

SKRIPSI

**PENEMPATAN *DISTRIBUTED GENERATION* (DG) OPTIMAL DENGAN
METODE ALGORITMA PENYERBUKAN BUNGA
MEMPERTIMBANGKAN REKONFIGURASI JARINGAN**

Disusun dan diajukan oleh

NURUL ANNISA MUSDIR

D041 18 1003



**DEPARTEMEN TEKNIK ELEKTRO
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS HASANUDDIN
MAKASSAR
2022**

LEMBAR PENGESAHAN SKRIPSI

**PENEMPATAN *DISTRIBUTED GENERATION* (DG) OPTIMAL DENGAN METODE
ALGORITMA PENYERBUKAN BUNGA MEMPERTIMBANGKAN
REKONFIGURASI JARINGAN**

Disusun dan diajukan oleh:

NURUL ANNISA MUSDIR

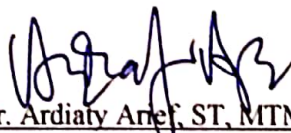
D041 18 1003

Telah dipertahankan di hadapan Panitia Ujian yang dibentuk dalam rangka penyelesaian studi
Program Sarjana Program Studi Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin
Pada Tanggal 14 September 2022
dan dinyatakan telah memenuhi syarat kelulusan

Menyetujui

Pembimbing I,

Pembimbing II,

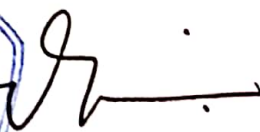


Ir. Ardiaty Arief, ST, MTM, Ph.D.
NIP. 19780424 200112 2 001



Ir. Muhammad Bachtiar Nappu, ST, M.Phil., Ph.D.
NIP. 19760406 200312 1 002

Ketua Departemen Teknik Elektro,



Dr. Eng. Ir. Dewiani, M.T.
NIP. 19691026 199412 2 001

LEMBAR PERBAIKAN SKRIPSI

PENEMPATAN *DISTRIBUTED GENERATION* (DG) OPTIMAL DENGAN METODE ALGORITMA PENYERBUKAN BUNGA MEMPERTIMBANGKAN REKONFIGURASI JARINGAN

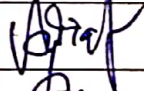
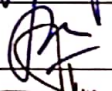


Oleh:

NURUL ANNISA MUSDIR

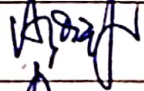
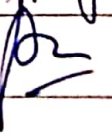
D041 18 1003

Skripsi ini telah dipertahankan pada Ujian Akhir Sarjana pada tanggal 14 September 2022 Telah dilakukan perbaikan penulisan dan isi skripsi berdasarkan usulan dari penguji dan pembimbing skripsi.

Persetujuan perbaikan oleh tim penguji:

	Nama	Tanda Tangan
Ketua	Ir. Ardiaty Arief, ST, MTM, Ph.D.	
Sekretaris	Ir. Muhammad Bachtiar Nappu, ST, M.Phil., Ph.D.	
Anggota	Ir. Tajuddin Waris, MT	
	Dr. Hasniaty A., S.T., M.T.	

Persetujuan perbaikan oleh tim pembimbing:

Pembimbing	Nama	Tanda Tangan
I	Ir. Ardiaty Arief, ST, MTM, Ph.D.	
II	Ir. Muhammad Bachtiar Nappu, ST, M.Phil., Ph.D.	

PERNYATAAN KEASLIAN

Yang bertanda tangan dibawah ini;

Nama : Nurul Annisa Musdir
NIM : D041181003
Program Studi : Teknik Elektro
Jenjang : S1

Menyatakan dengan ini bahwa karya tulisan saya berjudul:

**PENEMPATAN *DISTRIBUTED GENERATION* (DG) OPTIMAL DENGAN
METODE ALGORITMA PENYERBUKAN BUNGA
MEMPERTIMBANGKAN REKONFIGURASI JARINGAN**

Adalah karya tulisan saya sendiri dan bukan merupakan pengambilan alihan tulisan orang lain dan bahwa skripsi yang saya tulis ini benar-benar merupakan hasil karya saya sendiri.

Apabila dikemudian hari terbukti atau dapat dibuktikan bahwa sebagian atau keseluruhan isi skripsi ini hasil karya orang lain, maka saya bersedia menerima sanksi atas perbuatan tersebut.

Makassar, 20 September 2022

Yang Menyatakan



(Nurul Annisa Musdir)

ABSTRAK

NURUL ANNISA MUSDIR. *Penempatan Distributed Generation (DG) Optimal dengan Metode Algoritma Penyerbukan Bunga mempertimbangkan Rekonfigurasi Jaringan* (dibimbing oleh Ardiaty Arief dan Muhammad Bachtiar Nappu)

Peningkatan energi listrik dapat menyebabkan adanya peningkatan rugi-rugi daya dan penurunan tegangan pada sistem. Salah satu upaya yang dilakukan untuk mengurangi rugi-rugi daya yang terjadi di jaringan distribusi yaitu dengan penempatan *Distributed Generation* (DG). Telah banyak penelitian terkait penempatan DG optimal dan salah satu metode kecerdasan buatan yang digunakan untuk menyelesaikan permasalahan ini adalah metode algoritma penyerbukan bunga. Selain itu, rekonfigurasi jaringan dapat meningkatkan kualitas daya dengan cara mengurangi kerugian daya, meningkatkan keandalan, stabilitas tegangan dan keseimbangan pembebanan. Penelitian ini bertujuan untuk menentukan posisi dan kapasitas optimal DG serta mengetahui dampak atau pengaruh dengan adanya rekonfigurasi jaringan terhadap solusi pemasangan DG pada sistem distribusi radial. Jenis penelitian ini adalah studi kasus pada sistem distribusi radial dimana yang akan diteliti yaitu penempatan DG optimal dengan optimasi algoritma penyerbukan bunga mempertimbangkan rekonfigurasi jaringan menggunakan *software* matlab. Hasil simulasi menunjukkan bahwa setelah penempatan *multi* DG memperhatikan rekonfigurasi jaringan nilai rugi-rugi daya aktif pada sistem distribusi radial 33 bus menurun menjadi 58,4451 kW dengan nilai tegangan terkecil di bus meningkat menjadi 0,9807 pu dan 0,9826 pu dengan nilai rugi-rugi daya aktif 46,6346 kW pada sistem distribusi radial 69 bus. Hal ini membuktikan bahwa dengan adanya penempatan *multi* DG memperhatikan rekonfigurasi jaringan dapat menurunkan rugi-rugi daya aktif dan menaikkan profil tegangan pada sistem.

Kata kunci: Distributed Generation, algoritma penyerbukan bunga, rekonfigurasi jaringan, rugi-rugi daya, tegangan.

ABSTRACT

NURUL ANNISA MUSDIR. *Optimal Distributed Generation (DG) Placement with Flower Pollination Algorithm Method considering Network Reconfiguration* (Supervised by Ardiaty Arief dan Muhammad Bachtiar Nappu)

An increase in electrical energy can lead to an increase in power losses and a decrease in voltage in the system. One of the efforts made to reduce power losses that occur in the distribution network is the placement of Distributed Generation (DG). There have been many studies related to optimal DG placement and one of the artificial intelligence methods used to solve this problem is the flower pollination algorithm method. In addition, network reconfiguration can improve power quality by reducing power losses, improving reliability, voltage stability and loading balance. This study aims to determine the optimal position and capacity of DG and determine the impact or influence of network reconfiguration on DG installation solutions in radial distribution systems. This type of research is a case study on a radial distribution system where what will be studied is optimal DG placement with the optimization of the flower pollination algorithm considering the network reconfiguration using matlab software. The simulation results showed that after multi-DG placement, it paid attention to network reconfiguration, the value of active power losses in the 33-bus radial distribution system decreased to 58.4451 kW with the smallest voltage value in the bus increasing to 0.9807 pu and 0.9826 pu with the active power loss value of 46.6346 kW in the 69-bus radial distribution system. This proves that the placement of *multi-DG* paying attention to network reconfiguration can reduce active power losses and raise the voltage profile in the system.

Keywords: Distributed Generation, flower pollination algorithm, network reconfiguration, power loss, voltage.

KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis panjatkan kehadirat Allah SWT, karena berkat rahmat dan hidayah-Nya, sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi ini yang berjudul “Penempatan Distributed Generation (DG) Optimal dengan Metode Algoritma Penyerbukan Bunga mempertimbangkan Rekonfigurasi Jaringan”.

Penyusunan skripsi ini merupakan salah satu syarat kelulusan pada Pendidikan Strata (S1) Departemen Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin. Penulis menyadari bahwa skripsi ini masih jauh dari kata sempurna, oleh karena itu penulis mengharapkan kritik dan saran yang membangun untuk menyempurnakan skripsi ini.

Penulis menyadari dalam penyelesaian skripsi ini tidak terlepas dari bantuan berbagai pihak, oleh karena itu pada kesempatan ini penulis mengucapkan banyak terima kasih kepada:

1. Orang tua tercinta Ibu Musbariah dan Bapak Sudirman serta Kakak tersayang Ahmad Yasin Musdir dan keluarga yang tak henti-hentinya mendoakan serta menyemangati penulis sehingga skripsi ini dapat terselesaikan dengan baik.
2. Ibu Ir. Ardiaty Arief, ST, MTM, Ph.D. selaku Dosen Pembimbing I dan Bapak Ir. Muhammad Bachtiar Nappu, ST, M.Phil., Ph.D. selaku Dosen Pembimbing II yang telah meluangkan waktunya untuk memberikan bimbingan, ide, dan saran dalam penulisan skripsi ini.
3. Bapak Ir. Tajuddin Waris, MT. selaku Dosen Penguji I dan Ibu Dr. Ir. Hasniaty A., S.T., M.T. selaku Dosen Penguji II yang telah meluangkan waktunya untuk menguji penulis serta memberikan kritik dan saran dalam penulisan skripsi ini.
4. Bapak/Ibu Dosen dan seluruh staf Departemen Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin yang telah memberikan banyak ilmu maupun pengalaman yang membantu dalam kelancaran penyusunan skripsi ini.

