



ITS
Institut
Teknologi
Sepuluh Nopember

TUGAS AKHIR - TE 141599

***EVENT-DRIVEN LOAD SHEDDING* PADA JARINGAN
DISTRIBUSI TIGA FASA PT. PLN APJ SURABAYA UTARA
MENGUNAKAN INDEKS RANKING TEGANGAN URUTAN
POSITIF**

A'tat Khasanah
NRP 2212106047

Dosen Pembimbing
Prof. Ir. H. Ontoseno Penangsang, M.Sc., Ph.D.
Dr.Eng. Rony Seto Wibowo, ST., MT.

JURUSAN TEKNIK ELEKTRO
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2015



ITS
Institut
Teknologi
Sepuluh Nopember

FINAL PROJECT - TE 141599

EVENT-DRIVEN LOAD SHEDDING BASED ON POSITIVE-SEQUENCE VOLTAGE RANKING IN THREE-PHASE DISTRIBUTION NETWORKS PT. PLN APJ SURABAYA UTARA

A'tat Khasanah
NRP 2212106047

Supervisors
Prof. Ir. H. Ontoseno Penangsang, M.Sc., Ph.D.
Dr.Eng Rony Seto Wibowo, ST., MT.

DEPARTMENT OF ELECTRICAL ENGINEERING
Faculty Of Industry Technology
Sepuluh Nopember Institute Of Technology
Surabaya 2015

**EVENT-DRIVEN LOAD SHEDDING PADA JARINGAN
DISTRIBUSI TIGA FASA PT. PLN APJ SURABAYA UTARA
MENGUNAKAN INDEKS RANKING TEGANGAN URUTAN
POSITIF**

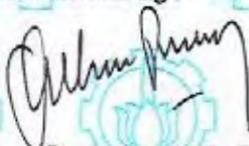
TUGAS AKHIR

Diajukan untuk Memenuhi Sebagian Persyaratan
Untuk Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
Pada
Bidang Studi Teknik Sistem Tenaga
Jurusan Teknik Elektro
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Menyetujui :

Dosen Pembimbing I

Dosen Pembimbing II


Prof. Ir. Ontoseno Penangsang, M.Sc. Ph.D
NIP. 194907151974121001


Dr. Rony Seto Wibowo, ST., MT.
NIP. 197411292000121001


**SURABAYA
JANUARI, 2015**

ABSTRAK

Sebanyak 9.539.526 konsumen listrik di Jawa Timur masih cenderung mengalami peningkatan jumlah dari tahun ke tahun. Peraturan baru tentang pencabutan tarif dasar listrik pada Januari 2015 tidak menurunkan jumlah pelanggan. PT. PLN dituntut untuk tetap menyediakan listrik yang berkualitas, handal dan murah. PT. PLN harus terus berinovasi, memperbaiki dan menjaga system distribusi agar berjalan dengan baik. Overload sewaktu-waktu bisa terjadi dengan jumlah pelanggan yang telah mencapai 9.539.526 di Jawa Timur. Pelepasan beban adalah salah satu cara menjaga kestabilan sistem kelistrikan dan menjaga standart tegangan tetap pada batasnya untuk menjaga mutu listrik itu sendiri sebagai produk utama dari PT.PLN . Oleh karena itu, kami mengusulkan pada penelitian ini sebuah system pelepasan beban berbasis *event-driven* yang menggunakan analisa aliran daya metode network topology dan logika fuzzy. Logika fuzzy mempertimbangkan dua faktor yaitu nilai tegangan dan nilai *positive sequence voltage ranking index*. Nilai *positive sequence voltage ranking index* menunjukkan bus terlemah. Semakin kecil nilai *positive sequence voltage ranking index* maka semakin lemah juga bus tersebut. Proses defuzzifikasi pada nilai tegangan dan nilai *voltage ranking index* mampu menghitung nilai spesifik beban yang harus dilepas. Hasil dari pengujian sistem *event-driven load shedding* menunjukkan bahwa saran yang dihasilkan untuk melepas suatu bus tidak hanya berdasarkan nilai tegangannya saja, namun dengan memperhatikan nilai *voltage ranking index* untuk indikator bus terlemah. Sistem pelepasan beban berbasis *event-driven* membantu menentukan bus yang harus dilepas dan jumlah beban spesifik yang harus dilepas, sehingga proses pelepasan beban menjadi lebih cepat.

Kata Kunci : *Event-driven load shedding, Network-topology load flow, Logika fuzzy, Positive sequence voltage ranking index*

ABSTRACT

A total of 9,539,526 Electric consumer in East Java still tends to increase From Year to year. The new regulations state about revocation electricity rates on January 2015 will not decrease a number of customer. Improved customer is comparable with improved of economic level and the need for electricity continues to grow. PT. PLN must make sure that provide a qualified electrical, reliable and cheap. PT. PLN must keep innovating, improving and maintaining distribution system to keep the system running properly. Overload could happen anytime with customers who have reached 9,539,526 in East Java. Load shedding is the one of solution to keep the stability of electrical system and keep the limit voltage standard for keeping power quality as a main product of PLN itself. Therefore we propose in this research an event-driven load shedding by using network-topology method of load flow and fuzzy logic. The fuzzy logic use two variable from load flow analysis, there are voltage magnitude and index value from positive sequence voltage ranking index. Value of positive sequence voltage ranking index showed the weakest bus. Smaller value of voltage ranking index, weaker of bus. Defuzzification process on voltage magnitude and ranking index can calculate a specific value of load must be shed. The result of testing this system show that load shedding is not based on the voltage magnitude only, but also using voltage ranking index as indicator of sensitivity of bus. Event driven load shedding can give the information about the bust must be shed and the specific value of load must be shed quickly.

