| Gambar 11 <i>Single line diagram</i> Penyulang Barombong-IPDN | 46 |
| Gambar 12 Denah lokasi penyulang Barombong | 48 |
| Gambar 13 Denah lokasi penyulang IPDN | 49 |
| Gambar 14 Diagram alir pelaksanaan penelitian | 61 |
| Gambar 15 Nilai level tegangan bus setelah injeksi arus harmonisa | 64 |
| Gambar 16 Nilai %THDv setelah injeksi arus harmonisa | 65 |
| Gambar 17 Tampilan <i>GUI</i> MATLAB R2018b | 66 |
| Gambar 18 Perbandingan level tegangan bus pada skenario 1 | 70 |
| Gambar 19 Perbandingan nilai %THDv pada skenario 1 | 71 |
| Gambar 20 Perbandingan level tegangan bus pada skenario 2 | 74 |
| Gambar 21 Perbandingan nilai %THDv pada skenario 2 | 75 |



DAFTAR LAMPIRAN

| | <u>Halaman</u> |
|--|----------------|
| Lampiran 1 <i>Forward Backwar Sweep Method and Harmonic Load Flow</i> | 82 |
| Lampiran 2 <i>Particle Swarm Optimization</i> | 102 |



BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Perkembangan teknologi untuk menunjang kehidupan dan peningkatan populasi manusia menyebabkan meningkatnya kebutuhan energi listrik. Kualitas daya listrik merupakan permasalahan yang terdapat pada sistem distribusi tenaga listrik. Khususnya sistem distribusi tenaga listrik yang ada di Indonesia menggunakan sistem distribusi radial karena pengoperasiannya sangatlah sederhana. Jaringan sistem distribusi radial merupakan jaringan sistem distribusi berkontruksi loop terbuka dengan aliran listrik di salurkan secara radial melalui gardu induk ke beban. Sistem ini merupakan sistem yang paling sederhana dan ekonomis, karena berdasarkan konstruksinya sistem ini menggunakan komponen listrik yang minimum. Tetapi disisi lain, tipe jaringan ini kurang handal karena penyaluran daya listrik hanya dilakukan melalui satu saluran utama saja. Ketika gangguan terjadi di salah satu bus atau saluran maka akan menghambat penyebaran aliran daya listrik ke saluran lainnya (Suyanto et al., 2018).

Beban listrik terbagi menjadi dua yaitu beban listrik linier (resistor, kapasitor dan induktor) dan beban listrik nonlinier. Beban nonlinear yang dimaksud berupa peralatan elektronika daya, perangkat busur listrik, mesin mesin listrik dinamis, lampu *fluorescent* dan beban perumahan dengan catu daya *switchmode* seperti computer, printer dll (E.F.Fauchs, 2008). Penggunaan beban listrik nonlinear menyebabkan adanya arus yang tidak sinusoidal meskipun gelombang tegangan yang dipakai gelombang tegangan sinusoidal murni. Gelombang ini menyebabkan terjadinya penyebaran harmonisa yang tinggi pada sistem kelistrikan distribusi yang berdampak kerugian dalam penyebaran energi listrik dan kerusakan pada peralatan. Harmonik dapat menyebabkan perangkat operasi tidak berfungsi, kerugian tambahan berupa penuaan (*aging*) pada kapasitor, transformator, saluran transmisi dan mesin yang berputar, peningkatan in pada motor, gangguan telepon atau menyebabkan resonansi seri dan Denyal et al., 2013).



Metode aliran daya harmonisa digunakan untuk mengetahui dan menganalisis penyebaran dan besar harmonisa pada sistem distribusi tipe radial. Analisis aliran daya harmonisa diperlukan untuk mengetahui dan menganalisa penyebaran dan besar harmonisa pada sistem. Penyebaran harmonisa dalam sistem distribusi radial dapat dianalisa dengan menggunakan metode analisis aliran daya *backward-forward sweep* pada sistem distribusi radial serta *Harmonic Load Flow* (HLF). Analisis aliran daya *backward-forward sweep* digunakan untuk mendapatkan profil tegangan pada tiap bus serta rugi-rugi daya pada frekuensi fundamental, sedangkan HLF digunakan untuk mendapatkan profil tegangan harmonisa pada tiap bus tiap ordenya, serta rugi-rugi daya harmonisa yang disebabkan oleh pemasangan beban non-linear/sumber harmonisa (J.H.Teng dan C.Y.Chang, 2007).

Keberadaan peralatan kompensasi daya reaktif berupa kapasitor merupakan sebuah upaya meningkatkan kualitas daya. Selain memperbaiki tingkat tegangan, mengurangi atau mereduksi rugi-rugi daya pada saluran (*losses*) dan biaya operasional juga dinilai mampu mengurangi penyebaran harmonisa dengan cara menempatkan lokasi dan ukuran yang optimal secara terdistribusi atau dengan kata lain keberadaan kapasitor dapat membantu meningkatkan performa kinerja dari sistem distribusi. Meskipun teknik penempatan lokasi dan ukuran kapasitor bank yang optimal cukup menjanjikan tetapi perbaikan yang dilakukan belum maksimal. Hal ini dikarenakan sistem distribusi radial masih bersifat pasif. Akan tetapi keberadaan kapasitor yang tidak optimal pada sistem dapat meningkatkan distorsi harmonisa dikarenakan adanya resonansi antara kapasitor dan beban beban yang bersifat induktif (Abdelsalam dan M.E. El-Hawary, 2010).

Sistem distribusi yang lebih cerdas diharapkan dapat mendorong kualitas daya yang baik ke sistem. Namun, kasus ini merupakan permintaan yang rumit dan kompleks untuk dipertahankan sesuai dengan kebutuhan dan peningkatan beban yang ada. Terlebih dengan penggunaan peralatan semikonduktor ataupun proses *switching* yang semakin meningkat dengan cepat dikarenakan efisiensi

gi serta kemudahan pengoperasian serta pengontrolannya (P. Bagheri et



Perencanaan terkoordinasi merupakan kegiatan perencanaan untuk mengkoordinasikan kegiatan optimasi sebelumnya. Perencanaan yang tidak optimal menyebabkan fungsi tujuan yang hendak dicapai tidak akan terpenuhi bahkan bisa memperburuk kondisi sistem. Setiap kegiatan perencanaan terkoordinasi tersebut merupakan sebuah persoalan optimasi dimana setiap optimasi memiliki fungsi objektif tunggal (*single*) maupun jamak (*multi*) untuk memenuhi kendala-kendala (*constrains*) yang ditetapkan. Perencanaan terkoordinasi menghasilkan sebuah strategi terbaik melalui sejumlah kombinasi alternatif yang mungkin baik secara simultan (*simultaneously*) yang diselesaikan melalui pemodelan aliran daya optimal yang dilanjutkan ke analisis aliran daya harmonisa. Adanya perencanaan optimasi diharapkan mampu memperbaiki sebuah permasalahan yang hendak dipecahkan. Perencanaan yang memiliki beberapa fungsi tujuan merupakan sebuah permasalahan yang kompleks yang bersifat kombinatorial sehingga dibutuhkan sebuah metode yang menjadi sebuah terobosan untuk memecahkan persoalan yang lebih baik dan cepat dibandingkan penelitian yang telah ada sebelumnya (S.Jazebi dan B.Vahidi, 2012).

Penyelesaian permasalahan optimasi banyak menggunakan beberapa metode, baik metode numerik, analitis matematik ataupun berbasis kecerdasan buatan. Metode optimasi berbasis kecerdasan buatan (*Artificial Intelligence (AI)*) dan lainnya telah banyak digunakan dalam sejumlah penelitian serta di analisis efek yang ditimbulkan (Faraby, 2018). Metode *Particle Swarm Optimization (PSO)* merupakan salah satu metode optimasi berbasis kecerdasan buatan. Metode ini dinilai mampu memberikan solusi optimal dalam berbagai permasalahan yang bersifat kombinatorik (F.Haz, 2019).

Sesuai dengan penjabaran diatas, penelitian ini akan membahas tentang Penentuan Letak dan Ukuran Kapasitor Bank pada sistem distribusi radial untuk memperbaiki kualitas daya listrik khususnya harmonisa. Penentuan kapasitor bank yang optimal menggunakan metode PSO yang divalidasi pada sistem distribusi radial ULP Sungguminasa dengan mempertimbangkan pengaruh penggunaan nlinear untuk memperbaiki kualitas daya.