5. Power Angles (Meyke, Sakinah dan Nisa) teman seperjuangan *Riset Group Energy and Power System* yang selalu membantu dan selalu ada saat suka maupun duka dalam penyelesaian skripsi ini.
6. SISIBA (Eni, Senja, Ilma, Wana, Meyke, Sakinah, dan Nisa) yang selalu menyayangi dan menyemangati penulis dari awal masa perkuliahan hingga saat ini.
7. Teman-teman KP Bakaru Part 1 atas kebersamaan dan motivasinya dari masa KP sampai saat ini.
8. CAL18RATOR atas kebersamaan, kerjasama, pengalaman serta motivasinya selama masa perkuliahan hingga saat ini.
9. Semua pihak yang tidak dapat disebutkan satu-persatu yang telah membantu penulis dalam penyelesaian skripsi ini.

Akhir kata penulis berharap semoga skripsi ini memberikan manfaat bagi kita semua dan semoga Allah SWT memberikan lindungan kepada kita semua.

Makassar, 18 Agustus 2022

Penulis

DAFTAR ISI

	halaman
SAMPUL	i
LEMBAR PENGESAHAN SKRIPSI	ii
LEMBAR PERBAIKAN SKRIPSI	iii
PERNYATAAN KEASLIAN	iv
ABSTRAK	v
ABSTRACT	vi
KATA PENGANTAR.....	vii
DAFTAR ISI.....	vi
DAFTAR GAMBAR.....	ix
DAFTAR TABEL.....	xiii
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1. Latar Belakang	1
1.2. Rumusan Masalah	3
1.3. Tujuan Penelitian	3
1.4. Manfaat Penelitian	3
1.5. Batasan masalah	4
1.6. Metode Penelitian	4
1.7. Sistematika Penulisan	5
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	7
2.1. Sistem Tenaga Listrik	7
2.2. Sistem Distribusi Tenaga Listrik	8
2.3. Studi Aliran Daya	9
2.3.1. <i>Backward and Forward Sweep (BFS)</i>	11
2.3.1. Fungsi Objektif.....	15
2.4. Metode Algoritma Penyerbukan Bunga	16
2.5. <i>Distributed Generation (DG)</i>	20
2.6. Rekonfigurasi Jaringan	23
BAB III METODE PENELITIAN	25

3.1. Judul Penelitian	25
3.2. Lokasi Penelitian	25
3.3. Waktu Penelitian	25
3.4. Alat dan Bahan	25
3.4.1. Alat.....	25
3.4.2. Bahan.....	26
3.5. Jenis Pengambilan Data.....	26
3.6. Diagram Penelitian.....	35
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN.....	42
4.1. Skenario 1.....	43
4.1.1. Sistem distribusi radial 33 bus	43
4.1.2. Sistem distribusi radial 69 bus	44
4.2. Skenario 2.....	45
4.2.1. Sistem distribusi radial 33 bus	45
4.1.3. Sistem distribusi radial 69 bus	49
4.3. Skenario 3.....	53
4.3.1. Sistem distribusi radial 33 bus	53
4.3.2. Sistem distribusi radial 69 bus	56
4.4. Skenario 4.....	60
4.4.1. Sistem distribusi radial 33 bus	60
4.4.2. Sistem distribusi radial 69 bus	62
4.5. Skenario 5.....	63
4.5.1. Sistem distribusi radial 33 bus	64
4.5.2. Sistem distribusi radial 69 bus	65
4.6. Skenario 6.....	67
4.6.1. Sistem distribusi radial 33 bus	67
4.6.2. Sistem distribusi radial 69 bus	70
4.7. Skenario 7.....	72
4.7.1. Sistem distribusi radial 33 bus	73
4.7.2. Sistem distribusi radial 69 bus	76
4.8. Skenario 8.....	78

4.8.1.	Sistem distribusi radial 33 bus	79
4.8.2.	Sistem distribusi radial 69 bus	82
4.9.	Skenario 9	84
4.9.1.	Sistem distribusi radial 33 bus	84
4.9.2.	Sistem distribusi radial 69 bus	87
4.10.	Skenario 10	90
4.10.1.	Sistem distribusi radial 33 bus	90
4.10.2.	Sistem distribusi radial 69 bus	93
4.11.	Skenario 11	95
4.11.1.	Sistem distribusi radial 33 bus	95
4.11.2.	Sistem distribusi radial 69 bus	98
4.12.	Skenario 12	100
4.12.1.	Sistem distribusi radial 33 bus	100
4.12.2.	Sistem distribusi radial 69 bus	103
4.13.	Skenario 13	105
4.13.1.	Sistem distribusi radial 33 bus	105
4.13.2.	Sistem distribusi radial 69 bus	108
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN		114
5.1.	Kesimpulan	114
5.2.	Saran	115
DAFTAR PUSTAKA		116
LAMPIRAN		120

DAFTAR GAMBAR

	halaman
Gambar 2.1 Jaringan Sistem Tenaga Listrik	7
Gambar 2.2 Sistem Distribusi Radial	12
Gambar 2.3 Contoh Hubungan 2 Bus pada Sistem Distribusi	13
Gambar 2. 4 Rekonfigurasi jaringan pada sistem distribusi radial.....	24
Gambar 3.1 <i>Single Line</i> Diagram Sistem Distribusi Radial IEEE 33 Bus	27
Gambar 3.2 <i>Single Line</i> Diagram Sistem Distribusi Radial IEEE 69 Bus	30
Gambar 3.3 Diagram penelitian.....	35
Gambar 3. 4 Diagram alir simulasi penelitian.....	37
Gambar 3.5 Diagram aliran daya BFS.....	39
Gambar 3.6 Diagram alir optimasi FPA.....	40
Gambar 4.1 Tegangan bus sistem distribusi radial 33 bus keadaan awal.....	44
Gambar 4.2 Tegangan bus sistem distribusi radial 69 bus keadaan awal.....	45
Gambar 4.3 Rekonfigurasi jaringan I sistem distribusi radial 33 bus	46
Gambar 4.4 Rekonfigurasi jaringan II sistem distribusi radial 33 bus	47
Gambar 4.5 Tegangan bus sistem disribusi radial 33 bus sebelum dan setelah rekonfigurasi jaringan	48
Gambar 4.6 Rekonfigurasi jaringan I sistem distribusi 69 bus.....	50
Gambar 4.7 Rekonfigurasi jaringan II sistem distribusi 69 bus	51
Gambar 4.8 Tegangan bus sistem disribusi radial 69 bus sebelum dan setelah rekonfigurasi jaringan	52
Gambar 4.9 Rekonfigurasi jaringan I sistem distribusi 33 bus.....	54
Gambar 4.10 Rekonfigurasi jaringan II sistem distribusi 33 bus	55
Gambar 4.11 Tegangan bus sistem disribusi radial 33 bus sebelum dan setelah rekonfigurasi jaringan	56
Gambar 4.12 Rekonfigurasi jaringan I sistem distribusi 69 bus	57
Gambar 4.13 Rekonfigurasi jaringan II sistem distribusi 69 bus	58
Gambar 4.14 Tegangan bus sistem disribusi radial 69 bus sebelum dan setelah rekonfigurasi jaringan	59

Gambar 4.15 Tegangan bus sistem distribusi radial 33 bus sebelum dan setelah penempatan <i>single</i> DG	61
Gambar 4.16 Grafik tegangan bus sistem distribusi radial 69 bus sebelum dan setelah penempatan <i>single</i> DG	63
Gambar 4.17 Grafik tegangan bus sistem distribusi radial 33 bus sebelum dan setelah penempatan <i>multi</i> DG	64
Gambar 4.18 Grafik tegangan bus sistem distribusi radial 69 bus sebelum dan setelah penempatan <i>multi</i> DG	66
Gambar 4.19 Perbandingan tegangan bus sebelum dan setelah rekonfigurasi jaringan I dengan penempatan <i>single</i> DG	68
Gambar 4.20 Perbandingan tegangan bus sebelum dan setelah rekonfigurasi jaringan II dengan penempatan <i>single</i> DG.....	69
Gambar 4.21 Perbandingan tegangan bus sistem distribusi radial 69 bus setelah dilakukan rekonfigurasi jaringan I dan penempatan <i>single</i> DG.....	71
Gambar 4.22 Perbandingan tegangan bus sistem distribusi radial 69 bus setelah dilakukan rekonfigurasi jaringan II dan penempatan <i>single</i> DG	72
Gambar 4.23 Perbandingan tegangan bus sebelum dan setelah rekonfigurasi jaringan I dengan penempatan <i>multi</i> DG	74
Gambar 4.24 Perbandingan tegangan bus sebelum dan setelah rekonfigurasi jaringan II dengan penempatan <i>multi</i> DG	74
Gambar 4.25 Perbandingan tegangan bus sistem distribusi radial 69 bus dengan rekonfigurasi jaringan I tanpa DG dan setelah penempatan <i>multi</i> DG	77
Gambar 4.26 Perbandingan tegangan bus sistem distribusi radial 69 bus dengan rekonfigurasi jaringan II tanpa DG dan setelah penempatan <i>multi</i> DG.....	78
Gambar 4.27 Perbandingan tegangan bus sistem distribusi radial 33 bus dengan rekonfigurasi jaringan I tanpa DG dan setelah penempatan <i>single</i> DG.....	80
Gambar 4.28 Perbandingan tegangan bus sistem distribusi radial 33 bus dengan rekonfigurasi jaringan II tanpa DG dan setelah penempatan <i>single</i> DG.....	80
Gambar 4.29 Perbandingan tegangan bus sistem distribusi radial 69 bus dengan rekonfigurasi jaringan I tanpa DG dan setelah penempatan <i>single</i> DG.....	83