Keywords : *Event-driven load shedding, Network-topology load flow, Logika fuzzy, Positive sequence voltage ranking index*

KATA PENGANTAR



Segala puji bagi Allah Subhaanahuwata'ala yang telah dan selalu melimpahkan rahmat dan kasihNya kepada saya sehingga dapat terselesaikannya penelitian ini yang berjudul :

“EVENT DRIVEN LOAD SHEDDING PADA PT.PLN APJ SURABAYA UTARA MENGGUNAKAN INDEKS RANKING TEGANGAN URUTAN POSITIF”

Dalam menyelesaikan penelitian ini saya berpegang pada teori yang pernah saya dapatkan dan arahan dari dosen pembimbing penelitian ini, serta seluruh pihak yang membantu terselesaikannya penelitian ini.

Penelitian ini merupakan salah satu syarat akademik untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik (S.T) di Fakultas Teknologi Industri Jurusan Teknik Elektro Institut Teknologi Sepuluh Nopember.

Penulis menyadari bahwa masih terdapat banyak kekurangan pada penelitian ini. Oleh karena itu penulis berharap saran dan kritik yang membangun dari para pembaca. Semoga dari penelitian ini dapat memberikan manfaat bagi para mahasiswa Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya pada umumnya dan kepada para seluruh pembaca pada khususnya.

Surabaya, Januari 2015

Penyusun

~halaman ini sengaja dikosongkan~

UCAPAN TERIMA KASIH

Syukur Alhamdulillah selalu penulis haturkan atas terselesaikannya penelitian ini dengan baik dan tepat waktu. Penelitian ini dapat terlaksana dengan baik atas bantuan dari beberapa pihak. Untuk itu tak lupa penulis menyampaikan terima kasih pada pihak-pihak yang telah membantu penelitian ini, diantaranya adalah :

1. Kedua orang tuaku tercinta, Bapak dan Ibu yang telah memberikan doa, semangat dan kasih sayang yang berlimpah. Aku bukan apa-apa tanpa doa dari Bapak Ibu.
2. Kedua kakakku tersayang, mbak Zulfa dan mbak Zunnan yang selalu memberiku semangat dan arahan dan stok jajan ☺ untuk menyelesaikan penelitian ini. Mereka adalah sponsor utama. Dan adekku, wawan yang turut “*mengriwuhi*” penyelesaian penelitian ini^^.
3. Bapak Prof. Dr. Ir. Triyogi Yuwono, DEA selaku rektor ITS dan Bapak Dr. Tri Arief Sardjono, ST., MT. selaku ketua jurusan Teknik Elektro ITS Surabaya.
4. Bapak Prof. Ir. H. Ontoseno Penangsang, M.Sc., Ph.D. dan Bapak Dr. Eng. Rony Seto Wibowo, ST., MT. selaku Dosen Pembimbing. Terima kasih atas bimbingan dan pencerahannya selama penelitian ini. Memberikan semangat, kepercayaan dan doa kepada saya. Dan tak lupa permintaan maaf dari saya karena mungkin susah dibimbing dan jarang bimbingan.
5. Bapak Ir. Sjamsjul Anam, MT., Bapak Dr. Ir. Soedibjo, M.MT., Bapak Heri Suryoatmojo, ST., MT., Ph.D dan Bapak Feby Agung Pamuji, ST., MT. yang telah memberikan ilmu dan waktunya dalam menguji kekuatan penelitian yang saya lakukan.
6. Bapak Dimas Fajar Uman Putra yang selalu sabar membimbing dan mengarahkan saya untuk memahami setiap detail dari penelitian ini, terima kasih banyak Pak Uman. Semoga Disertasinya lancar total ☺.
7. Seluruh Dosen yang telah menularkan ilmunya. Dan kepada seluruh karyawan dan teknisi yang turut mendukung terselesaikannya penelitian ini.

8. Seluruh guruku TK, SD, SMP, SMA dan Madrasah TPQ, Ibtidaiyah dan Tsanawiyah. Terima kasih atas keikhlasan dan barokah ilmunya sampai aku bisa dijenjang ini.
9. Teman-temanku satu kelas Litas Jalur Teknik Elektro Angkatan Genap 2012 yang sudah menjadi teman senasib sepenanggungan, satu tujuan selama ini, terima kasih atas ilmunya :D.
10. Buat mas Bair terima kasih sudah membantu banyak hal dalam pemahaman dan semangatnya. Terima kasih banyak sudah bersedia aku ganggu setiap waktu.
11. Semua teman, adek dan kakak kelas di Teknik Elektro yang telah memberikan semangat dan doa. Khususnya keluarga besar Teknik Elektro seluruh angkatan. We are the best.
12. Google yang telah memberi pencerahan saat tidak ada yang bisa ditanya langsung. Terima kasih mbah Goog ^^.
13. Keluarga besarku yang telah memberikan doa dan pengertian saat melakukan penelitian.
14. Terima kasih banyak dari hati yang terdalam untuk seseorang yang selalu ada dalam hidupku, menerimaku apa adanya walaupun sedang sibuk mengerjakan Tugas Akhir.
15. Semua pihak yang tidak dapat saya sebutkan satu persatu.

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
LEMBAR PENGESAHAN	iii
ABSTRAK	v
ABSTRACT	vi
KATA PENGANTAR	vii
UCAPAN TERIMA KASIH	ix
DAFTAR ISI	xi
DAFTAR GAMBAR	xiii
DAFTAR TABEL	xiv
BAB I PENDAHULUAN	
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Permasalahan.....	1
1.3 Tujuan.....	2
1.4 Batasan Masalah.....	3
1.5 Metodologi.....	3
1.6 Sistematika Penulisan.....	4
1.7 Manfaat.....	4
BAB II PELEPASAN BEBAN PADA JARINGAN DISTRIBUSI	
2.1 Jaringan Distribusi.....	5
2.2 Kestabilan Tegangan.....	9
2.3 <i>Voltage Collapse</i>	10
2.4 Gangguan Beban Lebih.....	11
2.5 Pengendalian Tegangan.....	11
2.6 Pelepasan Beban.....	11
2.6.1 Pengertian Pelepasan Beban.....	11
2.6.2 Metode Pelepasan Beban.....	12
2.6.3 Masalah Pelepasan Beban.....	12
2.7 Indeks Ranking Tegangan Urutan Positif.....	13
2.8 <i>Fuzzy Logic</i>	16
2.8.1 Pengertian Logika Fuzzy.....	16
2.8.2 Sistem Inferensi Fuzzy.....	17
2.8.3 Properti Fuzzy.....	17
2.8.4 Operasi Fuzzy.....	19
2.8.5 Defuzzifikasi.....	20