1.2 Rumusan Masalah

Adapun rumusan masalah yang akan dibahas pada penelitian ini adalah:

1. Bagaimanakah pengaruh penggunaan beban nonlinear pada sistem distribusi radial.
2. Bagaimanakah merancang program untuk menentukan lokasi dan ukuran kapasitor bank pada sistem distribusi radial menggunakan metode PSO.
3. Bagaimanakah dampak penentuan letak dan ukuran kapasitor bank terhadap penurunan rugi rugi daya saluran dan harmonisa pada sistem distribusi radial.

1.3 Tujuan Penelitian

Adapun tujuan yang hendak dicapai pada penelitian ini adalah:

1. Mengetahui pengaruh beban nonlinear terhadap timbulnya penyebaran harmonisa pada sistem distribusi radial.
2. Menerapkan metode PSO untuk menentukan letak dan ukuran kapasitor bank pada sistem distribusi radial.
3. Menentukan letak dan ukuran kapasitor bank pada sistem distribusi radial paling efisien untuk menurunkan rugi rugi daya saluran dan harmonisa.

1.4 Manfaat Penelitian

Relevansi atau manfaat dari penelitian ini adalah hasil analisa dan evaluasi dari dampak penentuan letak dan ukuran kapasitor bank yang dapat digunakan sebagai alternatif solusi bagi operator sistem tenaga listrik dalam hal ini PT. PLN (Persero) untuk mengurangi rugi rugi daya saluran dan memperbaiki kualitas daya listrik dalam hal mengurahi penyebaran harmonisa pada sistem distribusi radial.

1.5 Ruang Lingkup

Adapun ruang lingkup dalam penelitian ini yaitu:

1. Menggunakan sistem kelistrikan distribusi 20 kV ULP Sungguminasa dalam keadaan fasa seimbang.



2. Fungsi objektif yang digunakan dalam melakukan proses optimasi menggunakan PSO yaitu minimum rugi rugi daya saluran dan minimum %THDv.
3. Data sumber harmonisa pada sistem didapatkan dari data referensi.
4. Menggunakan software MATLAB R2018b untuk simulasi program.



BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 *State of the Art*

Dalam penelitian ini disertakan beberapa publikasi international penelitian sebelumnya yang terkait dengan judul pada penelitian ini. Adapun publikasi-publikasi tersebut diperlihatkan pada Table 1 dibawah ini.

Tabel 1 *State of the art*

| No | Judul | Tahun | Metode | Hasil Penelitian | Signifikansi Penelitian |
|----|--|-------|--|---|--|
| 1 | <i>Optimal Capacitor Placement and Sizing in Unbalance Distribution System with Harmonic Consideration Using Particle Swarm Optimization</i> | 2010 | <i>Hybrid PSO</i> | Kombinasi <i>Radial Distribution Power Flow Algorithm</i> (RDPF) yang dikombinasikan dengan Diskrit-PSO untuk membentuk algoritma Hybrid-PSO. | Metode hybrid PSO di uji pada sistem distribusi radial IEEE 13 bus dinilai mampu mengoptimalkan penempatan letak dan ukuran kapasitor bank dan menghindari kemungkinan terburuk akan penyebaran harmonisa. |
| 2. | <i>Capacitor Placement by NSGA-II in Distribution System with non-Linear Loads</i> | 2016 | <i>Multi objective optimization Non Dominated Sorting Genetic Algorithm (NSGA)</i> | Metode NSGA meminimalkan biaya (<i>Net Present Value</i>), meminimalkan deviasi tegangan dan <i>THD voltage</i> untuk menentukan lokasi dan ukuran kapasitor yang optimal untuk | Optimasi kapasitor bank menggunakan metode NSGA dinilai mampu meningkatkan indeks kualitas daya pada IEEE 33 bus. |



| | | | | | |
|---|--|------|-------------------------------|---|---|
| | | | | sistem dengan beban <i>nonlinear</i> . | |
| 3 | <i>Optimal Capacitor Placement in Distorted Distribution Network with different load models using Penalty Free Genetic Algorithm</i> | 2016 | <i>Penalty Free-GA</i> | Penentuan letak dan ukuran kapasitor dalam mencari minimum biaya dan peningkatan kualitas daya. | Hasil optimal dalam mencari fungsi tujuan menggunakan metode FA yang diuji pada IEEE 33 bus, 69 bus dan 108 bus. |
| 4 | <i>Coordinated Planning in Improving Power Quality in Radial Distribution System</i> | 2021 | PSO | PSO mampu menentukan letak dan ukuran kapasitor dalam mereduksi penyebaran harmonisa. | Penentuan ukuran kapasitor sebesar 50 kVar yang ditempatkan pada 4 titik bus mampu mengurangi rugi rugi daya saluran sebesar 7.22 kW dan mereduksi nilai %THDv. |
| 5 | <i>Design of harmonic control and reactive power compensation scheme in a pipe fitting factory</i> | 2021 | <i>Genetic Algorithm (GA)</i> | Desain kontrol harmonik dan kompensasi daya reaktif berupa kapasitor bank menggunakan metode GA | Teknik optimasi ini diuji pada pabrik fitting pipa memberikan hasil yang efisien dalam menjamin kualitas dan keandalan sistem. |
| 6 | <i>Qualitfication and Optimization of the Capacitor Position</i> | 2022 | <i>Genetic Algorithm (GA)</i> | Algoritma genetika (GA - <i>Genetic Algorithm</i>) untuk memilih posisi dan kapasitas kapasitor, | Efektivitas metode yang diusulkan sangat berpengaruh terhadap nilai kualitas tegangan dan rugi rugi daya harmonisa pada |



| | | | | | |
|---|--|------|-------------------------------|---|---|
| | <i>Harmonics by genetic Algorithm</i> | | | mengurangi harmonisa sebagai solusi optimal untuk membantu memecahkan masalah praktis dalam operasi jaringan. | jaringan distribusi lokal. |
| 7 | <i>Design and Analysis of a Proposed Multistage Capacitor Bank Compensation Scheme</i> | 2022 | <i>Genetic Algorithm (GA)</i> | Studi ini merupakan penyelidikan tentang keefektifan penggunaan kapasitor bank bertingkat untuk kompensasi sistem tenaga tanpa mengorbankan peralatan yang ada. | Desain validasi praktis dan pemodelan sistem dari skema kompensasi bank kapasitor multistage yang diusulkan menyajikannya sebagai solusi menyeluruh yang ditingkatkan untuk kompensasi beban daya reaktif yang efektif dan hemat biaya. |

2.2 Beban Non Linear

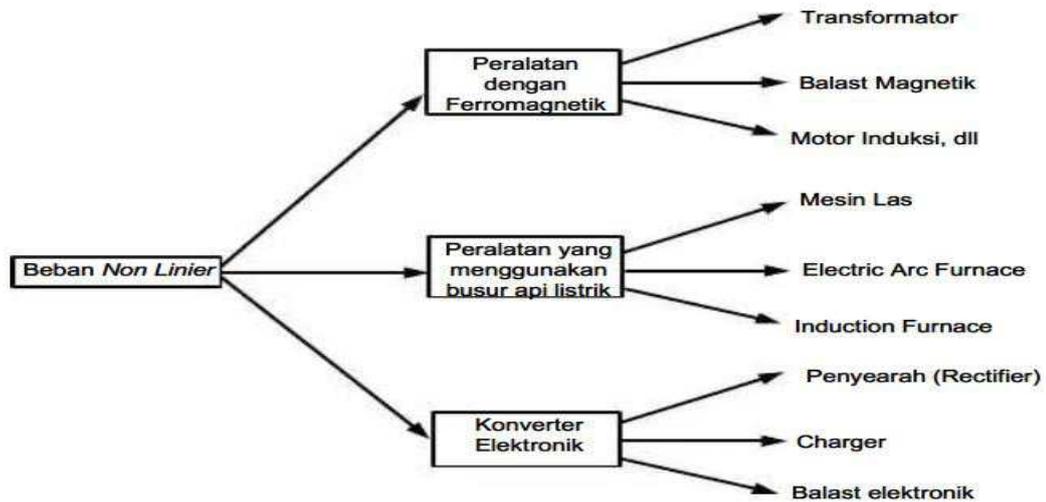
Beban listrik terbagi menjadi dua yaitu beban listrik linear (resistor, kapasitor dan induktor) dan beban listrik nonlinear. Beban nonlinear yang dimaksud berupa peralatan elektronika daya, perangkat busur listrik, mesin mesin listrik dinamis, lampu *fluorescent* dan beban perumahan dengan catu daya *switchmode* seperti computer, printer dll (E.F.Fauchs, 2008).