Gambar 4.30 Perbandingan tegangan bus sistem distribusi radial 69 bus dengan rekonfigurasi jaringan II tanpa DG dan setelah penempatan <i>single</i> DG.....	84
Gambar 4.31 Perbandingan tegangan bus sistem distribusi radial 33 bus dengan rekonfigurasi jaringan I tanpa DG dan setelah penempatan <i>multi</i> DG	85
Gambar 4.32 Perbandingan tegangan bus sistem distribusi radial 33 bus dengan rekonfigurasi jaringan II tanpa DG dan setelah penempatan <i>multi</i> DG.....	86
Gambar 4.33 Perbandingan tegangan bus sistem distribusi radial 69 bus dengan rekonfigurasi jaringan I tanpa DG dan setelah penempatan <i>multi</i> DG	88
Gambar 4.34 Perbandingan tegangan bus sistem distribusi radial 69 bus dengan rekonfigurasi jaringan II tanpa DG dan setelah penempatan <i>multi</i> DG.....	89
Gambar 4.35 Perbandingan tegangan bus rekonfigurasi jaringan I sebelum dan setelah penempatan <i>single</i> DG.....	91
Gambar 4.36 Perbandingan tegangan bus rekonfigurasi jaringan II sebelum dan setelah penempatan <i>single</i> DG.....	91
Gambar 4.37 Perbandingan tegangan bus rekonfigurasi jaringan I sebelum dan setelah penempatan <i>single</i> DG.....	94
Gambar 4.38 Perbandingan tegangan bus rekonfigurasi jaringan Ii sebelum dan setelah penempatan <i>single</i> DG.....	94
Gambar 4.39 Perbandingan tegangan bus rekonfigurasi jaringan I sebelum dan setelah penempatan <i>multi</i> DG	96
Gambar 4.40 Perbandingan tegangan bus rekonfigurasi jaringan II sebelum dan setelah penempatan <i>multi</i> DG	97
Gambar 4.41 Perbandingan tegangan bus rekonfigurasi jaringan I sebelum dan setelah penempatan <i>multi</i> DG	99
Gambar 4.42 Perbandingan tegangan bus rekonfigurasi jaringan I sebelum dan setelah penempatan <i>multi</i> DG	99
Gambar 4.43 Perbandingan tegangan bus rekonfigurasi jaringan I sebelum dan setelah penempatan <i>single</i> DG.....	101
Gambar 4.44 Perbandingan tegangan bus rekonfigurasi jaringan II sebelum dan setelah penempatan <i>single</i> DG.....	102

Gambar 4.45 Perbandingan tegangan bus rekonfigurasi jaringan I sebelum dan setelah penempatan <i>single</i> DG	104
Gambar 4.46 Perbandingan tegangan bus rekonfigurasi jaringan II sebelum dan setelah penempatan <i>single</i> DG	105
Gambar 4.47 Perbandingan tegangan bus rekonfigurasi jaringan I sebelum dan setelah penempatan <i>multi</i> DG	106
Gambar 4.48 Perbandingan tegangan bus rekonfigurasi jaringan II sebelum dan setelah penempatan <i>multi</i> DG	107
Gambar 4.49 Perbandingan tegangan bus rekonfigurasi jaringan I sebelum dan setelah penempatan <i>multi</i> DG	109
Gambar 4.50 Perbandingan tegangan bus rekonfigurasi jaringan II sebelum dan setelah penempatan <i>multi</i> DG	110

DAFTAR TABEL

	halaman
Tabel 2.1 Istilah dalam Metode FPA.....	18
Tabel 2.2 Klasifikasi DG Berdasarkan Kapasitas Pembangkitan	22
Tabel 3. 1 Data Bus IEEE 33 Bus	27
Tabel 3.2 Data <i>Line</i> IEEE 33 Bus	28
Tabel 3.3 Data <i>Tie Switch</i>	29
Tabel 3.4 Data Bus IEEE 69 Bus	30
Tabel 3.5 Data <i>Line</i> IEEE 69 Bus	32
Tabel 3.6 Data <i>Tie Switch</i>	34
Tabel 4.1 Hasil Studi Aliran Daya Sistem Distribusi Radial 33 bus.....	43
Tabel 4.2 Hasil Studi Aliran Daya Sistem Distribusi Radial 69 bus.....	44
Tabel 4.3 Hasil perubahan topologi jaringan sistem distribusi radial 33 bus.....	46
Tabel 4.4 Hasil Pencarian simulasi skenario 2 Sistem Distribusi Radial 33 bus .	48
Tabel 4.5 Hasil perubahan topologi jaringan sistem distribusi radial 69 bus.....	49
Tabel 4.6 Hasil Pencarian simulasi skenario 2 Sistem Distribusi Radial 69 bus .	51
Tabel 4.7 Hasil Pencarian simulasi skenario 3 Sistem Distribusi Radial 33 bus .	55
Tabel 4.8 Hasil Pencarian simulasi skenario 3 Sistem Distribusi Radial 69 bus .	59
Tabel 4.9 Hasil optimasi skenario 4 Sistem Distribusi Radial 33 bus.....	60
Tabel 4.10 Hasil optimasi skenario 4 Sistem Distribusi Radial 69 Bus.....	62
Tabel 4.11 Hasil optimasi skenario 5 Sistem Distribusi Radial 33 Bus.....	64
Tabel 4.12 Hasil optimasi skenario 5 Sistem Distribusi Radial 69 Bus.....	66
Tabel 4.13 Hasil optimasi skenario 6 sistem distribusi 33 bus.....	68
Tabel 4.14 Hasil optimasi skenario 6 sistem distribusi 69 bus.....	70
Tabel 4.15 Hasil optimasi skenario 7 sistem distribusi 33 bus.....	73
Tabel 4.16 Hasil optimasi skenario 7 sistem distribusi 69 bus.....	76
Tabel 4.17 Hasil optimasi skenario 8 sistem distribusi 33 bus.....	79
Tabel 4.18 Hasil optimasi skenario 8 sistem distribusi 69 Bus.....	82
Tabel 4.19 Hasil optimasi skenario 9 sistem distribusi 33 bus.....	85
Tabel 4.20 Hasil optimasi skenario 9 sistem distribusi 69 Bus.....	87

Tabel 4.21 Hasil optimasi skenario 10 sistem distribusi 33 bus.....	90
Tabel 4.22 Hasil optimasi skenario 10 sistem distribusi 69 bus.....	93
Tabel 4.23 Hasil optimasi skenario 11 sistem distribusi 33 bus.....	95
Tabel 4.24 Hasil optimasi skenario 11 sistem distribusi 33 bus.....	98
Tabel 4. 25 Hasil optimasi skenario 12 sistem distribusi 33 bus	100
Tabel 4.26 Hasil optimasi skenario 12 sistem distribusi 69 bus.....	103
Tabel 4.27 Hasil optimasi skenario 11 sistem distribusi 33 bus.....	106
Tabel 4.28 Hasil optimasi skenario 13 sistem distribusi 33 bus.....	108
Tabel 4.29 Kesimpulan rugi-rugi aliran daya dari setiap skenario.....	110
Tabel 4.30 Perbandingan hasil optimasi penempatan <i>single</i> DG 33 Bus dengan berbagai metode	112
Tabel 4.31 Perbandingan hasil optimasi penempatan <i>multi</i> DG metode FPA dengan GA pada sistem distribusi radial 33 Bus	112

BAB I

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Secara umum sistem tenaga listrik diawali dari unit pembangkit energi listrik disalurkan melalui sistem transmisi, kemudian melalui sistem distribusi yang disalurkan kepada konsumen. Energi listrik merupakan merupakan suatu bentuk energi yang sangat penting dalam kehidupan manusia pada zaman ini. Faktor pertumbuhan penduduk yang terus meningkat membawa banyak pengaruh dalam kehidupan, khususnya dalam bidang energi listrik. Hal ini menyebabkan terjadinya peningkatan permintaan energi listrik.

Peningkatan energi listrik dapat menyebabkan adanya peningkatan rugi-rugi daya dan penurunan tegangan pada sistem. Salah satu upaya yang dilakukan untuk mengurangi rugi-rugi daya yang terjadi di jaringan distribusi yaitu dengan penempatan *Distributed Generation* (DG).

Pembangkit terdistribusi (*Distributed Generation*) merupakan generator-generator yang terdistribusi (tersebar) dalam sistem tenaga listrik yang dipasang guna menginjeksikan daya aktif (P) dan daya reaktif (Q) untuk memperbaiki profil tegangan, meningkatkan keandalan atau dengan kata lain memperbaiki keadaan sistem distribusi. *Distributed generation* memiliki ukuran yang lebih kecil daripada pembangkit utama dan letaknya dalam sistem tenaga listrik yaitu lebih dekat dengan beban – beban sistem atau dengan kata lain pada jaringan distribusi (Chandra Lima Silalahi et al., 2017).

Telah banyak penelitian terkait penempatan DG optimal, dan banyak metode kecerdasan buatan dikembangkan untuk penempatan DG optimal. Salah satu metode kecerdasan buatan yang banyak diaplikasikan untuk menyelesaikan permasalahan dalam sistem tenaga listrik adalah metode *Flower Pollination Algorithm* (FPA) atau metode algoritma penyerbukan bunga. FPA merupakan metode optimasi sistem yang terinspirasi oleh proses penyerbukan (polinasi) pada

bunga yang disebabkan oleh polinator di alam, dimana bunga yang terpolinasi merupakan bunga dengan penampilan terbaik. Metode FPA digunakan karena lebih efisien dibandingkan dengan metode yang sering digunakan pada proses optimasi seperti metode *Genetic Algorithm* (GA) dan *Particle Swarm Optimization* (PSO) (Abdelaziz et al., 2016). *Flower Pollination Algorithm* merupakan algoritma yang ditemukan oleh Xin She Yang pada tahun 2012 (X.-S. Yang, 2012), namun aplikasi algoritma ini masih sedikit digunakan dalam masalah optimasi. Berdasarkan (X.-S. Yang, 2012), algoritma ini sangat cepat dalam melakukan komputasi dan merupakan pengembangan dari algoritma cerdas sebelumnya yang juga ditemukan oleh Xin She Yang.