BAB III PERANCANGAN SISTEM

3.1	Pengumpulan Data	25
3.2	Analisa Aliran Daya	27
3.3	<i>Positive Sequence Voltage Ranking Index</i>	29
3.4	Besaran Per Unit	29
3.5	Proses pembelajaran Karakteristik Overload pada Penyulang Ometraco	30
3.6	Penerapan Fuzzy	32
3.6.1	Proses Fuzzifikasi	33
3.6.2	Proses Defuzzifikasi.....	36

BAB IV UJICOBA DAN ANALISA

4.1	Uji Coba Penambahan Beban pada Bus 2	37
4.2	Uji Coba Penambahan Beban pada Bus 4	42
4.3	Uji Coba Penambahan Beban pada Bus 8	46

BAB V PENUTUP

5.1	Kesimpulan	51
5.2	Saran.....	51

DAFTAR PUSTAKA	53
-----------------------------	----

BIOGRAFI	55
-----------------------	----

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Pola jaringan Distribusi Radial.....	6
Gambar 2.2	Peralatan Jaringan Distribusi Sekunder.....	6
Gambar 2.3	Jaringan Radial Tipe Pohon	7
Gambar 2.4	Jaringan Radial dengan <i>Tie</i> dan <i>Switch</i> Pemisah.....	8
Gambar 2.5	Jaringan Radial dengan Pusat Beban.....	8
Gambar 2.6	Jaringan Radial dengan Pembagian <i>Phase Area</i>	9
Gambar 2.7	Bentuk Kurva P-V	13
Gambar 2.8	Rangkaian ekivalen dari jaringan dua bus seimbang	14
Gambar 2.9	Inferensi Fuzzy	17
Gambar 2.10	Himpunan Fuzzy.....	18
Gambar 2.11	Kurva Representasi Fuzzy	19
Gambar 2.12	Proses Defuzzifikasi.....	20
Gambar 3.1	Manfaat Aplikasi Sistem	23
Gambar 3.2	Gambaran Umum Sistem	23
Gambar 3.3	Gambaran Umum Sistem	23
Gambar 3.4	Flowchart Sistem.....	24
Gambar 3.5	Single Line Diagram Penyulang Ometraco	25
Gambar 3.6	Jaringan Distribusi 6 Bus	27
Gambar 3.7	Nilai Keanggotaan Tegangan	33
Gambar 3.8	Nilai Keanggotaan VRI Kasus 1	33
Gambar 3.9	Nilai Keanggotaan VRI Kasus 2	33
Gambar 3.10	Nilai Keanggotaan VRI Kasus 3	34
Gambar 3.11	Nilai Keanggotaan VRI Kasus 4	34
Gambar 4.1	Hasil Running Program Uji Coba Bus 2	39
Gambar 4.2	Membership function tegangan dan vri	40
Gambar 4.3	Perhitungan Defuzzifikasi Uji Coba Bus 2	41
Gambar 4.4	Hasil Running Program Uji Coba Bus 4	43
Gambar 4.5	Membership function tegangan dan vri	44
Gambar 4.6	Perhitungan Defuzzifikasi Uji Coba Bus 4	45
Gambar 4.7	Hasil Running Program Uji Coba Bus 8	47
Gambar 4.8	Membership function tegangan dan vri	48
Gambar 4.9	Perhitungan Defuzzifikasi Uji Coba Bus 8	49

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1	Rule Fuzzy	19
Tabel 3.1	Data Saluran Penyulang Ometraco	26
Tabel 3.2	Data Beban Penyulang Ometraco	26
Tabel 3.3	Data Hasil Pembelajaran Karakteristik Penyulang Untuk Pelepasan Dua Bus	31
Tabel 3.4	Data Hasil Pembelajaran Karakteristik Penyulang Untuk Pelepasan Satu Bus	32
Tabel 3.5	Tabel Rule Operasi Fuzzy	35
Tabel 3.6	Tabel Operasi Defuzzifikasi	36
Tabel 4.1	Data Beban Penyulang Ometraco	37
Tabel 4.2	Hasil Load flow Uji Coba pada Bus 2	38
Tabel 4.3	Hasil Fuzzifikasi Uji Coba pada Bus 2	41
Tabel 4.4	Hasil Load flow Uji Coba pada Bus 4	42
Tabel 4.5	Hasil Fuzzifikasi Uji Coba pada Bus 4	44
Tabel 4.6	Hasil Load flow Uji Coba pada Bus 8	46
Tabel 4.7	Hasil Fuzzifikasi Uji Coba pada Bus 8	48

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Kontinuitas penyediaan daya harus selalu dijaga dari berbagai macam kemungkinan gangguan. Berkurangnya pasokan daya yang terjadi secara tiba-tiba pada suatu sistem akan mempengaruhi stabilitas dari sistem tersebut. Seperti contoh kasus adanya generator yang trip dan mengakibatkan ketidakseimbangan antara daya yang disuplai dengan kebutuhan beban yang ada. Ketidakseimbangan ini tidak dapat dibiarkan terlalu lama karena selanjutnya akan dapat mengakibatkan black-out atau padam total pada sistem. Ketidaksetimbangan antara daya suplai dan beban dapat dijaga dengan beberapa langkah yaitu mulai dari penjadwalan secara optimal generator sampai pada pelepasan beban. Salah satu cara untuk menjaga kesetimbangan daya suplai dan beban pada saat terjadi gangguan adalah adanya pelepasan beban (*load shedding*). Mekanisme pelepasan beban dituntut untuk cepat karena merupakan langkah terakhir yang digunakan untuk menyelamatkan sistem pada saat terjadi gangguan. Pada umumnya pelepasan beban dilakukan terhadap bus yang paling rendah tegangannya atau pada area dengan prioritas pelanggan paling rendah bisa disebut juga area pinggir. Pada operasi sistem PLN sendiri pelepasan beban dilakukan oleh dispatcher atau petugas lapangan berdasarkan koordinasi bersama. Pelepasan dilakukan berdasarkan pertimbangan dan perhitungan manual pada bus yang memungkinkan untuk dibuang sesuai penjadwalan pada hari tersebut. Keputusan pelepasan beban hanya berdasarkan pemilihan oleh dispatcher berdasarkan tingkat tegangan saja tentu terasa tidak adil dan memberikan masalah baru jika ada dispatcher baru yang tidak mengetahui tentang prioritas pelanggan. Berdasarkan hal tersebut diatas, maka peneliti mengajukan pendekatan baru untuk menentukan bus mana yang harus dilepas berdasarkan nilai tegangan dan *positive sequence voltage ranking index*.