Beban non linear adalah beban yang impedansinya tidak konstan dalam setiap periode tegangan masukan. Dengan impedansinya yang tidak konstan, arus yang dihasilkan tidaklah berbanding lurus dengan tegangan yang diberikan, sehingga beban non linear tidaklah mematuhi Hukum Ohm yang menyatakan arus berbanding lurus dengan tegangan. Gelombang arus yang dihasilkan oleh beban nonlinear tidak sama dengan bentuk gelombang tegangan



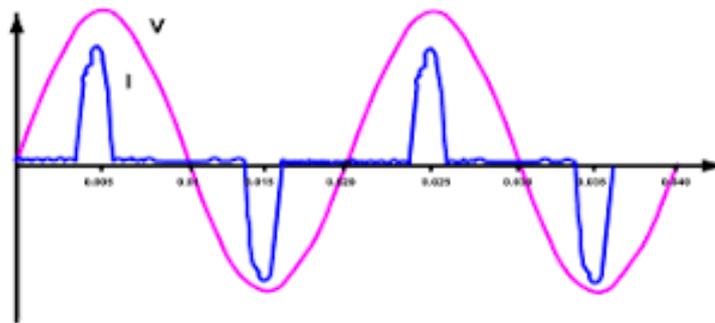
sehingga terjadi cacat (distorsi). Dengan meluasnya pemakaian beban non linear, gelombang sinusoidal ini dapat mengalami distorsi.

Pada Gambar 1 berikut ini adalah beberapa contoh beban non linear untuk keperluan rumah tangga maupun industri.



Gambar 1 Jenis beban nonlinear (Alit Angga Widiantara, 2016)

Beban non linier bentuk gelombang keluarannya tidak sebanding dengan tegangan dalam setiap setengah siklus, sehingga bentuk gelombang arus maupun tegangan keluarannya tidak sama dengan gelombang masukannya (mengalami distorsi). Beban non linier pada umumnya merupakan peralatan elektronik yang didalamnya banyak terdapat komponen semikonduktor, dimana dalam proses kerjanya berlaku sebagai saklar yang bekerja pada setiap siklus gelombang dari sumber tegangan. Proses kerja ini akan menghasilkan gangguan atau distorsi gelombang arus yang tidak sinusoidal (Dermawan et al., 2016).



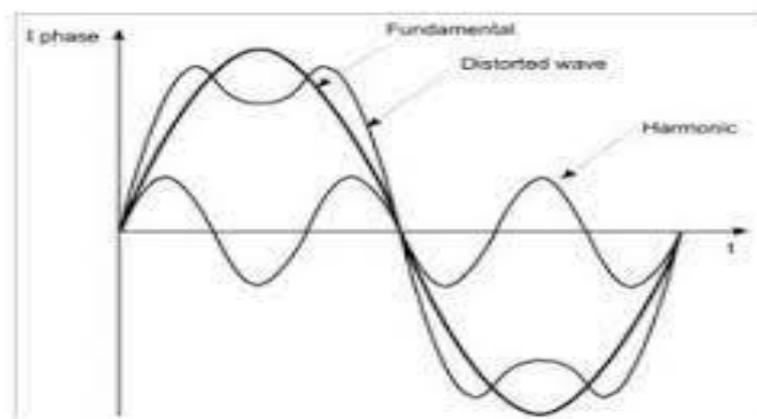
ur 2 Gelombang arus dan tegangan pada beban nonlinear ((F. Suryatmo, 1992)



Penggunaan beban listrik nonlinear menyebabkan adanya arus yang tidak sinusoidal meskipun gelombang tegangan yang dipakai gelombang tegangan sinusoidal murni. Gelombang ini menyebabkan terjadinya penyebaran harmonisa yang tinggi pada sistem kelistrikan distribusi yang berdampak kerugian dalam penyebaran energi listrik dan kerusakan pada peralatan. Harmonik dapat menyebabkan perangkat operasi tidak berfungsi, kerugian tambahan berupa penuaan (*aging*) pada kapasitor, transformator, saluran transmisi dan mesin yang berputar, peningkatan kebisingan pada motor, gangguan telepon atau menyebabkan resonansi seri dan parallel (Denyal et al., 2013).

Harmonisa akan disebabkan dengan adanya arus beban non-linier yang impedansinya tidak konstan dalam setiap periode akan tegangan masukannya dengan arus yang dihasilkan tidak bisa berbanding lurus dengan tegangan yang diperoleh. Sehingga nanti beban-beban non-linier tidak mematuhi dan mengikuti Hukum Ohm yang menetapkan arus berbanding lurus dengan tegangan yang di hasilkan (Merta et al., 2017).

Sebagai contoh frekuensi dasar dari sistem kelistrikan di Indonesia adalah 50 Hz, maka urutan harmonisa keduanya adalah gelombang dengan frekuensi 100 Hz, harmonisa ketiga dengan frekuensi 150 Hz dan seterusnya. Gelombang harmonisa ini akan berkombinasi dengan gelombang dasarnya, sehingga terbentuk gelombang cacat yang merupakan penjumlahan antara gelombang dasar dengan gelombang harmoniknya seperti pada gambar 3.



Gambar 3 Bentuk gelombang terdistorsi (Elvinda J.R, 2015)



Kecendrungan penggunaan beban-beban elektronika dalam jumlah besar akan menimbulkan masalah yang tidak terelakkan sebelumnya. Berbeda dengan beban-beban listrik yang menarik arus sinusoidal (sebentuk dengan tegangan yang mensuplainya), beban-beban elektronik menarik arus dengan bentuk mensuplainya), beban-beban elektronik menarik arus dengan bentuk non sinusoidal walaupun disuplai oleh tegangan sinusoidal. Beban yang memiliki sifat ini disebut sebagai beban non linear sebagai beban non linear.

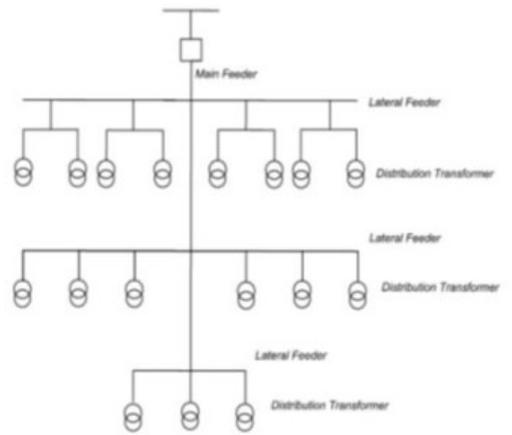
Beban *nonlinear* adalah peralatan yang menghasilkan gelombang-gelombang arus yang berbentuk sinusoidal berfrekuensi tinggi yang disebut dengan arus harmonisa. Arus harmonisa ini menimbulkan banyak implikasi pada peralatan sistem tenaga listrik. Misal rugi-rugi jaringan akan meningkat, pemanasan yang tinggi pada kapasitor, transformator, dan pada mesin-mesin listrik yang berputar serta kesalahan pada pembacaan alat ukur RMS.

2.3 Sistem Distribusi Radial

Sistem Distribusi listrik merupakan bagian dari sistem tenaga listrik yang menyalurkan tenaga listrik ke konsumen. Sistem Distribusi memiliki tegangan menengah dan tegangan rendah. Secara umum sistem distribusi terdiri dari dua tipe yaitu *loop* dan radial. Pada tugas akhir ini akan membahas mengenai sistem distribusi tipe radial. Sistem distribusi radial ditarik secara radial dari sumber dan bentuk aliran listriknya memiliki percabangan menuju ke titik beban. Konfigurasi sistem jaringan distribusi radial dapat dilihat pada Gambar 4 bentuk sistem radial ini nampak seperti percabangan pada pohon yang memiliki batang bercabang. Selain itu, sistem distribusi radial memiliki kelebihan bentuk yang sederhana dan biaya investasi murah. Namun, tipe sistem ini memiliki keandalan dan kualitas pelayanan daya yang kurang. Hal ini disebabkan karena penyaluran daya listrik hanya dilakukan pada saluran utama saja sehingga menyebabkan nilai rugi daya dan drop tegangan relatif besar pada tiap saluran (P.Kgori et al., 2022). Berdasarkan pernyataan tersebut, dibutuhkan solusi untuk mengatasi rugi-rugi daya agar penyaluran listrik di sistem distribusi radial menjadi semakin baik. Untuk dapat memiliki sistem penyaluran daya yang relatif kurang baik, sistem distribusi radial memerlukan pengoptimalan dengan metode untuk mengatasi rugi-



rugi daya dan drop tegangan pada saluran sehingga kualitas penyaluran daya terjaga dengan baik (T.Gonen, 2015).