Pada pemakai energi listrik tegangan menengah dan tegangan rendah biasanya seringkali terjadi beban tidak seimbang pada fasa – fasanya atau terjadi kelebihan beban karena pemakaian alat - alat elektrik dari konsumen energi listrik. Jika keadaan tersebut kalau dibiarkan terus menerus maka akan menyebabkan terjadinya penurunan kestabilan sistem tenaga listrik dan kualitas energi listrik yang disalurkan serta menyebabkan kerusakan alat – alat yang bersangkutan. Selain itu, sistem distribusi radial juga mempunyai rugi – rugi daya yang cukup besar sehingga menyebabkan kestabilan sistem yang menjadi berkurang.

Untuk meningkatkan kestabilan sistem distribusi dilakukan rekonfigurasi jaringan distribusi yang mengatur ulang konfigurasi jaringan dengan jalan membuka dan menutup *switch* yang terdapat pada jaringan distribusi. Rekonfigurasi jaringan dapat meningkatkan kualitas daya dengan cara mengurangi kerugian daya, meningkatkan keandalan, stabilitas tegangan dan keseimbangan pembebanan. Tujuan utama rekonfigurasi jaringan adalah untuk meminimalkan rugi jaringan. Selain rekonfigurasi jaringan, pemasangan kapasitor juga dapat meminimalkan rugi jaringan (Shuaib et al., 2014).

Berdasarkan latar belakang tersebut, maka pada tugas ini diangkat judul yaitu “PENEMPATAN *DISTRIBUTED GENERATION* (DG) OPTIMAL DENGAN METODE ALGORITMA PENYERBUKAN BUNGA MEMPERTIMBANGKAN REKONFIGURASI JARINGAN”.

1.2. Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang tersebut, maka dapat di rumuskan masalah sebagai berikut:

1. Bagaimana menentukan posisi dan kapasitas optimal DG sistem distribusi radial dengan memperhatikan rekonfigurasi jaringan?
2. Bagaimana perbandingan nilai rugi-rugi daya dan profil tegangan pada sistem distribusi radial sebelum dan setelah pemasangan DG dengan rekonfigurasi jaringan?

1.3. Tujuan Penelitian

Tujuan yang ingin dicapai pada penelitian ini adalah:

1. Untuk menentukan posisi dan kapasitas optimal DG sistem distribusi radial dengan memperhatikan rekonfigurasi jaringan.
2. Untuk mengetahui dampak atau pengaruh dengan adanya rekonfigurasi jaringan terhadap solusi pemasangan DG pada sistem distribusi radial.

1.4. Manfaat Penelitian

Manfaat dari penelitian ini adalah:

1. Secara akademis, diharapkan penelitian ini dapat bermanfaat bagi penambahan referensi yang berkaitan dengan Penempatan DG Optimal Dengan Metode Algoritma Penyerbukan Bunga Mempertimbangkan Rekonfigurasi Jaringan di Departemen Teknik Elektro Universitas Hasanuddin.
2. Secara Praktis, penelitian ini diharapkan bermanfaat bagi pihak Departemen Teknik Elektro Universitas Hasanuddin khususnya pada Grup Riset *Energy and Power System*.
3. Manfaat dari penelitian ini adalah untuk mendapatkan konsep pemasangan DG, terkait lokasi bus dan kapasitas masing-masing DG yang akan diinjeksi

secara optimal yang mampu mengurangi rugi-rugi daya pada sistem distribusi radial.

1.5. Batasan masalah

Batasan masalah pada penelitian ini meliputi:

1. Sistem distribusi yang digunakan dalam penelitian adalah sistem distribusi radial IEEE 33 dan 69 bus.
2. Tidak membahas tentang aliran daya secara detail.
3. Sistem tiga fasa yang digunakan yakni sistem tiga fasa seimbang.
4. DG yang disimulasikan adalah DG tipe 1 dengan kapasitas 5 MW dan faktor daya ideal (100%) yang hanya menginjeksi daya aktif.
5. Profil tegangan yang dikehendaki setelah pemasangan DG adalah 0,95 – 1,05 pu sesuai dengan standar IEEE.
6. Tujuan optimasi adalah meminimalkan rugi-rugi daya dan memperbaiki profil tegangan pada sistem.
7. Metode aliran daya yang digunakan pada penelitian ini adalah *Backward and Forward Sweep* (BFS).
8. Metode optimasi yang digunakan adalah metode *Flower Pollination Algorithm*.

1.6. Metode Penelitian

Metode penelitian yang di lakukan pada tugas akhir ini adalah:

1. Studi literatur

Studi literatur merupakan metode penelitian yang berisi kajian penulis atas referensi-referensi yang ada dengan cara pengadaaan studi dari buku, jurnal, internet dan sumber bahan pustaka, dan informasi lain yang dapat menunjang penulisan laporan penelitian ini.

2. Pengambilan data

Dilakukan pengambilan data dimana data yang digunakan pada penelitian ini adalah data sekunder berupa data yang diperoleh dari pihak lain. Data

inilah sebagai penunjang dari penelitian yang dilakukan. Pengumpulan data dilakukan berdasarkan hasil dari Studi Literatur.

3. Pengolahan data

Pengolahan data penelitian ini dilakukan dengan menerapkan dan melakukan simulasi pada software serta melakukan beberapa perhitungan dan penggambaran.

4. Analisa hasil pengolahan dan perbandingan data.

Dilakukan dengan tujuan untuk memperoleh simulasi sementara, dan selanjutnya dilakukan perbandingan terhadap data sebelumnya sehingga menarik kesimpulan untuk diolah lebih lanjut.

5. Simpulan

Simpulan diperoleh setelah dilakukan korelasi antara hasil pengolahan data dan masalah yang diteliti sehingga simpulan merupakan hasil akhir dari penelitian ini.

1.7. Sistematika Penulisan

Adapun sistematika penulisan dari penelitian ini adalah sebagai berikut :

BAB I PENDAHULUAN

Bab ini berisi uraian tentang latar belakang, rumusan masalah, tujuan penelitian, manfaat penelitian, batasan masalah, metode penelitian, dan sistematika penulisan.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

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

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

Bab ini membahas tentang rancangan penelitian, waktu dan lokasi penelitian, bahan dan alat, teknik pengumpulan data, serta langkah-langkah penelitian yang digunakan dalam tugas akhir ini.

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

Bab ini membahas tentang hasil penelitian yang memuat data yang di peroleh disertai dengan pembahasan mengenai hasil penelitian tersebut.

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

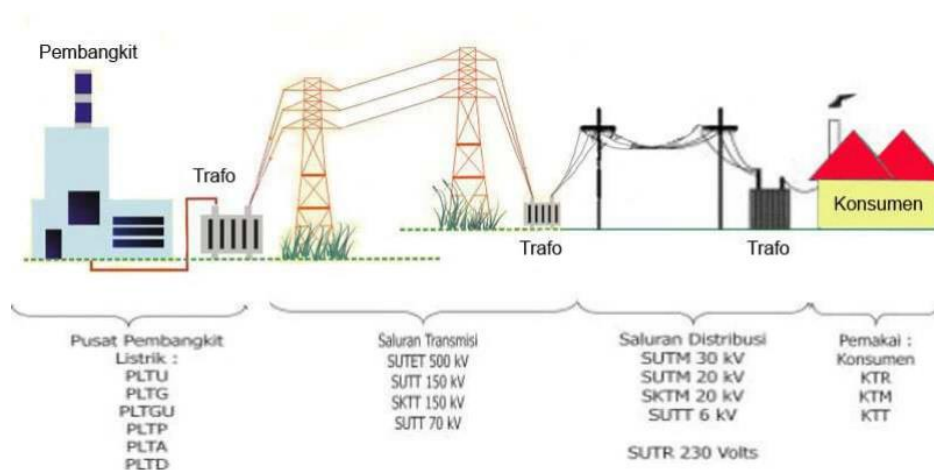
Bab ini berisikan kesimpulan menyeluruh dari hasil penelitian yang dilakukan serta saran-saran untuk perbaikan penelitian ini kedepannya.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Sistem Tenaga Listrik

Pada umumnya, sistem tenaga listrik dibagi menjadi tiga bagian utama, yaitu pembangkit tenaga listrik, penyaluran tenaga listrik, dan distribusi tenaga listrik. Ketiga bagian ini tidak dapat dipisahkan karena merupakan suatu sistem yang kompleks yang bekerja untuk menyalurkan daya dari pusat pembangkit ke pusat-pusat beban. Lebih jelasnya dapat dilihat pada gambar berikut:



Gambar 2.1 Jaringan Sistem Tenaga Listrik (Joko et al, 2013)

Energi listrik yang dihasilkan pusat pembangkit listrik akan disalurkan melalui saluran transmisi kemudian melalui saluran distribusi akan sampai ke konsumen.

1. Pusat Pembangkit Listrik (*Power Plant*). Pusat pembangkit listrik merupakan tempat pertama kali energi listrik dibangkitkan atau dihasilkan. Di sini terdapat turbin penggerak awal dan juga generator yang mengubah tenaga turbin menjadi energi listrik. Terdapat beberapa jenis pusat pembangkit listrik yang biasanya dibagi kedalam dua bagian besar yaitu pembangkit hidro (PLTA) dan pembangkit thermal (PLTU, PLTG, PLTGU, PLTD, PLTP).