1.2 Permasalahan

Penelitian ini akan membahas tentang *Load Flow Three-phase Unbalance* sebagai dasar dari perhitungan. Proses selanjutnya yaitu metode *Positive Sequence Voltage Ranking Index* adalah untuk mendapatkan (*ranking*) urutan indeks pada bus. Dari ranking yang

didapatkan akan dianalisa nilai dan urutan VRI (*voltage ranking indeks*) pada masing masing bus. Proses selanjutnya adalah mengecek apakah suatu sistem perlu dilakukan pelepasan beban atau tidak. Dan sistem akan menjawab berupa saran perlu atau tidaknya dilakukan pelepasan beban. Jika perlu dilakukan pelepasan beban maka ditunjukkan bus mana saja yang harus di lepas bebannya. Setelah diberikan saran untuk pelepasan beban atau tidak maka sistem di cek ulang untuk mengetahui apakah masih ada bus yang memiliki tegangan kurang dari 0.9 pu. Jika masih ada bus yang memiliki tegangan dibawah 0.9 pu. maka proses Load Flow dan penentuan ranking akan diulang.

Proses pemberian saran untuk bus mana saja yang akan dilepas bebannya disimpan kedalam database. Database ini akan memberikan output berupa saran lokasi pelepasan beban pada bus tertentu. Penentuan bus mana yang harus dilepas bebannya, dihitung menggunakan metode fuzzy dengan dua variable yaitu nilai tegangan dan nilai VRI. Hasil perhitungan ini akan disimpan kedalam database dengan bentuk empat kondisi kasus. Dan saat terjadi gangguan maka sistem akan memberikan saran berdasarkan kondisi kondisi kasus yang telah dibuat sebelumnya. Sehingga saat terjadi gangguan maka sistem akan langsung memberikan pilihan keputusan bus mana yang akan dilakukan pelepasan beban. Mekanisme untuk meyimpan banyak jenis kasus dan kemudian memanggilnya kembali jika terjadi gangguan disebut mekanisme *event-driven*. Sehingga akan didapatkan bus mana yang harus dieksekusi secara cepat karena komputasi yang diperlukan adalah membandingkan dan bukan menghitung dari awal.

1.3 Tujuan

Event-driven load shedding is an effective countermeasure against voltage collapse in power system[1]. Tujuan dari penelitian ini adalah memberikan solusi lokasi bus yang harus dilepas bebannya saat terjadi gangguan berdasarkan nilai tegangan dan *positive sequence voltage ranking indeks* secara cepat. Setelah diberikan saran pelepasan beban pada suatu bus maka akan diketahui kondisi sistem jika terjadi gangguan dan kemudian dilakukan pelepasan beban. Sedangkan untuk perhitungan jumlah beban yang harus dilepas secara spesifik untuk mengembalikan kepada batas tegangan yang diijinkan, diharapkan nantinya dapat diaplikasikan untuk meminimalisir jumlah beban yang dilepas.

1.4 Batasan Masalah

Dalam penelitian Tugas Akhir ini sistem yang dibangun adalah load shedding berdasarkan nilai tegangan dan nilai positive sequence voltage ranking index.

Gangguan yang dimaksud dalam sistem ini adalah penambahan beban. Untuk database yang dibuat dibatasi dengan jumlah 5 kasus dan mengambil 2 urutan bus paling atas untuk membangun kasus tersebut. Dan jika tidak ada kasus yang mirip dengan kasus yang ada pada database maka akan diterima sebagai kasus baru.

Analisa dilakukan pada penyulang ometraco.

1.5 Metodologi

Metodologi yang digunakan dalam penelitian ini adalah :

1. Pengambilan data
Pengambilan data dilakukan pada PT.PLN berupa data pembangkitan dan data beban pada sistem distribusi 20kV. Data tersebut akan diolah dengan *software* Matlab untuk selanjutnya didapatkan hasil berupa bus dengan rankingnya masing-masing.
2. Simulasi
Simulasi dilakukan setelah mendapatkan data-data yang diperlukan untuk menentukan ranking bus yang akan dieksekusi. Simulasi menggunakan *software* Matlab.
3. Analisa data
Berdasarkan simulasi yang telah dilakukan akan didapatkan hasil berupa tegangan sistem akibat dari adanya gangguan dan setelah dilakukan proses load shedding. Dari hasil tersebut maka dapat dijadikan bahan analisa untuk pengaturan kestabilan tegangan dengan mempertimbangkan ranking bus yang telah dihitung dengan metode VRI(*Voltage Ranking Index*).
4. Kesimpulan
Dari analisa data yang telah disimulasikan maka dapat ditarik sebuah kesimpulan dari penelitian yang telah dilakukan dengan ranking bus berdasarkan hasil perhitungan urutan positif. Bagaimana pengaruh dari pembuangan beban yang telah dilakukan terhadap sistem.

1.6 Sistematika Penulisan

Penulisan buku tugas akhir ini dibagi menjadi 5 bagian, yaitu :

Bab I

Bab pertama dalam buku tugas akhir ini diisi dengan pendahuluan yang terdiri dari latar belakang, perumusan masalah, tujuan, manfaat, batasan masalah, tinjauan pustaka sebagai referensi utama pengerjaan tugas akhir, metodologi dalam penelitian dan sistematika penulisan.