Gambar 4 Sistem distribusi radial (T.Gonen, 2015)

2.4 Harmonisa

2.4.1 Definisi Harmonisa

Harmonisa adalah gangguan yang terjadi dalam sistem distribusi tenaga listrik yang disebabkan adanya distorsi gelombang arus dan tegangan. Distorsi gelombang arus dan tegangan ini disebabkan adanya pembentukan gelombang-gelombang dengan frekuensi kelipatan bulat dari frekuensi *fundamental*. Sumber sumber harmonik berasal dari penggunaan peralatan konverter, tanur busur listrik, transformator, mesin berputar dan lainnya.

Pengaruh negatif harmonisa dapat dikelompokkan menjadi dua, yaitu efek seketika (*instantaneous effects*) dan efek jangka panjang (*long-term effects*). Yang termasuk pada efek seketika, contohnya adalah gangguan pengoperasian kontroler pada sistem elektronika. Harmonisa juga dapat menyebabkan salah pembacaan (*misreading*) pada pengukuran besaran listrik. Gelombang terdistorsi pada saluran menimbulkan interferensi pada saluran komunikasi dan rangkaian kontrol atau monitoring. Sedangkan efek jangka panjang yang sering terjadi adalah *overheating*, misalnya pada kapasitor. Selain itu, *overheating* pada mesin-strik maupun transformator terjadi karena adanya rugi-rugi energi akibat harmonik. Pada kabel dan peralatan, rugi-rugi energi tambahan akan diberikan oleh bertambahnya nilai rms arus penyaluran daya yang sama dan



bertambahnya resistansi inti yang sebanding dengan bertambahnya frekuensi (karena *skin effect*) (Rizkytama et al., 2009)

Pada distorsi *harmonic* dan *interharmonic*, gelombang tegangan arus bolak balik tersebut tidak murni *sinusoidal* dengan kata lain terdistorsi. Berdasarkan *Fourier* gelombang tersebut dapat diuraikan menjadi beberapa gelombang *sinusoidal* dengan frekuensi yang lebih tinggi dari frekuensi fundamental. Pada distorsi *interharmonic*, gelombang distorsi terbentuk dari gelombang-gelombang *sinusoidal* dengan frekuensi kelipatan dari frekuensi gelombang *fundamental*, dengan kelipatan berupa bilangan pecahan. Sedangkan pada distorsi *harmonic*, gelombang distorsi terbentuk dari gelombang-gelombang *sinusoidal* dengan frekuensi kelipatan bilangan bulat dari frekuensi *fundamental* (C.Sankaran, 2002). Pembentukan gelombang terdistorsi harmonisa dapat dilihat pada Gambar 3. Persamaan frekuensi harmonik dapat ditulis sebagai berikut:

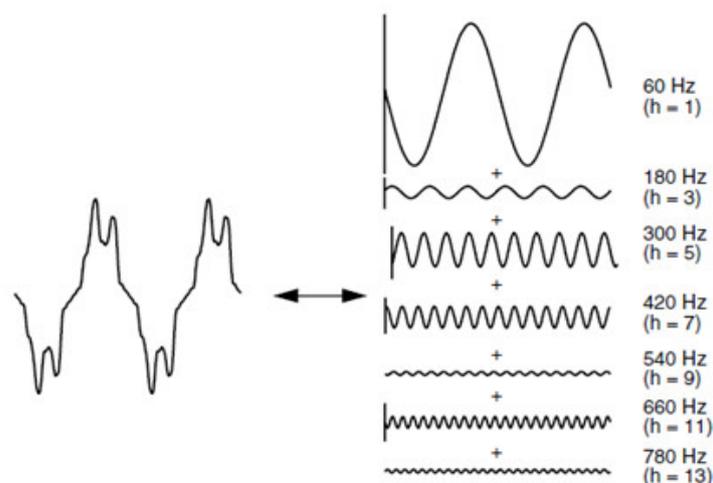
$$f_h = h \times f_a \quad (1)$$

dengan :

h = orde harmonisa

f_h = frekuensi harmonisa

f_a = frekuensi dasar/fundamental



5 Gelombang nonlinear dengan menambahkan beberapa orde harmonisa dengan frekuensi *fundamental* (C.Sankaran, 2002)



2.4.2 Indeks Harmonisa

Menurut *Institute of Electrical and Electronic Engineers* (IEEE), *Individual Harmonic Distortion* (IHD) adalah rasio antara nilai rms dari masing-masing arus harmonisa ke- h (I_h) dibandingkan dengan nilai rms arus *fundamental* atau harmonisa pertama (I_1). Berdasarkan metode ini, maka harmonisa pertama atau arus *fundamental* selalu bernilai 100%. Rumus perhitungan IHD menurut IEEE adalah sebagai berikut.

$$IHD_h = \frac{I_h}{I_1} \times 100\% \quad (2)$$

Total Harmonic Distortion current (THD_i) adalah rasio antara nilai rms dari seluruh komponen harmonisa arus (I_H) dan nilai rms dasar arus (I_1) yang dinyatakan dalam bentuk persen (%):

$$I_H = \sqrt{(I_2^2 + I_3^2 + I_4^2 + I_5^2 + I_6^2 + I_7^2 + \dots + I_n^2)} \quad (3)$$

$$THD_i = \frac{I_H}{I_1} \times 100\% \quad (4)$$

Total Harmonic Distortion voltage (THD_v) indeks yang umum digunakan adalah :

$$THD_v = \sqrt{\frac{\sum_{n=2}^n V_n^2}{V_1^2}} \quad (5)$$

Pendefinisian rasio nilai rms komponen harmonisa ke nilai rms komponen dasar biasanya dinyatakan dalam bentuk persen. Indeks ini digunakan untuk mengukur deviasi bentuk gelombang periodik yang mengandung harmonisa dari gelombang sinus sempurna. Nilai THD adalah nol pada saat terjadi gelombang sinus sempurna.



andar Harmonisa

V_{THD} adalah persentasi total tegangan yang terdistorsi oleh harmonisa frekuensi *fundamental* dan % I_{THD} adalah persentasi jumlah total arus

yang terdistorsi oleh harmonisa terhadap frekuensi *fundamental*. Standar harmonisa tegangan yang dipergunakan menurut IEEE Std. 519-1992, p.85. untuk *Voltage Harmonic Distortion* sebagai berikut :

Tabel 2 *Voltage distortion limits* (IEEE Std. 519-1992)

| <i>Bus Voltage at PCC</i> | <i>Individual Voltage Distortion I_{THD} (%)</i> | <i>Total Voltage Distortion V_{THD} (%)</i> |
|--|---|--|
| 69 kV and below | 3,0 | 5,0 |
| 69,001 kV through 161 Kv | 1,5 | 2,5 |
| NOTE: High-voltage systems can have up to 2,0% THD where the cause is an HVDC terminal that will attenuate by the time it is tapped for user | | |

Standar harmonisa arus yang dipergunakan menurut IEEE Std. 519-1992 yaitu untuk *Current Distortion Limits* sebagai berikut :

Tabel 3 *Current distortion limit* (IEEE Std 519-1992, 1993)

| <i>Maximum Harmonic Current Distortion in Percent of I_L Individual Harmonic Order (Odd Harmonics)</i> | | | | | | |
|---|------|------------------|------------------|------------------|-------------|------|
| ISC / I_L | <11 | $11 \leq h < 17$ | $17 \leq h < 23$ | $23 \leq h < 35$ | $35 \leq h$ | TDD |
| <20* | 4,0 | 2,0 | 1,5 | 0,6 | 0,3 | 5,0 |
| 20<50 | 7,0 | 3,5 | 2,5 | 1,0 | 0,5 | 8,0 |
| 50<100 | 10,0 | 4,5 | 4,0 | 1,5 | 0,7 | 12,0 |
| 100<1000 | 12,0 | 5,5 | 5,0 | 2,0 | 1,0 | 15,0 |
| >1000 | 15,0 | 7,0 | 6,0 | 2,5 | 1,4 | 20,0 |
| Even Harmonic are limited to 25% of the odd harmonic limits above Current distortions that result in a de offset, e.g., half wave converters, are not allowed. *All power generation equipment is limited to these values of current distortion, regardless of actual I_{sc}/I_L . Where : I_{sc} = maximum short circuit at PCC I_L = maximum demand load current (fundamental frequency component) at PCC | | | | | | |