2. Transmisi Tenaga Listrik. Transmisi tenaga listrik merupakan proses penyaluran tenaga listrik dari pusat pembangkitan listrik hingga saluran distribusi listrik sehingga nantinya sampai pada konsumen/pengguna listrik.
3. Sistem Distribusi. Sistem distribusi ini merupakan sub sistem tenaga listrik yang langsung berhubungan dengan pelanggan/konsumen dan berfungsi dalam hal pembagian atau penyaluran tenaga listrik ke beberapa tempat. Sub sistem ini terdiri dari: pusat pengatur/gardu induk, gardu hubung, saluran tegangan menengah/jaringan primer (6 kV dan 20 kV) yang berupa saluran udara atau kabel bawah tanah, saluran tegangan rendah/jaringan sekunder (380 V dan 220 V), gardu distribusi tegangan yang terdiri dari panel-panel pengatur tegangan baik tegangan menengah ataupun tegangan rendah, dan trafo (Joko et al, 2013).

2.2. Sistem Distribusi Tenaga Listrik

Sistem distribusi memiliki fungsi yang sangat penting dalam sistem tenaga listrik. Sistem distribusi berfungsi untuk menyalurkan tenaga listrik dari gardu induk (*distribution substation*) ke pusat-pusat beban hingga ke pelanggan. Penyaluran tenaga listrik di dalam sistem distribusi diklasifikasikan kedalam 2 bagian berdasarkan level tegangan kerjanya, yaitu:

- a. Sistem distribusi primer.
- b. Sistem distribusi sekunder.

Sistem distribusi primer (*primary distribution systems*) menyalurkan tenaga listrik dari gardu induk (*distribution substation*) ke gardu distribusi (*distribution transformers*) yang memiliki level tegangan kerja 6 kV sampai 20 kV sehingga juga sering disebut dengan sistem distribusi tegangan menengah. Sedangkan sistem distribusi sekunder (*secondary distribution systems*) menyalurkan tenaga listrik dari gardu distribusi (*distribution transformers*) ke pelanggan. Level tegangan kerjanya adalah 220/380 V sehingga juga sering disebut sistem distribusi tegangan rendah (Ahmad Rusydi Akbar, 2016).

2.3. Studi Aliran Daya

Perhitungan aliran daya merupakan suatu alat bantu yang sangat penting untuk mengetahui kondisi operasi sistem. Perhitungan aliran daya pada tegangan, arus dan faktor daya di berbagai simpul suatu jaringan listrik dilakukan pada keadaan operasi normal. Hasil perhitungan aliran daya ini kemudian digunakan untuk mensimulasi kondisi gangguan yang besar, stabilitas transien maupun analisa kontegensi yaitu analisa keadaan dimana sebagian komponen sistem tidak terhubung ke sistem dengan baik (W. S. Sawai, 2008).

Power Flow Analysis/Load Flow Analysis atau studi aliran daya merupakan cara untuk mendapatkan nilai dari beberapa variabel yang mempengaruhi kualitas suatu jaringan, antara lain (A. S. Pabla, 1994):

1. Aliran daya aktif serta daya reaktif pada setiap cabang di jaringan.
2. Keadaan bus apakah terjadi beban lebih atau tidak.
3. Pengaruh penambahan atau perubahan beban pada jaringan.
4. Tegangan dan sudut fase di masing-masing bus.
5. Rugi-rugi daya di setiap saluran.
6. Kondisi optimum pembebanan pada sistem.

Dengan menggunakan persamaan matriks dapat merepresentasikan karakteristik rangkaian jaringan seperti hubungan dari setiap elemen-elemennya. Variabel bebas menentukan elemen-elemen pada matriks. Variabel bebas berupa nilai tegangan atau arus, sedangkan elemen matriks berupa nilai impedansi atau admitansi pada rangkaian jaringan.

Bentuk matriks rangkaian tergantung pada kerangka dasarnya yaitu bus, cabang (*branch*), dan *loop*. Pada bus kerangka dasar terdiri dari variabel berupa tegangan dan arus pada bus. Pada loop kerangka dasar terdiri dari variabel berupa tegangan dan arus pada loop. Pada kerangka dasar bus setiap variabelnya dinyatakan dengan persamaan bus bebas ($n - 1$), dimana n = jumlah bus. Notasi

matriks pada bus dalam bentuk impedansi dapat dinyatakan dengan persamaan (2.1).

$$E_{bus} = Z_{bus} \cdot I_{bus} = [Y_{bus}]^{-1} \cdot I_{bus} \quad (2.1)$$

Dalam bentuk admitansi:

$$I_{bus} = Y_{bus} \cdot E_{bus} \quad (2.2)$$

Dimana:

E_{bus} = vektor nilai tegangan pada bus

I_{bus} = vektor nilai arus pada bus

Z_{bus} = matriks impedansi bus

Y_{bus} = matriks admitansi bus

Pada prosesnya, perhitungan aliran daya dilakukan dengan metode berulang atau iterasi. Proses ini akan selesai jika nilai akhirnya telah mencapai konvergensi. Nilai konvergensi mengikuti hukum Kirchoff, dimana jumlah nilai arus pada suatu bus atau jumlah tegangan pada suatu loop harus bernilai nol. Dikatakan suatu nilai akhir adalah konvergen, apabila nilai tersebut telah mencapai batas toleransi yang ditentukan untuk nilai perhitungan dengan prinsip hukum Kirchoff yang telah disebutkan.

Daya pada sembarang bus k dalam jaringan akan mempengaruhi nilai variabel tegangan dan arus, hal tersebut dinyatakan pada Persamaan (2.3) (Augusta Yoga Alif, 2018).

$$S_k = V_k^* \cdot I_k = P_k + jQ_k \quad (2.3)$$

$$I_k = \frac{P_k + jQ_k}{V_k^*} = \frac{S_k}{V_k^*} \quad (2.4)$$

Dimana:

S_k = daya kompleks pada bus

I_k = arus pada bus

P_k = daya nyata pada bus

Q_k = daya reaktif pada bus

Y_k = matriks impedansi bus

V_k^* = konjugasi tegangan pada bus

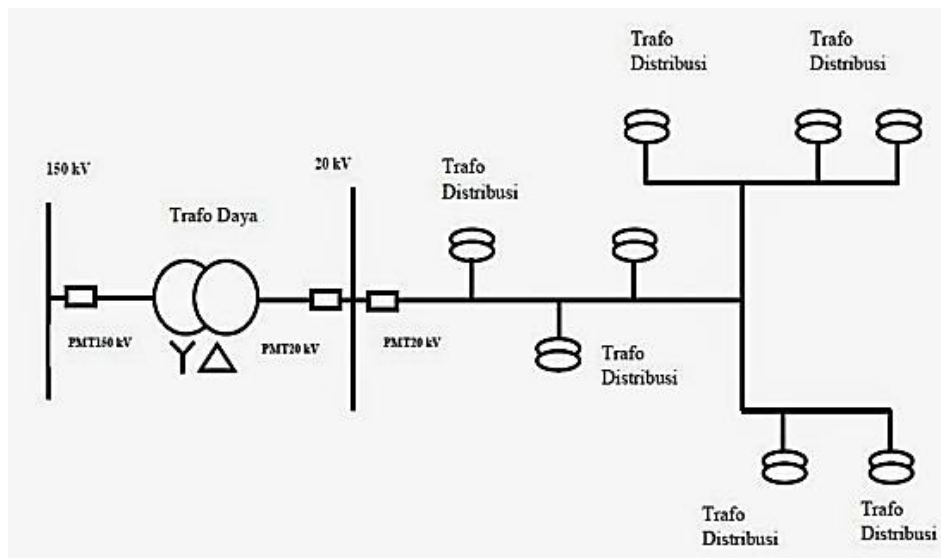
Terdapat beberapa metode dalam penyelesaian studi aliran daya, seperti metode iteratif Gauss, Gauss-Seidel, dan Newton-Raphson (NR). Pada penelitian ini penulis menggunakan metode aliran daya *Backward and Forward Sweep* (BFS) karena lebih efektif dalam metode komputasi dengan jumlah bus dan cabang yang banyak sesuai dengan model penelitian yaitu sistem distribusi radial IEEE 33 bus dan 69 bus (J. A. M. Rupa & S. Ganesh, 2014).

2.3.1. *Backward and Forward Sweep* (BFS)

Dari sekian banyak metode *backward and forward sweep* adalah metode yang efisien (H. S. Shateri, 2008). Pada *backward sweep*, dimulai dari titik ujung terjauh dari jaringan, arus beban. Oleh karena itu arus yang mengalir pada saluran dihitung menurut asumsi atau hasil kalkulasi dari tegangan pada iterasi sebelumnya. Setelah menghitung arus yang mengalir pada saluran, pada *forward sweep*, dimulai dari titik sumber, tegangan dari masing-masing titik bus diperbarui. Setelah *forward sweep*, kompensasi arus injeksi dihitung. Lalu kriteria konvergensi diuji. Ada berbagai macam kriteria konvergensi yang disesuaikan dengan titik tegangan, beban atau arus saluran, dan masukan daya ke jaringan.

Untuk menganalisa aliran daya dengan menggunakan metode *Backward Forward Sweep*, jaringan distribusi radial direpresentasikan seperti pohon dengan bus pertama adalah sebagai akar atau *slack bus*, dan bus yang lain sebagai cabangnya atau bus beban. Dengan menggunakan metode *Backward Forward Sweep*, analisa aliran daya untuk sistem distribusi terselesaikan tanpa banyak perhitungan dan efisien pada setiap iterasi (Novialifiah Rizka Winda et al., 2014).