Bab II

Bab kedua dalam buku tugas akhir ini menjelaskan tentang teori teori dasar yang digunakan untuk menyelesaikan permasalahan yang dibahas dalam tugas akhir.

Bab III

Bab ketiga akan membahas tentang perencanaan program yang akan dibangun. Mulai dari desain dalam bentuk flowchart serta urutan langkah-langkah yang dilakukan untuk membangun sebuah analisa melalui pembuatan aplikasi.

Bab IV

Bab keempat akan digunakan sebagai penampil hasil dan analisa dari apa yang telah dikerjakan.

Bab V

Bab kelima merupakan penutup yang berisi harapan dan saran untuk pengembangan penelitian selanjutnya.

1.7 Manfaat

Manfaat dari penelitian ini adalah memberikan saran yang tepat dan cepat kepada sistem untuk berbagai macam kondisi gangguan yang sewaktu waktu berbeda nilai gangguannya dan masih kabur untuk di lepas bebannya atau tidak dan atau dilepas bebannya dua bus sekaligus. Manfaat dalam sistem adalah membantu menaikkan tingkat keandalan dalam sistem distribusi 20kV Surabaya.

BAB II

PELEPASAN BEBAN

PADA JARINGAN DISTRIBUSI

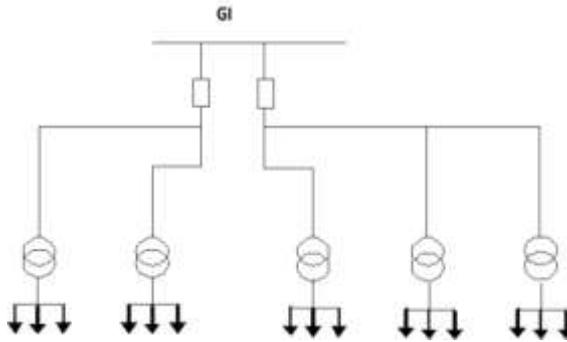
Pelepasan beban merupakan pertahanan akhir dari usaha untuk mempertahankan keberlangsungan sistem tenaga listrik. Pelepasan beban digunakan untuk menjauhkan sistem tenaga listrik dari kondisi yang tidak diharapkan yaitu tegangan jatuh. Pelepasan beban pada jaringan distribusi untuk saat ini menggunakan system pelepasan dengan melepas bus pada suatu trafo distribusi. Penelitian terus dilakukan untuk memperbaiki kontrol terhadap sistem agar tetap dapat menjaga keberlangsungan distribusi tenaga listrik dengan pelepasan beban seminimal mungkin. Untuk itu dalam penelitian ini akan dibangun suatu kontrol sistem pelepasan beban berbasis *event-driven* dengan bantuan indeks ranking tegangan urutan positif sebagai penunjuk bus terlemah dan logika fuzzy sebagai alat untuk menentukan sebuah keputusan pelepasan beban. Berikut akan dijelaskan tentang jaringan distribusi, pelepasan beban dan metode fuzzy.

2.1 Jaringan Distribusi

Sistem distribusi tenaga listrik merupakan tahapan setelah system transmisi tenaga listrik. System distribusi menyalurkan daya dari gardu induk 20 kV yang kemudian disalurkan melalui distribusi primer dan diturunkan tegangannya menjadi 220/380 Volt untuk didistribusikan melalui distribusi sekunder. Sehingga dapat diklasifikasikan bahwa system distribusi primer adalah dimulai dari titik sekunder trafo gardu induk menuju titik primer trafo distribusi pada gardu distribusi dengan tegangan antara 6kV – 20 kV. Distribusi sekunder dimulai dari titik sekunder trafo distribusi pada gardu induk distribusi menuju titik primer trafo konsumen, sehingga tegangan yang diterima konsumen adalah 220/380 Volt.

Jaringan distribusi banyak menggunakan system radial, dimana kelebihanannya adalah murah biaya investasinya dan sederhana. Kelebihan selanjutnya adalah pengamanan terhadap arus gangguan lebih mudah dan pengaturan tegangan juga lebih mudah. Namun kekurangan system radial adalah apabila terjadi gangguan dalam suatu penyulang, maka beban pada penyulang tersebut akan mengalami pemadaman. Kekurangan lain pada sistem ini adalah jatuh tegangan pada beban paling ujung memiliki nilai

paling besar, sehingga mutu tegangannya kurang bagus. Berikut adalah pola sederhana dari konfigurasi jaringan distribusi radial.



Gambar 2.1 Pola Jaringan Distribusi Radial
(Sumber : Google)

System distribusi sekunder memiliki perlengkapan penunjang berupa :

- Papan pembagi pada trafo distribusi,
- Hantaran tegangan rendah (saluran distribusi sekunder).
- Saluran Layanan Pelanggan (SLP) (ke konsumen/pemakai)
- Alat Pembatas dan pengukur daya (kWh meter) serta fuse atau pengaman pada pelanggan.

Alat-alat pada distribusi tersebut dipasang dengan letak seperti pada gambar berikut :



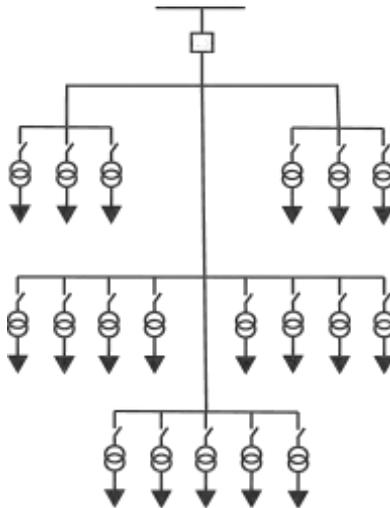
Gambar 2.2 Peralatan jaringan distribusi sekunder
(Sumber : Google)

Jaringan tipe radial memiliki banyak macam yaitu, tipe pohon, jaringan distribusi radial dengan tie dan switch pemisah, jaringan radial

dengan pusat beban, jaringan distribusi radial dengan pembagian phase area. Berikut akan ditunjukkan gambar model dari masing masing tipe jaringan distribusi.