2.5 Kapasitor Bank

Kapasitor merupakan komponen kompensator yang berfungsi untuk memperbaiki faktor daya, sebagai pengatur tegangan, maupun untuk mengurangi daya (P_{Loss}) dan drop tegangan (V_{drop}) pada jaringan. Fungsi lain dari bank adalah untuk mengkompensasi daya reaktif yang sekaligus kualitas tegangan dan juga meningkatkan efisiensi pada sistem dan um pemakaian kapasitor bank memberikan keuntungan antara lain:



1. Meningkatkan kemampuan pembangkitan generator.
2. Meningkatkan kemampuan penyaluran daya pada jaringan transmisi.
3. Meningkatkan kemampuan daya pada gardu-gardu distribusi.
4. Meningkatkan kemampuan feeder dan peralatan yang ada pada sistem distribusi.

Kapasitor tersusun dari unit standar yang dihubungkan seri atau paralel untuk memperoleh *rating* tegangan dan kVA yang diinginkan. Hal-hal yang dipertimbangkan dari kapasitor bank adalah :

1. Koefisien suhu dari komponen kapasitor
2. Daya reaktif per unit volume
3. Rugi-rugi daya
4. Keandalan
5. Harga

Kapasitor akan bekerja secara optimal jika jaringan yang beroperasi dalam kondisi tunak (*steady-state*). Akan tetapi dalam kasus yang lain, kapasitor menyebabkan masalah yang serius. Hal ini dikarenakan impedansi harmonisnya yang akan berkurang dengan meningkatnya frekuensi yang berakibat peningkatan distorsi arus yang dikonsumsi oleh beban (Z.O. Prabandaru et al., 2015).

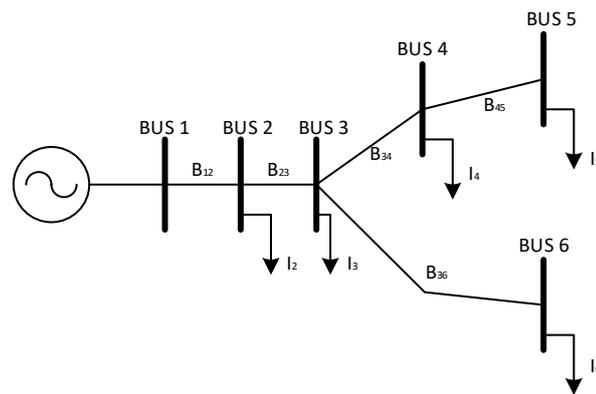
2.6 Aliran Daya Harmonisa

2.6.1 Metode *Forward/Backward Sweep*

a. *Backward Sweep*

Metode *backward-forward sweep* dipergunakan untuk persamaan aliran daya yang didasarkan pada dua buah matrik yaitu BIBC (*Bus Injection to Branch Current*) dan BCBV (*Branch Current to Bus Voltage*). [BIBC] adalah matrik relasi antara arus injeksi pada bus dengan arus pada cabang, sedangkan [BCBV] adalah matrik relasi antara arus cabang dengan tegangan bus (J.H. Teng dan C.Y. Chang, 2007). Untuk mempermudah perhitungan persamaan aliran daya dapat dilihat pada Gambar 6.





Gambar 6 Single line diagram sistem distribusi radial 6-bus (Aji Akbar Firdaus, 2016)

Penggunaan *Kirchhoff's law* (KCL) pada *backward sweep* dimulai dari bus ke 6 sampai dengan bus 1 pada Gambar 6 didapatkan arus injeksi $[B]$ sebagai berikut:

$$B_{36} = I_6$$

$$B_{45} = I_5$$

$$B_{34} = I_4 + I_5$$

$$B_{23} = I_3 + I_4 + I_5 + I_6$$

$$B_{12} = I_2 + I_3 + I_4 + I_5 + I_6$$

Persamaan $[B]$ dapat dituliskan dalam bentuk matriks BIBC (*Bus Injection to Branch Current*) yang merupakan matrik relasi antara arus cabang $[I]$ dengan $[B]$ pada bus sebagai berikut :

$$\begin{bmatrix} B_{12} \\ B_{23} \\ B_{34} \\ B_{45} \\ B_{36} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_2 \\ I_3 \\ I_4 \\ I_5 \\ I_6 \end{bmatrix}$$

$$[B] = [BIBC] * [I] \quad (6)$$

b. Forward Sweep

penggunaan KCL pada *forward sweep* didapatkan besar tegangan pada bus ke 2 sampai dengan bus 6 di menggunakan matrik relasi kedua. Dimulai dari bus 2 sampai dengan bus 6 di



$$V_2 = V_1 - B_{12} Z_{12}$$

$$V_3 = V_1 - B_{12} Z_{12} + B_{23} Z_{23}$$

$$V_4 = V_1 - B_{12} Z_{12} - B_{34} Z_{34}$$

$$V_5 = V_1 - B_{12} Z_{12} - B_{23} Z_{23} - B_{34} Z_{34} - B_{45} Z_{45}$$

$$V_6 = V_1 - B_{12} Z_{12} - B_{23} Z_{23} - B_{36} Z_{36}$$

maka *drop* tegangan dapat ditulis sebagai berikut ;

$$V_1 - V_2 = B_{12} Z_{12}$$

$$V_1 - V_3 = B_{12} Z_{12} + B_{23} Z_{23}$$

$$V_1 - V_4 = B_{12} Z_{12} + B_{23} Z_{23} + B_{34} Z_{34}$$

$$V_1 - V_5 = B_{12} Z_{12} + B_{23} Z_{23} + B_{34} Z_{34} + B_{45} Z_{45}$$

$$V_1 - V_6 = B_{12} Z_{12} + B_{23} Z_{23} + B_{36} Z_{36}$$

Persamaan di atas dapat ditulis dalam bentuk matrik BCBV (*Branch Current to Branch Voltage*) yaitu sebagai berikut :

$$\begin{bmatrix} V_1 - V_2 \\ V_1 - V_3 \\ V_1 - V_4 \\ V_1 - V_5 \\ V_1 - V_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{12} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ Z_{12} & Z_{23} & 0 & 0 & 0 \\ Z_{12} & Z_{23} & Z_{34} & 0 & 0 \\ Z_{12} & Z_{23} & Z_{34} & Z_{45} & 0 \\ Z_{12} & Z_{23} & 0 & 0 & Z_{36} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} B_{12} \\ B_{23} \\ B_{34} \\ B_{45} \\ B_{36} \end{bmatrix}$$

$$[\Delta V] = [BCBV] * [B] \quad (7)$$

di mana [BCBV] adalah matrik relasi antara tegangan bus $[\Delta V]$ dengan $[B]$.