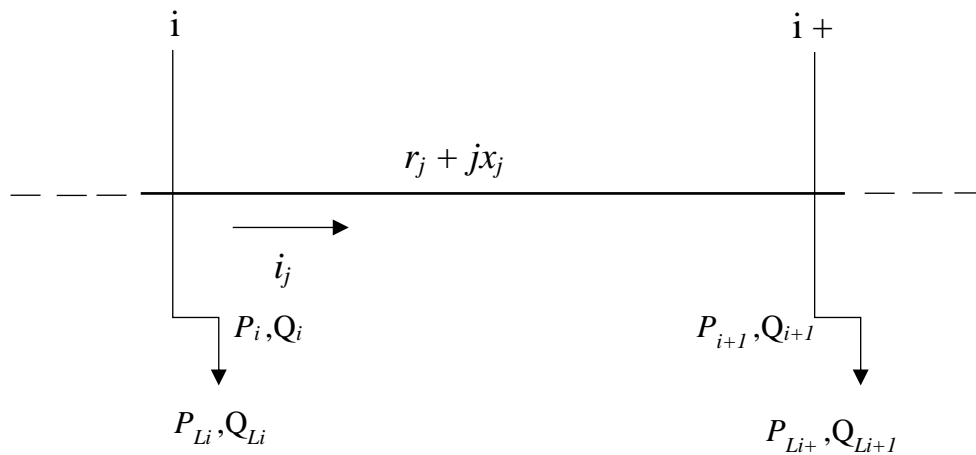
Backward and Forward Sweep merupakan metode komputasi iteratif untuk menyelesaikan persoalan aliran daya pada sistem distribusi radial. Digunakan metode ini karena metode komputasi aliran daya lainnya kurang efisien pada sistem distribusi radial (J. A. M. Rupa & S. Ganesh, 2014). Pada metode NR yang telah diperbarui pun untuk sistem distribusi radial kurang efisien dikarenakan waktu komputasi yang dibutuhkan cukup lama. Contoh sistem distribusi radial dapat dilihat pada Gambar 2.2.



Gambar 2.2 Sistem Distribusi Radial (Sukmawidjaja Maula, 2008)

Sistem distribusi radial secara singkat merupakan sistem distribusi dengan satu titik sumber (Gardu Induk) yang ditarik secara radial dan dicabangkan untuk masing-masing beban. Pada sistem distribusi radial tidak ada *loop* (Augusta Yoga Alif, 2018).

Pada metode aliran daya BFS untuk mengetahui aliran daya pada setiap cabang dimulai dengan menghitung aliran arus beban pada bus terakhir menuju ke titik sumber (*backward*), selanjutnya akan dihitung tegangan magnitude dan sudut fasa pada setiap bus dimulai dari titik sumber menuju bus terakhir (*forward*). Dapat dilihat pada Gambar 2.3 yang menggambarkan hubungan antara 2 bus dan perhitungan metode *backward* untuk mendapatkan nilai P_i dan Q_i yang melewati cabang ' j ' dari bus ' i ' ditunjukkan pada Persamaan (2.5) sampai (2.8).



Gambar 2.3 Contoh Hubungan 2 Bus pada Sistem Distribusi (Augusta Yoga Alif, 2018)

$$P_i = P'_{i+1} + r_j \frac{P'^2_{i+1} + Q'^2_{i+1}}{V_{i+1}^2} \quad (2.5)$$

$$Q_i = Q'_{i+1} + r_j \frac{P'^2_{i+1} + Q'^2_{i+1}}{V_{i+1}^2} \quad (2.6)$$

$$P'_{i+1} = P_{i+1} + P_{Li+1} \quad (2.7)$$

$$Q'_{i+1} = Q_{i+1} + Q_{Li+1} \quad (2.8)$$

Dimana:

P_{i+1} = daya nyata pada bus 'i + 1'

Q_{i+1} = daya reaktif pada bus 'i + 1'

P_{Li+1} = beban daya nyata pada bus 'i + 1'

Q_{Li+1} = beban daya reaktif pada bus 'i + 1'

Nilai tegangan magnitude dan sudut fasa pada suatu bus dibutuhkan untuk perhitungan metode *forward*. Persamaan perhitungan dengan metode *forward* termasuk $V_i \angle \delta_i$ pada bus 'i' serta mengetahui $V_{i+1} \angle \delta_{i+1}$ pada bus 'i + 1' untuk Gambar 2.2 dapat dinyatakan pada Persamaan (2.9)

$$I_j = \frac{V_i \angle \delta_i - V_{i+1} \angle \delta_{i+1}}{r_j + jx_j} \quad (2.9)$$

$$I_j = \frac{P_i - jQ_i}{V_i \angle -\delta_i} \quad (2.10)$$

Dari 2 Persamaan (2.9) dan (2.10) maka dapat dinyatakan:

$$\frac{P_i - jQ_i}{V_i \angle -\delta_i} = \frac{V_i \angle \delta_i - V_{i+1} \angle \delta_{i+1}}{r_j + jx_j} \quad (2.11)$$

$$V_i^2 \angle V_i V_{i+1} \angle (\delta_{i+1} - \delta_i) = (P_i - jQ_i) (r_j + jx_j) \quad (2.12)$$

Dari Persamaan (2.9) dan (2.10) maka didapatkan Persamaan (2.13)

$$V_{i+1} = \left[V_i^2 - 2(P_i r_j + Q_i x_j) + (r_j^2 + x_j^2) \frac{P_i^2 + Q_i^2}{V_i^2} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2.13)$$

Dan sudut tegangan, δ_{i+1} dapat diturunkan pada Persamaan (2.12) diatas menjadi:

$$\tan(\delta_{i+1} - \delta_i) = \frac{Q_i r_j - P_i x_j}{[V_i^2 - (P_i r_j + Q_i x_j)]} \quad (2.14)$$

$$\delta_{i+1} = \delta_i + \tan^{-1} \frac{Q_i r_j - P_i x_j}{[V_i^2 - (P_i r_j + Q_i x_j)]} \quad (2.15)$$

Persamaan magnitude dan sudut fasa digunakan secara berulang pada metode *forward* untuk menghitung nilai tegangan dan sudut fase pada semua bus dalam sistem distribusi radial.

Rugi-rugi daya pada cabang 'J' dapat dihitung dengan Persamaan (2.16) dan (2.17).

$$P_{loss}(j) = r_j \frac{P_i^2 + Q_i^2}{V_i^2} \quad (2.16)$$

$$Q_{loss}(j) = x_j \frac{P_i^2 + Q_i^2}{V_i^2} \quad (2.17)$$

Total rugi-rugi daya nyata dan daya reaktif dapat dihitung dengan persamaan (2.18) dan (2.19).

$$P_{loss_{tot}} = \sum_{j=1}^n r_j \frac{P_i^2 + Q_i^2}{V_i^2} \quad (2.18)$$

$$Q_{loss_{tot}} = \sum_{j=1}^n x_j \frac{P_i^2 + Q_i^2}{V_i^2} \quad (2.19)$$

Pada setiap bus, profil tegangan diasumsikan bernilai 1 pu. Daya pada cabang dihitung secara berulang dengan nilai tegangan yang baru untuk setiap bus. Keadaan konvergen dicapai saat perbedaan tegangan magnitude pada cabang bernilai nilai 0.0001.

2.3.2. Fungsi Objektif

Fungsi objektif adalah fungsi tujuan untuk meminimalisasi rugi-rugi daya aktif pada saluran dengan persamaan utama sebagai berikut:

$$f(x) = \min (\sum_{i=1}^N P_{Li}) \quad (2.20)$$

dengan N adalah jumlah saluran dan i adalah saluran.

Pendekatan pertama dilakukan dengan pendekatan analitis. Total rugi-rugi daya aktif pada sistem tenaga listrik direpresentasikan dengan persamaan di atas, atau yang populer disebut “*exact loss formula*” (H. A. Attia, 2008), (M. Musofa et al., 2014) yang digunakan untuk mencari rugi-rugi daya pada saluran sebagai berikut:

$$P_L = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N [\alpha_{ij}(P_i P_j + Q_i Q_j) + \beta_{ij}(Q_i P_j - P_i Q_j)] \quad (2.21)$$

$$\alpha_{ij} = \frac{r_{ij}}{v_i v_j} \cos(\delta_i - \delta_j) \quad (2.22)$$

$$\beta_{ij} = \frac{r_{ij}}{v_i v_j} \sin(\delta_i - \delta_j) \quad (2.23)$$

Dengan $V_i < \delta_i$ adalah tegangan kompleks pada bus ke- i , $r_{ij} + jx_{ij} = Z_{ij}$ adalah elemen ke- ij dari matriks impedansi P_i dan P_j adalah injeksi daya aktif pada *feeder* ij , Q_i dan Q_j adalah injeksi daya reaktif pada *feeder* ij , dan N adalah jumlah *feeder*.

Dengan asumsi $\alpha = (\text{sign}) \tan(\cos^{-1}(PF_{DG}))$ (M. Musofa et al., 2014), (H. A. Attia, 2008), maka keluaran daya reaktif DG dapat diekspresikan dengan persamaan berikut:

$$Q_{DGi} = \alpha P_{DGi} \quad (2.24)$$

dengan $\text{sign} = +1$ jika DG menginjeksi daya reaktif, $\text{sign} = -1$ jika DG mengambil daya reaktif dan PF_{DG} adalah faktor daya dari DG.