a. Jaringan Radial Tipe Pohon

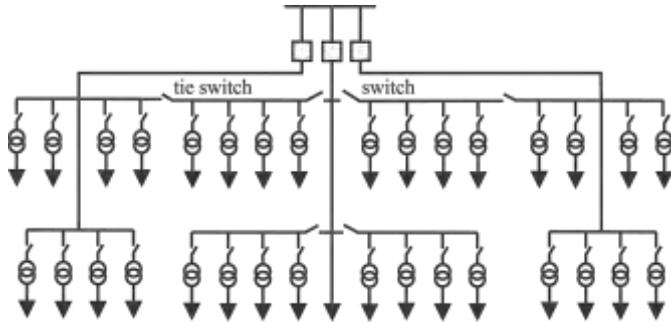
Jaringan tipe pohon merupakan jaringan radial dengan satu sumber yang melayani beban dengan jalur yang bercabang-cabang dengan model membenteng pada node percabangannya. Jaringan ini merupakan jaringan radial yang paling dasar.



Gambar 2.3 Jaringan Radial Tipe Pohon

b. Jaringan Radial dengan *Tie* dan *Switch* Pemisah

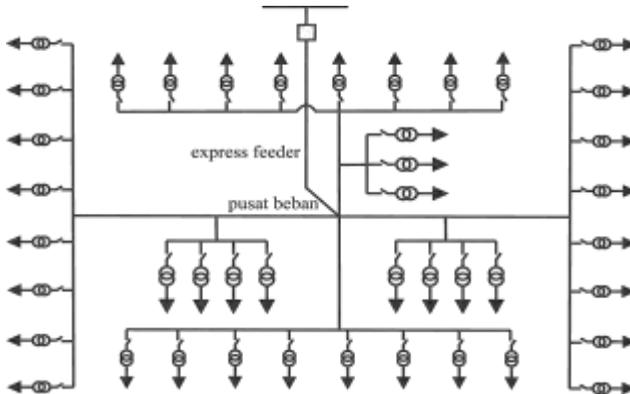
Jaringan radial dengan *tie* dan *switch* pemisah merupakan modifikasi dari jaringan radial dasar dengan penambahan *tie* dan *switch* pemisah. *Tie* dan *switch* pemisah digunakan untuk mempercepat pemulihan terhadap gangguan sehingga meningkatkan keandalan sistem.



Gambar 2.4 Jaringan Radial dengan *Tie* dan *Switch* Pemisah

c. Jaringan Radial dengan Pusat Beban

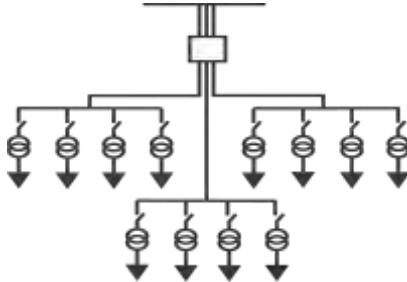
Jaringan radial dengan pusat beban merupakan jaringan yang mencatu daya dengan menggunakan penyulang langsung (*express feeder*) menuju ke pusat beban. Kemudian dari pusat beban, penyulang disebar dengan cabang-cabang tersebar menuju beban.



Gambar 2.5 Jaringan Radial dengan Pusat Beban

d. Jaringan Radial dengan Pembagian *Phase Area*

Jaringan radial ini masing-masing fasanya melayani daerah beban yang berbeda. Kerugian dari jaringan radial ini dapat menimbulkan efek ketidakseimbangan bila ditempatkan pada daerah yang baru dan belum mantap pembagian bebannya. Tipe ini hanya cocok untuk daerah dengan beban yang stabil dan dapat diatur merata pada setiap fasanya.



Gambar 2.6. Jaringan Radial dengan Pembagian *Phase Area*

2.2 Kestabilan Tegangan

Stabilitas sistem tenaga listrik adalah kemampuan suatu sistem tenaga listrik atau bagian komponennya untuk mempertahankan sinkronisasi dan keseimbangan dalam sistem[6]. Kemampuan suatu sistem untuk mempertahankan operasi normal dan kemampuan untuk pulih kembali pada kondisi operasi normal ketika terjadi gangguan. Sedangkan ketidakstabilan sistem dapat terjadi dalam berbagai bentuk, tergantung dari konfigurasi sistem dan model operasinya. Sistem akan masuk pada kondisi ketidakstabilan tegangan ketika terjadi gangguan, peningkatan beban atau pada saat terjadi perubahan kondisi sistem yang disebabkan oleh drop tegangan yang tidak terkontrol. Kestabilan tegangan sendiri memiliki arti kemampuan suatu sistem tenaga listrik untuk dapat mempertahankan level tegangan semua cabang (node) dalam kondisi normal setelah sistem mengalami kondisi awal gangguan. Kestabilan tegangan merupakan indikator dari kestabilan tenaga listrik.

Penyebab utama ketidakstabilan tegangan adalah ketidakmampuan sistem tenaga untuk memenuhi permintaan daya reaktif [7]. Inti dari permasalahan ini biasanya berhubungan dengan susut tegangan yang terjadi pada saat daya aktif dan daya reaktif mengalir melalui reaktansi induktif pada jaringan transmisi. Secara mendasar masalah kestabilan berarti menjaga sinkronisasi operasi sistem tenaga. Kestabilan pada sistem tenaga listrik merupakan masalah yang sangat penting dalam penyediaan daya kepada konsumen. Masalah kestabilan yang sering terjadi disini adalah masalah beban lebih, berkurangnya pasokan daya reaktif yang pada akhirnya akan menempatkan sistem pada kondisi *voltage collapse* dan akan terjadi kemungkinan terburuk yaitu

terjadinya *blackout*. Kestabilan tegangan biasanya termasuk saat terjadi gangguan besar (termasuk kenaikan beban / transfer daya yang sangat besar). Tegangan akan mengalami osilasi, dan terjadi ketidakstabilan sistem kontrol. Ketidakstabilan ini bisa terjadi akibat nilai gain pada statik var kompensator yang terlalu besar, atau deadband pada tegangan yang mengatur *shunt capacitor bank* yang terlalu kecil[7]. Maka dibutuhkan suatu *voltage security*, yaitu kemampuan sistem, tidak hanya untuk beroperasi secara stabil, tetapi juga stabil saat kondisi terburuk atau saat terjadi kenaikan beban.