Dengan mensubsidi persamaan (6) dan (7) didapatkan :

$$[\Delta V] = [BIBC] * [BCBV] * [I] \quad (8)$$

$$[\Delta V] = [DLF] * [I] \quad (9)$$

di mana [DLF] adalah matrik relasi antara *drop* tegangan dengan arus injeksi pada bus. Solusi aliran daya didapatkan dengan menggunakan proses iterasi, sehingga dapat ditulis sebagai berikut:

$$I_n = \left(\frac{P_n - jQ_n}{V_n} \right)^* \quad (10)$$

$$[\Delta V^{k+1}] = [DLV] * [I^k] \quad (11)$$

Nilai tegangan tiap bus dapat dihitung setelah dilakukan pembentukan ΔV dengan komponen matriks BIBC dan BCBV menurut persamaan



$$[V^{k+1}] = [V_0] - [\Delta V^{k+1}] \quad (12)$$

di mana $[V_0]$ merupakan nilai inisial tegangan bus. Proses iterasi berhenti ketika perbedaan mutlak antara injeksi arus bus iterasi sebelumnya dan injeksi arus bus iterasi saat ini kurang dari atau sama dengan toleransi yang ditentukan ϵ .

$$|I_i^{k+1} - I_i^k| \leq \epsilon \quad (13)$$

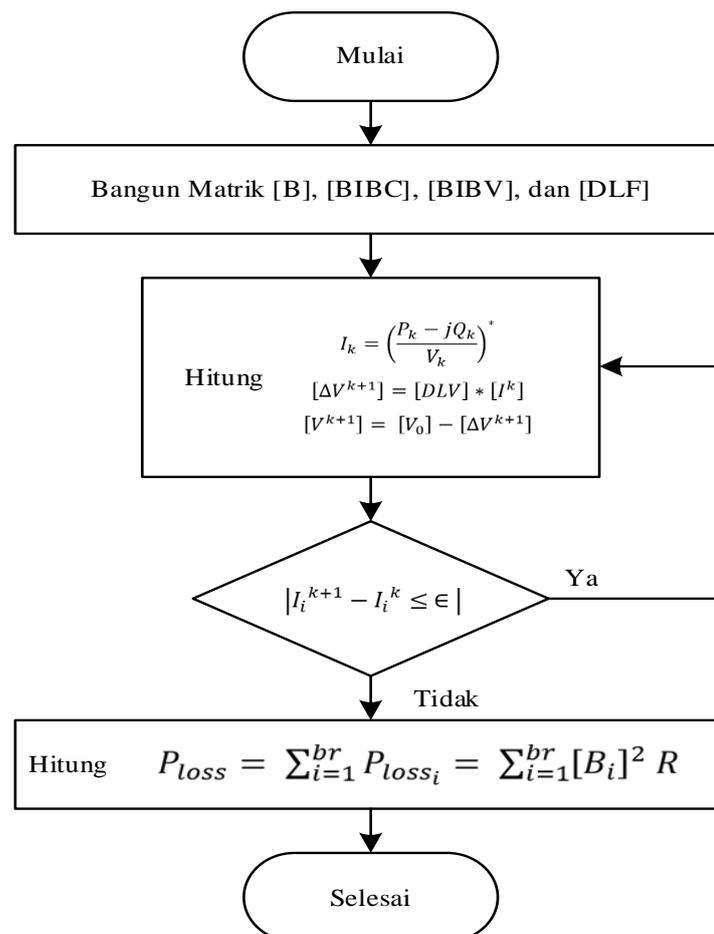
Sehingga, total rugi-rugi daya real dapat dihitung dengan persamaan berikut :

$$P_{loss} = \sum_{i=1}^{br} P_{loss_i} = \sum_{i=1}^{br} [B_i]^2 R \quad i = 1, 2, \dots, br \quad (14)$$

Persamaan rugi daya dapat dituliskan:

$$P_{Loss} = [R]^T * [BIBC] * [I]^2 \quad (15)$$

Dari uraian persamaan aliran daya *backward-forward sweep* pada RDS diatas dapat digambarkan pada flowchart algoritma pada Gambar 7.

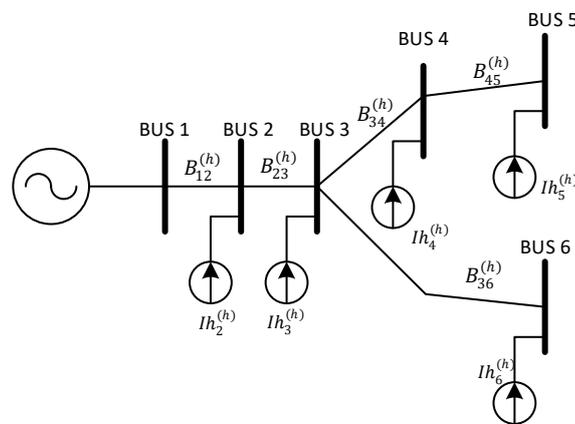


ar 7 Flowchart *forward-backward sweep* pada sistem distribusi radial



2.6.2 Metode *Harmonic Load Flow*

Algoritma *backward sweep* pada HLF digunakan untuk mendapatkan matriks $[A]$ yang mewakili hubungan antara arus cabang dan arus injeksi bus untuk urutan harmonisa ke- h . Sedangkan *forward sweep* menghasilkan matriks $[HA]$ yang mewakili hubungan antara tegangan bus harmonisa dan arus injeksi harmonisa bus. Untuk lebih jelasnya, algoritma aliran daya harmonisa, n -bus sistem distribusi radial ditunjukkan pada *single line diagram* pada Gambar 8 (Abdelsalam A et al., 2010) :



Gambar 8 *Single line diagram distorted* sistem distribusi radial 6-bus

(Abdelsalam A et al., 2010)

Pada Gambar 8, bus 1 diasumsikan sebagai generator dan dianggap sebagai *slack bus* dengan 5 beban. Arus harmonisa ke- h ($I_h^{(h)}$) yang disumbangkan oleh beban nonlinear pada Gambar 2.8 dapat dinyatakan sebagai berikut :

$$\left[I_h^{(h)} \right] = \left[I_{h2}^{(h)} + I_{h3}^{(h)} + I_{h4}^{(h)} + I_{h5}^{(h)} + I_{h6}^{(h)} \right] \quad (16)$$

a. *Backward Sweep HLF*

Untuk mendapatkan nilai arus yang mengalir pada cabang KCL digunakan pada *backward sweep* arus, sehingga:

$$B_{36}^{(h)} = I_{h6}^{(h)}$$

$$B_{34}^{(h)} = I_{h4}^{(h)} + I_{h5}^{(h)}$$

$$B_{23}^{(h)} = I_{h3}^{(h)} + I_{h4}^{(h)} + I_{h5}^{(h)}$$

$$B_{12}^{(h)} = I_{h2}^{(h)} + I_{h3}^{(h)} + I_{h4}^{(h)} + I_{h5}^{(h)} + I_{h6}^{(h)}$$



$$B_{12}^{(h)} = Ih_2^{(h)} + Ih_3^{(h)} + Ih_4^{(h)} + Ih_5^{(h)} + Ih_6^{(h)}$$

atau dapat ditulis dalam bentuk matriks sebagai berikut :

$$\begin{bmatrix} B_{12}^{(h)} \\ B_{23}^{(h)} \\ B_{34}^{(h)} \\ B_{45}^{(h)} \\ B_{36}^{(h)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} Ih_2^{(h)} \\ Ih_3^{(h)} \\ Ih_4^{(h)} \\ Ih_5^{(h)} \\ Ih_6^{(h)} \end{bmatrix}$$

$$[B^{(h)}] = [A^{(h)}] * [I^{(h)}] \quad (17)$$

Arus cabang yang mengalir antara bus $i - j$ adalah :

$$[B_{ij}^{(h)}] = [A_{ij}^{(h)}][I^{(h)}] \quad (18)$$

di mana $[A_{ij}^{(h)}]$ koefisien harmonisa dari cabang $(i - j)$ terhadap adanya arus harmonisa pada beban yang mengalir melewati cabang $(i - j)$.

Sedangkan besar *drop* tegangan cabang (1-2) pada konteks arus dan impedansi harmonisa ke- h adalah :

$$V_{12}^{(h)} = Z_{12}^{(h)} * B_{12}^{(h)} \quad (19)$$

Persamaan (2-19) diatas dapat dijabarkan sebagai berikut :

$$\Delta V_{12}^{(h)} = Z_{12}^{(h)} [A_{12}^{(h)}][I^{(h)}] = Z_{12}^{(h)} (Ih_2^{(h)} + Ih_3^{(h)} + Ih_4^{(h)} + Ih_5^{(h)} + Ih_6^{(h)}) \quad (20)$$

demikian juga dengan drop tegangan pada cabang lain :

$$\Delta V_{23}^{(h)} = Z_{23}^{(h)} [A_{23}^{(h)}][I^{(h)}] = Z_{23}^{(h)} (Ih_3^{(h)} + Ih_4^{(h)} + Ih_5^{(h)} + Ih_6^{(h)}) \quad (21)$$

$$\Delta V_{34}^{(h)} = Z_{34}^{(h)} [A_{34}^{(h)}][I^{(h)}] = Z_{34}^{(h)} (Ih_4^{(h)} + Ih_5^{(h)} + Ih_6^{(h)}) \quad (22)$$

$$\Delta V_{45}^{(h)} = Z_{45}^{(h)} [A_{45}^{(h)}][I^{(h)}] = Z_{45}^{(h)} (Ih_5^{(h)} + Ih_6^{(h)}) \quad (23)$$