Daya aktif dan daya reaktif yang diinjeksikan pada bus i , dimana DG terletak, diekspresikan dengan persamaan berikut:

$$P_i = P_{DGi} - P_{Di} \quad (2.25)$$

$$Q_i = Q_{DGi} - Q_{Di} = \alpha P_{DGi} - Q_{Di} \quad (2.26)$$

Dari Persamaan (2.21), (2.25), dan (2.26), rugi daya aktif dapat ditulis sebagai berikut:

$$P_L = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \{ \alpha_{ij} [(P_{DGi} - P_{Di})P_j + (\alpha P_{DGi} - Q_{Di})Q_j] + \beta_{ij} [(\alpha P_{DGi} - Q_{Di})P_j - (P_{DGi} - P_{Di})Q_j] \} \quad (2.27)$$

Total rugi-rugi daya aktif pada sistem akan minimum jika turunan parsial dari Persamaan (2.27) terhadap injeksi daya aktif dari DG ke bus i menjadi 0. Setelah disederhanakan dan penyusunan ulang, Persamaan (2.27) dapat ditulis sebagai berikut:

$$\frac{\partial P_L}{\partial P_{DGi}} = 2 \sum_{j=1}^N [\alpha_{ij}(P_j + aQ_j) + \beta_{ij}(aP_j - Q_j)] = 0 \quad (2.28)$$

Persamaan (2.26) dapat dituliskan sebagai berikut :

$$\alpha_{ii}(P_j + aQ_j) + \beta_{ii}(aP_j - Q_j) + \sum_{j=1, j \neq i}^N (\alpha_{ij}P_j - \beta_{ij}Q_j) + a \sum_{j=1, j \neq i}^N (\alpha_{ij}Q_j - \beta_{ij}P_j) = 0 \quad (2.29)$$

$$\text{set} \begin{cases} X_i = \sum_{j=1, j \neq i}^N (\alpha_{ij}P_j - \beta_{ij}Q_j) \\ Y_i = \sum_{j=1, j \neq i}^N (\alpha_{ij}Q_j - \beta_{ij}P_j) \end{cases} \quad (2.30)$$

Dari Persamaan (2.25), (2.26), (2.29), dan (2.30), dapat dikembangkan Persamaan (2.31),

$$\alpha_{ii}(P_{DGi} - P_{Di} + a^2 P_{DGi} - aQ_{Di}) + \beta_{ij}(Q_{Di} - aP_{Di}) + X_i + aY_i = 0 \quad (2.31)$$

Dari Persamaan (2.31), nilai kapasitas DG optimal di setiap bus i untuk meminimalkan rugi daya aktif dapat ditulis sebagai berikut:

$$P_{DGi} = \frac{\alpha_{ii}(P_{Di} + aQ_{Di}) + \beta_{ij}(aP_{Di} - Q_{Di}) - X_i - aY_i}{a^2 \alpha_{ii} + \alpha_{ii}} \quad (2.32)$$

2.4. Metode Algoritma Penyerbukan Bunga

Flower Pollination Algorithm (FPA) dapat diterapkan di masalah optimisasi memaksimalkan maupun meminimumkan. Dilakukan idealisasi dari karakteristik fenomena penyerbukan bunga di subbab sebelumnya, fenomena *flower constancy*, dan kelakuan organisme penyerbuk dengan aturan-aturan sebagai berikut:

1. Penyerbukan biotik dan penyerbukan silang dipandang sebagai penyerbukan global dengan organisme penyerbuk pembawa serbuk sari yang melakukan gerakan *Lévy Flights*.
2. Penyerbukan abiotik dan penyerbukan sendiri dipandang sebagai penyerbukan lokal.
3. *Flower constancy* dipandang sebagai peluang reproduksi yang proporsional dengan similaritas dari dua bunga yang terlibat.
4. Penyerbukan lokal dan global diatur oleh peluang berpindah.

Pada kenyataannya, setiap tanaman dapat memiliki bunga, dan setiap bunga dapat melepaskan jutaan bahkan milyaran gamet serbuk sari. Untuk alasan penyederhanaan, kita juga mengasumsikan bahwa setiap tanaman hanya memiliki satu bunga, dan setiap bunga hanya memproduksi satu gamet serbuk sari. Karena itu, kita tidak perlu membedakan antara sebuah gamet serbuk sari, sebuah bunga, sebuah tanaman berbunga, dan sebuah solusi dari sebuah masalah. Penyederhanaan ini berarti bahwa setiap solusi ekuivalen dengan sebuah bunga atau sebuah gamet serbuk sari (D. Lastomo, 2016).

Metode optimasi FPA merupakan metode dengan konsep penyerbukan (polinasi) pada bunga. Inti dari proses penyerbukan bunga adalah bagaimana serbuk sari jatuh ke kepala putik. Jatuhnya serbuk sari ke kepala putik tentu dengan berbagai alasan seperti tertiuap angin, terbawa oleh serangga bahkan burung. Subjek yang membantu proses penyerbukan, disebut Polinator. Pada metode ini tentu saja bunga yang terpilih untuk dihinggapi polinator merupakan bunga dengan penampilan terbaik, atas dasar tersebut metode FPA dijalankan (A. N. W. M. Rifki Ali & Sarijiya, 2015).

Pada metode FPA terdapat dua langkah kunci yaitu polinasi lokal dan polinasi global. Polinasi lokal adalah saat serbuk sari suatu bunga jatuh pada putik bunga itu sendiri yang disebabkan oleh komponen abiotik (angin dan hujan). Polinasi global adalah polinasi yang dilakukan oleh polinator biotik seperti serangga yang melakukan gerakan unik serangga (*Levy Flights*) dimana serbuk sari dapat jatuh pada putik di bunga lain (M. R. Djalal et al., 2017).

Pada polinasi global serbuk sari dapat dengan jauh dibawa oleh polinator, hal tersebut untuk memastikan suatu solusi dengan hasil terbaik, solusi terbaik (*fitness*) di representasikan dengan g^* . Hubungan tersebut dapat dinyatakan dengan Persamaan (2.33).

$$x_i^{t+1} = x_i^t + L (g^* - x_i^t) \quad (2.33)$$

Dimana:

x_i^t = serbuk sari i atau solusi vektor x_i pada itersasi ke- t

L = persamaan jarak terbang serangga (polinator)

L pada Persamaan (2.33) biasa disebut dengan fungsi *Levy*. Parameter L merupakan kekuatan dari penyerbukan. Fungsi *Levy* dapat dinyatakan dengan Persamaan (2.34).

$$L \sim \frac{\lambda \Gamma(\lambda) \sin(\frac{\pi\lambda}{2})}{\pi} \cdot \frac{1}{\delta^{1+\lambda}}, (\delta \gg \delta_0 > 0) \quad (2.34)$$

$\Gamma(\lambda)$ merupakan fungsi gamma, dan pada Persamaan (2.34) bernilai valid saat $\delta > 0$, pada teorinya nilai $\delta_0 = 0,1$.

Untuk penyederhanaan, diasumsikan setiap tumbuhan hanya memiliki satu bunga dan bunga tersebut hanya memproduksi satu serbuk sari, dapat disimpulkan sebuah solusi x_i sebanding dengan jumlah bunga. Pada Tabel 2.1 terlampir istilah dalam metode optimasi FPA (M. R. Djalal et al., 2017)

Tabel 2.1 Istilah dalam Metode FPA

Istilah	Metode FPA
Fenomena Penyerbukan	Permasalahan Optimasi
Populasi Bunga	Data Bus dan Saluran
Tingkat Kecocokan Bunga	Fungsi Objektif DG
Usaha Penyerbukan	Iterasi
Polinator	Solusi yang dilakukan pada setiap iterasi
Kemungkinan Terjadinya Polinasi Global atau Lokal	<i>Probability Switch</i>
Banyaknya Solusi yang ingin Didapatka	Dimensi

Sumber: M. R. Djalal et al., (2017)

Adapun penjelasan dari variabel diatas adalah sebagai berikut:

1. Fenomena penyerbukan bunga didefinisi sebagai permasalahan optimasi, dimana pada penelitian ini merupakan permasalahan optimasi penempatan lokasi bus dan kapasitas DG.
2. Populasi bunga didefinisikan sebagai data beban pada setiap bus dan juga impedansi saluran antar bus.
3. Tingkat kecocokan bunga didefinisi sebagai fungsi objektif DG, fungsi objektif DG yang digunakan pada penelitian ini adalah fungsi aliran daya BFS yang ditambahkan variabel untuk memasukkan lokasi bus dan nilai kapasitas injeksi daya aktif sebagai variabel untuk mengurangi rugi-rugi daya pada sistem distribusi radial.
4. Usaha penyerbukan didefinisi sebagai iterasi program optimasi, pada percobaan ini iterasi yang ditentukan sebanyak 5000 kali untuk mendapatkan nilai yang konvergen.
5. Polinator atau variabel yang melakukan penyerbukan didefinisi sebagai solusi yang diusahakan program untuk mendapatkan nilai fungsi objektif yang sesuai dengan batasan (*constraints*) yang diberikan.
6. *Probability switch* disini adalah kemungkinan terjadinya polinasi lokal atau global. Polinasi global adalah proses dimana variabel yang akan diuji pada fungsi objektif akan ditambahkan variabel fungsi *Levy* untuk mendapatkan solusi yang lebih baik.
7. Banyaknya solusi yang ingin didapatkan didefinisi sebagai dimensi. Pada percobaan ini dimensi yang ingin didapatkan sebanyak 6 buah, yaitu 3 posisi bus optimal pemasangan DG dan 3 kapasitas optimal masing-masing DG.

Pada penelitian ini metode FPA digunakan untuk mengoptimasi nilai posisi bus dan kapasitas DG sesuai Persamaan (2.33) dengan batasan (*constraints*) terlampir pada Persamaan (2.35) dan (2.36) untuk sistem IEEE 33 bus.

$$2 \leq x_{bus} \leq 33 \quad (2.35)$$

$$1 \leq x_{kapasitas} \leq 5000 \quad (2.36)$$

Dimana:

x_{bus} = solusi posisi bus

$x_{kapasitas}$ = solusi kapasitas DG

Nilai 2 pada Persamaan (2.35) adalah batas bawah untuk posisi bus DG yang akan dipasang pada sistem, sedangkan 33 adalah batas atas posisi bus. Nilai 1 pada Persamaan (2.36) adalah batas minimal kapasitas DG yaitu 1 kW, sedangkan 5000 adalah batas maksimal DG yaitu 5000 kW. Adapun persamaan fungsi objektif DG yang digunakan adalah persamaan aliran daya BFS, terlampir pada Persamaan (2.5) hingga (2.19).