Gangguan dapat dibagi menjadi 2 kategori, yaitu gangguan kecil dan gangguan besar. Gangguan kecil merupakan satu dari elemen sistem dinamik yang dapat dianalisis menggunakan persamaan linear (analisis sinyal kecil). Gangguan kecil yang terjadi berupa perubahan beban pada sisi beban atau pembangkit secara acak, pelan, dan jatuh bertingkat. Jatuh (*trip*) yang dialami oleh jaring tenaga listrik dianggap sebagai gangguan kecil jika pengaruhnya terhadap aliran daya sebelum gangguan pada jaring itu tidak signifikan. Bagaimanapun juga, gangguan yang menghasilkan kejutan tiba-tiba pada tegangan bus adalah jenis gangguan besar yang harus dihilangkan secepatnya. Jika tidak dihilangkan secepatnya, gangguan itu akan sangat mempengaruhi kestabilan sistem. Tidak hanya besar gangguan, waktu gangguan juga berpengaruh terhadap kestabilan sistem [7].

2.3 Voltage Collapse

Voltage collapse terjadi saat suatu sistem gagal melaksanakan beberapa tahap penanganan gangguan. “*if a failure to converge is due to the lack of an actual solution, this is considered by some to indicate a voltage collapse in the actual system*” [8].

Pencegahan :

- a. Pemasangan kompensator daya reaktif
- b. Pengendalian tegangan jaringan dan output daya reaktif generator
- c. Koordinasi proteksi atau control
- d. Kontrol transformator atau tap changer
- e. Pelepasan beban

2.4 Gangguan Beban Lebih

Beban lebih mungkin tidak tepat disebut sebagai gangguan. Namun karena beban lebih adalah suatu keadaan abnormal yang apabila dibiarkan terus berlangsung dapat membahayakan peralatan, jadi harus diamankan, maka beban lebih harus ikut ditinjau.

Beban lebih dapat terjadi pada trafo atau pada saluran karena beban yang dipasoknya terus meningkat, atau karena adanya maneuver atau perubahan aliran beban di jaringan setelah adanya gangguan. Beban lebih dapat mengakibatkan pemanasan yang berlebihan yang selanjutnya panas yang berlebihan itu dapat mempercepat proses penuaan atau memperpendek umur peralatan listrik.

Dalam penelitian ini gangguan yang diberikan berupa gangguan beban lebih dengan tujuan mempertahankan tegangan tetan pada batas yang diijinkan.

2.5 Pengendalian Tegangan

Penelitian ini memiliki tujuan mempertahankan tegangan system tetap dalam batasan batasan yang diijinkan untuk menjauhkan dari kondisi collapse. Tegangan Sistem harus diupayakan dalam batasan yang diijinkan yaitu +/- 5% untuk tegangan 500 kV dan +5% / -10% untuk tegangan 150/70/20 kV.

2.6 Pelepasan Beban

2.6.1 Pengertian Pelepasan Beban

Load Sheeding merupakan suatu bentuk tindakan pelepasan beban yang terjadi secara otomatis ataupun manual untuk pengamanan operasi dari unit-unit pembangkit dari kemungkinan terjadinya padam total (Black out). Pelepasan beban secara otomatis dilakukan karena jumlah pasokan daya berkurang, Pelepasan beban secara otomatis dilakukan dengan cara mendeteksi frekuensi atau dengan melihat kondisi sumber daya pembangkit yang beroperasi tidak mencukupi kebutuhannya (kemampuan pembangkitan lebih kecil daripada jumlah beban).

Apabila terjadi keadaan dimana berkurangnya daya pembangkit hanya berkisar 10% s.d 15% maka penurunan frekuensi akan terjadi secara perlahan karena Governor pembangkit-pembangkit masih sempat bekerja dan daya cadangan panas yang ada (Spinning Reserve) sebesar 10% s.d 15 % dapat digunakan dengan merubahnya menjadi daya listrik.

Tetapi apabila berkurangnya jumlah pembangkitan terlampau besar, maka turunnya frekuensi akan semakin cepat dan mencapai harga yang relatif rendah, hanya dalam waktu yang singkat. Governor dan cadangan daya panas yang ada tidak banyak membantu, dan untuk menjaga suatu sistem dari kegagalan atau kerusakan dan mengganggu operasi produksi karena turunnya frekuensi, maka solusi yang diambil adalah melepaskan sebagian beban, sehingga beban yang dipikul oleh sistem berkurang dan diharapkan frekuensi dapat kembali normal sesegera mungkin.

2.6.2 Metode Pelepasan Beban

Pada perencanaan pelepasan beban dapat ditentukan terlebih dahulu beban-beban yang akan dilepaskan, dimana dibagi dalam dua kategori yaitu :

a. Manual Load Shedding

Pelepasan beban secara manual hanya digunakan dalam keadaan yang tidak begitu penting atau pada saat control Load Shedding tidak bekerja sebagaimana mestinya (tidak dalam keadaan normal). Bila ditinjau dari kekurangan cara ini yaitu harus mempekerjakan tenaga operator yang banyak, dilepaskannya beban yang kadang-kadang melebihi beban yang seharusnya dilepaskan, dan adanya faktor keterlambatan dalam tindakan operator (Human Error).

b. Automatic Load Shedding

Sistem pelepasan beban otomatis seringkali merupakan perpanjangan relay pengaman generator seperti Under-frequency Relay (UFR). Relay ini digunakan untuk mendeteksi adanya perubahan frekuensi generator dan system sampai kepada batas-batas tertentu. Beban-beban yang akan dilepaskan harus ditentukan dahulu dan akan secara bertahap pada tiap-tiap frekuensi yang telah ditentukan.