$$\Delta V_{56}^{(h)} = Z_{56}^{(h)} [A_{56}^{(h)}][I^{(h)}] = Z_{56}^{(h)} (Ih_6^{(h)}) \quad (24)$$

b. Forward Sweep HLF

Untuk mendapatkan tegangan harmonic pada bus, digunakan *forward sweep* tegangan

$$V_2^{(h)} = V_1^{(h)} - V_{12}^{(h)} \quad (25)$$

Besar tegangan *slack bus* pada harmonisa ke- h adalah nol karena di n generator menyuplai tegangan sinusoidal murni. Oleh karena itu:

$$= Z_{12}^{(h)} I_2^{(h)} + Z_{12}^{(h)} I_3^{(h)} + Z_{12}^{(h)} I_4^{(h)} + Z_{12}^{(h)} I_5^{(h)} + Z_{12}^{(h)} I_6^{(h)} \quad (26)$$



begitu juga untuk tegangan pada bus yang lain, sehingga didapatkan persamaan sebagai berikut:

$$[V^{(h)}] = [HA^{(h)}][I^{(h)}] \quad (27)$$

adapaun matriks $[HA^{(h)}]$ pada RDS 6-bus dapat ditulis:

$$\begin{bmatrix} Z_{12}^{(h)} & Z_{12}^{(h)} & Z_{12}^{(h)} & Z_{12}^{(h)} & Z_{12}^{(h)} \\ Z_{12}^{(h)} & Z_{12}^{(h)} + Z_{23}^{(h)} & Z_{12}^{(h)} + Z_{23}^{(h)} & Z_{12}^{(h)} + Z_{23}^{(h)} & Z_{12}^{(h)} + Z_{23}^{(h)} \\ Z_{12}^{(h)} & Z_{12}^{(h)} + Z_{23}^{(h)} & Z_{12}^{(h)} + Z_{23}^{(h)} + Z_{34}^{(h)} & Z_{12}^{(h)} + Z_{23}^{(h)} + Z_{34}^{(h)} & Z_{12}^{(h)} + Z_{23}^{(h)} \\ Z_{12}^{(h)} & Z_{12}^{(h)} + Z_{23}^{(h)} & Z_{12}^{(h)} + Z_{23}^{(h)} + Z_{34}^{(h)} & Z_{12}^{(h)} + Z_{23}^{(h)} + Z_{34}^{(h)} + Z_{45}^{(h)} & Z_{12}^{(h)} + Z_{23}^{(h)} \\ Z_{12}^{(h)} & Z_{12}^{(h)} + Z_{23}^{(h)} & Z_{12}^{(h)} + Z_{23}^{(h)} + Z_{34}^{(h)} & Z_{12}^{(h)} + Z_{23}^{(h)} + Z_{34}^{(h)} + Z_{45}^{(h)} & Z_{12}^{(h)} + Z_{23}^{(h)} + Z_{34}^{(h)} + Z_{45}^{(h)} + Z_{36}^{(h)} \end{bmatrix}$$

Nilai tegangan harmonisa pada bus dihitung dengan iterasi kurang dari atau sama dengan toleransi yang tentukan oleh ϵ .

$$|V_i^{(h),k+1} - V_i^{(h),k}| \leq \epsilon \quad (28)$$

Besar rugi-rugi daya total pada harmonisa ke- h ($P_{Loss}^{(h)}$) didefinisikan oleh :

$$P_{Loss}^{(h)} = \sum_{i=1}^{br} P_{Loss_i}^{(h)} = \sum_{i=1}^{bt} \sum_{h=h_0}^{h_{max}} |B_i^{(h)}|^2 R_i^{(h)} \quad (29)$$

Total rugi-rugi daya juga dapat ditulis dalam bentuk vektor sebagai berikut:

$$P_{loss}^{(h)} = [R^{(h)}]^T * [A^{(h)}][I^{(h)}]^T \quad (30)$$

Nilai tegangan rms bus i (V_{rms_i}) dan THD dapat dihitung sebagai berikut :

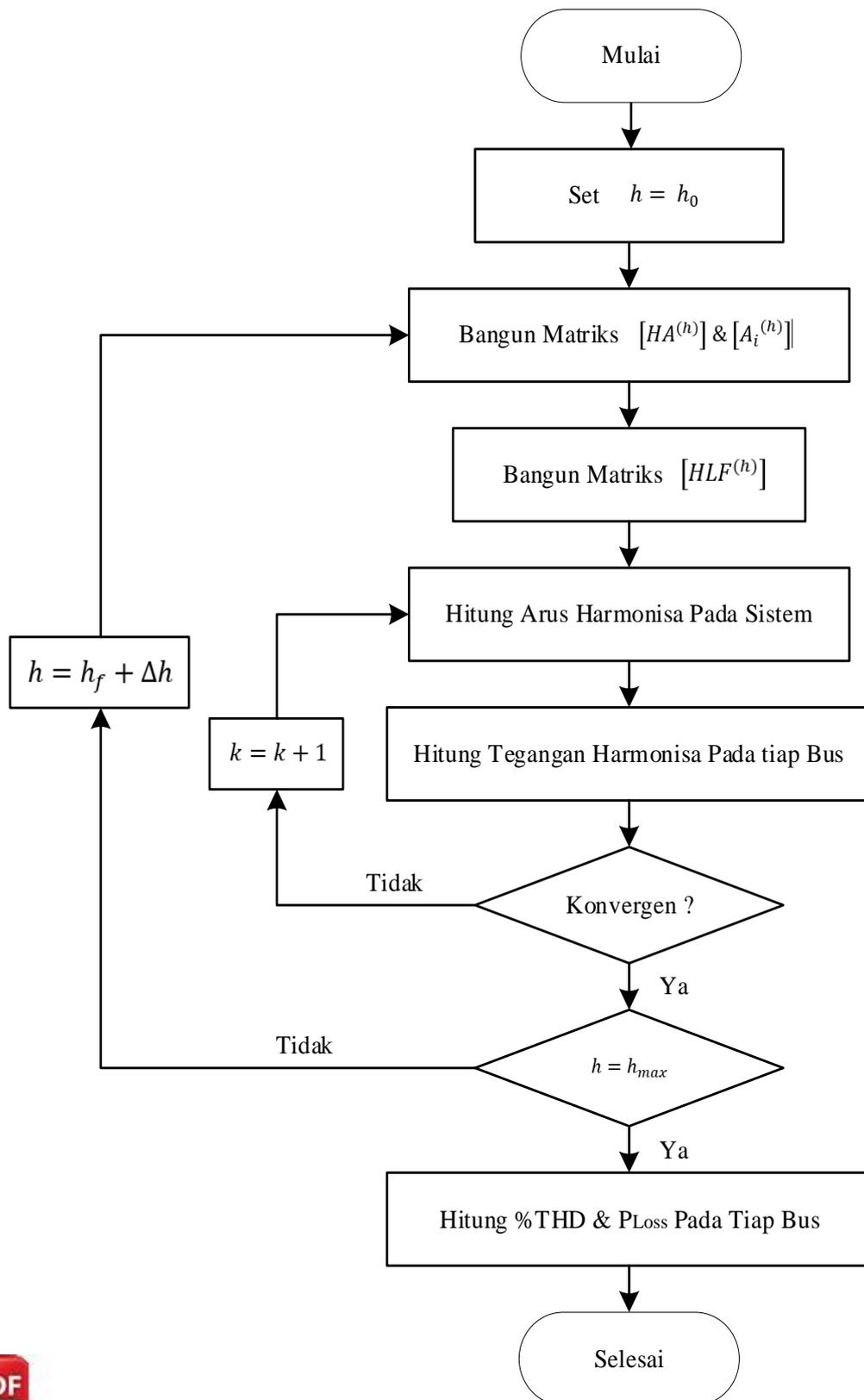
$$V_{rms_i} = \sqrt{|V_i^{(1)}|^2 + \sum_{h=h_0}^{h_{max}} |V_i^{(h)}|^2} \quad (31)$$

Sehingga besar *total harmonic distortion voltage* (THD_v) dapat dihitung sebagai berikut :

$$THD_v = \frac{\sqrt{\sum_{h=h_0}^{h_{max}} |V_i^{(h)}|^2}}{|V_i^{(1)}|^2} \quad (32)$$

Dari uraian persamaan aliran daya harmonisa (HLF) *backward-forward sweep* pada *distorted* sistem distribusi radial diatas dapat digambarkan pada algoritma Gambar 9.





gambar 9 Flowchart harmonic load flow - forward backward sweep



2.7 Particle Swarm Optimization

2.7.1 Dasar Particle Swarm Optimization

Algoritma *Particle Swarm Optimization* (PSO) diperkenalkan oleh Kennedy dan Eberhart pada tahun 1995, proses algoritmanya diinspirasi oleh perilaku populasi dari binatang, seperti sekumpulan burung dalam suatu *swarm* (D.V. Yamille et al., 2008).