Sesuai Persamaan (2.13) untuk mencari profil tegangan pada sistem distribusi 33 bus, diberikan batasan (*constraints*) pada Persamaan (2.37) agar solusi x_{bus} dan $x_{kapasitas}$ memenuhi tujuan optimasi yaitu mengurangi losses dan meningkatkan profil tegangan pada sistem.

$$V_{min} \leq V_{bus} \leq V_{maks} \quad (2.37)$$

Dimana:

$$V_{min} = 0.95 \text{ pu}$$

$$V_{maks} = 1.05 \text{ pu}$$

Aliran daya setelah optimasi haruslah memenuhi beberapa batasan (*constraints*) diatas untuk mendapatkan solusi x_{bus} dan $x_{kapasitas}$ pada metode optimasi FPA (M. R. Djalal et al., 2017).

2.5. Distributed Generation (DG)

Definisi DG menurut beberapa ahli dan lembaga riset internasional masih terdapat perbedaan. Menurut DPCA (*Distributed Power Coalition of America*) DG adalah pembangkit listrik berskala kecil yang dengan lokasi yang lebih dekat pada sisi pelanggan daripada pembangkit utama, pembangkit ini dapat dihubungkan langsung pada sisi pelanggan atau terhubung pada jaringan transmisi atau distribusi terlebih dahulu. CIGRE (*International Conference on High Voltage Electric System*) mendefinisikan DG sebagai pembangkit yang tidak terpusat dan kebanyakan dihubungkan pada jaringan distribusi. IEA (*International Energy*

Agency) mendefinisikan DG sebagai pembangkit yang melayani kebutuhan energi listrik pelanggan secara langsung atau berdekatan dengan lokasi pelanggan dan juga dapat berfungsi sebagai pendukung jaringan distribusi. Menurut Arthur D. Little DG dapat merupakan pembangkit yang terhubung pada jaringan atau pembangkit yang berdiri sendiri, pembangkit yang bersifat modular yang dapat memberikan keuntungan bagi pelanggan, sistem kelistrikan, atau keduanya (Anugerah Putra, 2016).

Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) mendefinisikan *distributed generation (DG)* sebagai pembangkit yang menghasilkan energi dalam kapasitas yang lebih kecil dibandingkan pusat – pusat pembangkit konvensional dan dapat dipasangkan hampir pada setiap sistem tenaga listrik (Suhadi, 2008).

Distributed Generation merupakan generator–generator yang terdistribusi (tersebar) dalam sistem tenaga listrik yang dipasang guna menginjeksikan daya aktif (P) dan daya reaktif (Q) untuk memperbaiki profil tegangan, meningkatkan keandalan atau dengan kata lain memperbaiki keadaan sistem distribusi. *Distributed generation* memiliki ukuran yang lebih kecil daripada pembangkit utama dan letaknya dalam sistem tenaga listrik yaitu lebih dekat dengan beban – beban sistem atau dengan kata lain pada jaringan distribusi (Chandra Lima Silalahi et al., 2017).

Dalam pendefinisian kapasitas pembangkit tersebar terdapat definisi yang berbeda beda dan saat ini definisi yang digunakan sebagai berikut.

1. *The Electric Power Research Institute* mendefinisikan pembangkit tersebar sebagai pembangkit dengan kapasitas beberapa kilowatt sampai dengan 50 MW.
2. Menurut *Gas Research Institute* mendefinisikan pembangkit tersebar sebagai pembangkit dengan kapasitas antara 25 kW dan 25 MW.
3. Preston dan Rastler menentukan ukuran mulai dari beberapa kilowatt hingga lebih dari 100 MW.
4. Cardell mendefinisikan pembangkit tersebar sebagai pembangkit dengan kapasitas antara 500 kW dan 1 MW.

5. *International Conference on Large High Voltage Electric Systems (CIGRE)* mendefinisikan pembangkit tersebar sebagai pembangkit dengan kapasitas lebih kecil dari 50 -100 MW.

Beberapa permasalahan teknis yang berhubungan dengan DG dapat memberikan beberapa variasi yang signifikan terhadap kapasitas pembangkitan dari DG tersebut. Oleh karena itu, perlu diperkenalkan pengkategorian yang tepat untuk mengklasifikasikan DG berdasarkan kapasitas pembangkitan yang dimilikinya, terdapat empat jenis DG berdasarkan klasifikasi yaitu (Chandra Lima Silalahi et al., 2017):

Tabel 2.2 Klasifikasi DG Berdasarkan Kapasitas Pembangkitan

Jenis DG	Kapasitas Pembangkitan
Micro DG (DG Mikro)	1 Watt – 5 KW
Small DG (DG Kecil)	5kW – 5MW
Medium DG (DG Sedang)	5MW – 50 MW
Large DG (DG Besar)	50MW – 300MW

Sumber: Chandra Lima Silalahi et al., (2017)

Sekarang ini distributed generation (DG) didefinisikan memiliki banyak jenis dari daya yang diinjeksikan ke sistem distribusi. Berikut ini jenis – jenis dari distributed generation (DG) berdasarkan daya yang diinjeksikan ke sistem distribusi (Awansah, 2018):

1. Tipe 1, distributed generation (DG) yang menginjeksikan hanya daya aktif saja. Contoh dari jenis ini seperti photovoltaic, fuel cells, micro turbin dengan faktor daya sama dengan 1.
2. Tipe 2, distributed generation (DG) yang menginjeksikan daya reaktif saja. Contoh dari jenis ini seperti kompensator sinkron.
3. Tipe 3, distributed generation (DG) yang menginjeksikan daya aktif dan daya reaktif. Contoh dari jenis ini seperti generator sinkron
4. Tipe 4, distributed generation (DG) yang menginjeksikan daya aktif namun di waktu yang sama juga menyerap daya reaktif dari sistem. Contoh dari jenis ini seperti generator induksi.

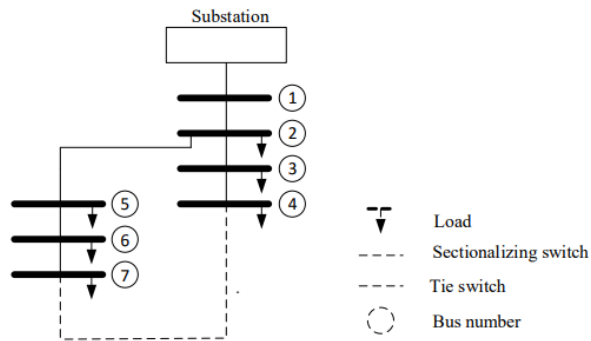
2.6. Rekonfigurasi Jaringan

Rekonfigurasi jaringan (*Network Reconfiguration*) merupakan suatu usaha merubah bentuk konfigurasi jaringan distribusi dengan mengoperasikan pensakelaran terkontrol jarak jauh (*switching remotely controlled*) pada jaringan distribusi tanpa menimbulkan akibat yang beresiko pada operasi dan bentuk sistem jaringan distribusi secara keseluruhan. Dalam kondisi operasi normal, rekonfigurasi jaringan dilakukan karena dua alasan (Muhammad Fayyadl et al., 2011).

1. Mengurangi rugi-rugi daya pada sistem (*loss reduction*).
2. Mendapatkan pembebanan yang seimbang untuk mencegah pembebanan yang berlebih pada jaringan (*load balancing*).

Rekonfigurasi jaringan merupakan salah satu teknik optimasi pada jaringan distribusi. Rekonfigurasi jaringan merupakan proses perubahan topologi jaringan dengan cara merubah status tutup saklar penghubung (*tie switch*) dan buka saklar pemisah (*sectionalizing switch*). Rekonfigurasi jaringan meningkatkan operasi pada jaringan dan secara spesifik dapat meningkatkan kualitas tegangan dan daya. Sehingga pengoperasian sistem distribusi dapat dilakukan dengan biaya yang minimum. Untuk mendapatkan atau menentukan status *tie switch* dan *secniolizing switch* yang ditutup dan dibuka maka dapat menggunakan pencarian menggunakan metoda optimasi (Erwin Prawira Santosa et al., 2015).

Untuk mendapatkan rekonfigurasi jaringan yang paling optimal digunakan konsep *branch exchange*. *Branch exchange* merupakan cara yang paling mudah diterapkan pada sistem distribusi radial. Jika *tie switch* tertutup, maka akan ada loop yang terbentuk sehingga harus ada saluran dengan *sectionalizing switch* yang dibuka untuk mengembalikan sistem ke bentuk radial (Santosa et al., 2016).



Gambar 2. 4 Rekonfigurasi jaringan pada sistem distribusi radial (Santosa, 2016)

Rekonfigurasi jaringan merupakan suatu usaha merubah bentuk konfigurasi jaringan distribusi dengan pemasangan switch NO (*Normally Open*) dan switch NC (*Normally Close*) pada jaringan distribusi tanpa menimbulkan akibat yang beresiko pada operasi dan bentuk sistem jaringan distribusi secara keseluruhan. Maka pemasangan switch NO dan switch NC dilakukan setelah *Load Flow* dalam kondisi *Base Case*. Pemasangan switch NO pada titik ujung penyulang yang mengalami pelanggaran dengan pemasangan *tie switch* dari ujung titik penyulang baru ke bus pada penyulang yang telah terpasang switch NO (Isnaini, 2017).