PSO adalah salah satu dari teknik komputasi evolusioner, yang mana populasi pada PSO didasarkan pada penelusuran algoritma dan diawali dengan suatu populasi yang *random* yang disebut dengan *particle*. Berbeda dengan teknik komputasi evolusioner lainnya, setiap *particle* di dalam PSO juga berhubungan dengan suatu *velocity*. Partikel-partikel tersebut bergerak melalui penelusuran ruang dengan *velocity* yang dinamis yang disesuaikan menurut perilaku historisnya. Oleh karena itu, *particle-particle* mempunyai kecenderungan untuk bergerak ke area penelusuran yang lebih baik setelah melewati proses penelusuran.

PSO mempunyai kesamaan dengan *genetic algorithm* yang mana dimulai dengan suatu populasi yang random dalam bentuk matriks. Namun PSO tidak memiliki operator evolusi yaitu *crossover* dan mutasi seperti yang ada pada *genetic algorithm*. Baris pada matriks disebut *particle* atau dalam *genetic algorithm* sebagai kromosom yang terdiri dari nilai suatu *variable*. Setiap *particle* berpindah dari posisinya semula ke posisi yang lebih baik dengan suatu *velocity* (K. Vinodhkumar dan B. Sravankumar, 2015).

Pada algoritma PSO vektor *velocity* diupdate untuk masing-masing *particle* kemudian menjumlahkan vektor *velocity* tersebut ke posisi *particle*. *Update velocity* dipengaruhi oleh kedua solusi yaitu *global best* yang berhubungan dengan biaya yang paling rendah yang pernah diperoleh dari suatu *particle* dan solusi *local best* yang berhubungan dengan biaya yang paling rendah pada populasi awal. Jika solusi *local best* mempunyai suatu biaya yang kurang dari biaya solusi global yang ada, maka solusi *local best* menggantikan solusi *best*. PSO telah populer menjadi optimisasi global dengan sebagian besar masalah dapat diselesaikan dengan baik di mana *variable-variabelnya* adalah



bilangan riil. Beberapa istilah umum yang biasa digunakan dalam PSO dapat didefinisikan sebagai berikut (D.V. Yamille et al., 2008):

- a. *Swarm* : Populasi dari suatu algoritma.
- b. *Particle* : anggota (individu) pada suatu *swarm*. Setiap *particle* merepresentasikan suatu solusi yang potensial pada permasalahan yang diselesaikan. Posisi dari suatu *particle* adalah ditentukan oleh representasi solusi saat itu.
- c. *Pbest (Personal Best)* : Posisi *Pbest* suatu *particle* yang menunjukkan posisi *particle* yang dipersiapkan untuk mendapatkan suatu solusi yang terbaik.
- d. *Gbest (Global Best)* : Posisi *particle* pada *swarm*.
- e. *Velocity (Vektor)* : Vektor yang menggerakkan proses optimasi yang menentukan arah dimana suatu *particle* diperlukan untuk berpindah untuk memperbaiki posisi semula.
- f. *Inertia weight* : *Inertia Weight* disimbolkan w , parameter ini digunakan untuk mengontrol dari adanya *velocity* yang diberikan oleh suatu *particle*.

Prosedur standar untuk menerapkan algoritma PSO adalah sebagai berikut:

- a. Inisialisasi populasi dari *particle-particle* dengan posisi dan *velocity* secara random dalam suatu ruang dimensi penelusuran
- b. Evaluasi fungsi *fitness* optimisasi yang diinginkan di dalam *variable d* pada setiap *particle*.
- c. Membandingkan evaluasi *fitness particle* dengan *Pbestnya*. Jika nilai yang ada lebih baik dibandingkan dengan nilai *Pbestnya*, maka *Pbest* diset sama dengan nilai tersebut dan P_i sama dengan lokasi *particle* yang ada X_i dalam ruang dimensional d .
- d. Identifikasi *particle* dalam lingkungan dengan hasil terbaik sejauh ini.
- e. *Update velocity* dan posisi *particle*.
- f. Kembali ke step 2 sampai kriteria terpenuhi, biasanya berhenti pada nilai *fitness* yang cukup baik atau sampai pada jumlah maksimum iterasi.

Seperti halnya dengan algoritma evolusioner yang lain, algoritma PSO

adalah sebuah populasi yang didasarkan penelusuran inisialisasi *particle* secara random dan adanya interaksi diantara *particle* dalam populasi. Di dalam PSO *particle* bergerak melalui ruang solusi dan mempunyai kemampuan untuk



mengingat posisi terbaik sebelumnya dan dapat bertahan dari generasi ke generasi.

2.7.2 Ukuran *Swarm*

Ukuran *swarm* atau populasi yang dipilih adalah tergantung pada persoalan yang dihadapi. Ukuran *swarm* yang umum digunakan berkisar antara 20 sampai 50. Hal tersebut telah dipelajari sejak dahulu bahwa PSO hanya perlu ukuran *swarm* atau populasi yang lebih kecil di banding algoritma-algoritma evolusiner yang lain untuk mendapatkan solusi terbaik (K.Vinodhkumar & B. Sravankumar, 2015).

2.7.3 Koefisien Akselerasi

Pada umumnya nilai-nilai untuk koefisien akselerasi C_1 dan $C_2 = 2.0$. Namun demikian, nilai koefisien akselerasi tersebut dapat ditentukan sendiri yang digunakan di dalam penelitian yang berbeda, biasanya nilai C_1 dan C_2 adalah sama dan berada pada rentang antara 0 sampai 4 (D.V. Yamille et al., 2008).

2.7.4 *Inertia Weight*

Perubahan *velocity* pada algoritma PSO terdiri atas tiga bagian yaitu *sosial part*, *cognitive part* dan *momentum part*. Ketiga bagian tersebut menentukan keseimbangan antara kemampuan penelusuran global dan local, oleh karena itu dapat memberikan performansi yang baik pada PSO. Parameter *inertia weight* digabungkan dengan sosial part di dalam algoritma PSO standar. Persamaan dinamis dari PSO dengan *inertia weight* (w) dimodifikasi menjadi :

$$V_{id} = w V_{id} + C_1 r_1 + (P_{id} + X_{id}) + C_2 r_2 (P_{gd} - X_{id}) \quad (33)$$

$$X_{id} = X_{id} + V_{id} \quad (34)$$

Persamaan (2-33) sama dengan persamaan (2-34) kecuali ada penambahan parameter baru yaitu *inertia weight* (w). *Inertia weight* diperkenalkan untuk keseimbangan antara kemampuan penelusuran *global* dan *local*. Secara umum parameter *inertia weight* (w) diperoleh dengan menggunakan persamaan berikut (K. James & E. Russel, 1995) :

$$w = w_{max} - \frac{w_{max} - w_{min}}{iter_{max}} \quad (35)$$



Particle berpindah dari posisi berikutnya dengan memodifikasi posisi individu menggunakan persamaan berikut:

$$x_i^{k+1} = x_i^k + v_i^{k+1} \quad (36)$$

Inertia weight yang besar dapat memudahkan dalam penelusuran *global* sedangkan *inertia weight* yang kecil memudahkan untuk penelusuran *local*. Penggunaan *inertia weight* dapat meningkatkan performansi dalam beberapa aplikasi, beberapa penelitian menunjukkan bahwa ketika menggunakan *inertia weight* faktor *velocity* maksimum dapat menjadi sederhana yang diset dengan nilai pada rentang dinamis dari setiap variabel biasanya antara 0.4 sampai 0.9. Konsep *inertia weight* (w) dikembangkan oleh Shi dan Eberhart pada tahun 1998 menjadi suatu parameter kontrol yang baik dari lingkup penelusuran yang dimotivasi keinginan untuk mengurangi V_{max} . Persamaan menggambarkan *velocity* dan posisi *particle* yang dimodifikasi dengan parameter *inertia weight*.