2.6.3 Masalah Pelepasan Beban

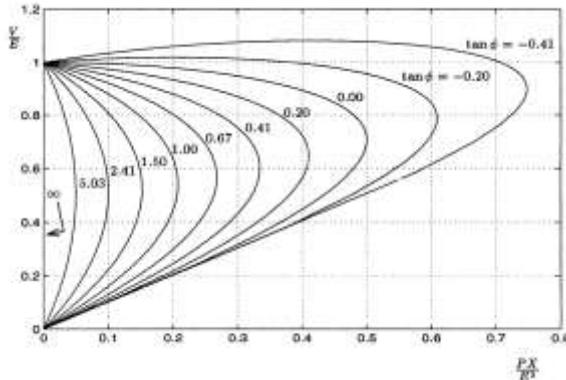
Masalah pokok yang dihadapi system dalam sebuah pelepasan beban adalah :

1. Besar beban yang akan dilepas penting
2. Menentukan jumlah tingkat pelepasan beban
3. Keterlambatan waktu yang direncanakan pada setiap waktu pelepasan
4. Frekuensi dimana setiap tingkat dilepas.

2.7 Indeks Ranking Tegangan Urutan Positif

Indeks ranking tegangan urutan positif atau VRI (Voltage Ranking indeks adalah suatu nilai rasio perbandingan antara nilai tegangan urutan positif saat terjadi collapse dengan nilai tegangan urutan positif saat tanpa beban [2].

Analisa kestabilan tegangan pada jaringan tidak seimbang tiga fasa dengan cara menambahkan beban aktif secara terus menerus akan menghasilkan kurva P-V pada gambar 2.7. Kurva P-V tersebut memiliki nilai yang berbeda pada masing-masing fasanya. Untuk menentukan batas stabilitas tegangan maka metode komponen simetri digunakan, agar kurva P-V dari masing-masing fasa, menjadi satu kurva P-V berdasarkan tegangan urutan positif. Sehingga akan diperoleh nilai indeks masing-masing bus yang disebut Positif Sequence Voltage Ranking Indeks (VRI).



Gambar 2.7 Bentuk Kurva P-V

Nilai VRI ini menunjukkan kekuatan suatu bus. Semakin kecil nilai VRI, maka semakin lemah bus tersebut.

Berikut adalah langkah-langkah perhitungan penurunan rumus sehingga diperoleh rumus VRI [2].

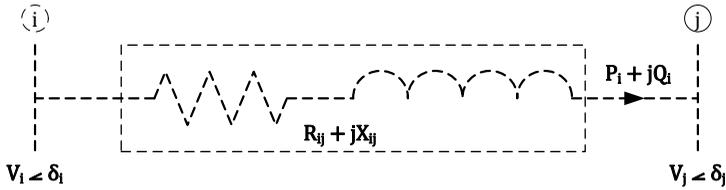
$$VRI_j^{\text{conventional}} = \frac{V}{V_0} = \frac{V_{j,\text{base-load}}}{V_{j,\text{no-load}}} \quad (2.1)$$

Tanda 'j' menunjukkan jumlah bus, $V_{j,\text{base-load}}$ dan $V_{j,\text{no-load}}$ adalah tegangan masing-masing bus pada kondisi beban dasar dan kondisi tanpa

beban. Untuk perhitungan daya pada suatu bus j dapat dihitung sebagai berikut :

$$S_j = f(\delta, V) = P_j - jQ_j = (V_j \angle \delta_j) \left(\frac{V_i \angle \delta_i - V_j \angle \delta_j}{R_{ij} + jX_{ij}} \right) \quad (2.2)$$

Untuk memperjelas posisi tegangan, resistansi, reaktansi, daya aktif dan daya reaktif maka ditunjukkan dalam gambar 2.8 dengan dua bus, yaitu bus i dan bus j .



Gambar 2.8 Rangkaian ekivalen dari jaringan dua bus seimbang

Pemisahan bagian real dan imajiner sehingga diperoleh persamaan 2.3 berikut ini :

$$\begin{aligned} W_{real}(\delta_{ij}, V_j) &= [P_j R_{ij} + Q_j X_{ij}] = V_i V_j \cos \delta_{ij} - (V_j)^2 \\ W_{imag}(\delta_{ij}, V_j) &= [P_j R_{ij} - Q_j X_{ij}] = V_i V_j \sin \delta_{ij} \end{aligned} \quad (2.3)$$

Tegangan V_j dihitung dengan mengkuadratkan dan menambahkan bagian real dan imajiner dari persamaan (2.3) didapatkan :

$$V_j^4 + 2(P_j R_{ij} + Q_j X_{ij} - 0.5 V_i^2) V_j^2 + (P_j^2 + Q_j^2)(R_{ij}^2 + X_{ij}^2) = 0 \quad (2.4)$$

Ada empat solusi untuk persamaan 2.4:

$$V_j = \pm \sqrt{\frac{1}{2} [-b \pm \sqrt{b^2 - 4c}]} \quad (2.5)$$

Dimana $b = -(V_i^2 - 2P_j R_{ij} - 2Q_j X_{ij})$; $c = (P_j^2 + Q_j^2)(R_{ij}^2 + X_{ij}^2)$. Namun, $-b$ selalu positif karena nilai $(-2P_j R_{ij} - 2Q_j X_{ij})$ sangat

kecil jika dibandingkan dengan (V_i^2) dan juga $4c$ lebih kecil jika dibandingkan dengan b^2 , sehingga didapatkan persamaan V_j .

$$V_j = V_{j,base-load} \sqrt{\frac{1}{2} \left[-b + \sqrt{b^2 - 4c} \right]} \quad (2.6)$$

Substitusi persamaan (2.6) ke persamaan (2.1) akan didapatkan :

$$VRJ_j^{conventional} = \frac{V}{V_0} = \frac{\sqrt{(0.5 V_i^2 - P_j R_{ij} - Q_j X_{ij}) + A}}{V_i} \quad (2.7)$$

Dimana

$$A = \sqrt{0.25(V_i^2 - 2P_j R_{ij} - 2Q_j X_{ij})^2 - (P_j^2 + Q_j^2)(R_{ij}^2 + X_{ij}^2)}$$

Sehingga indeks pada jaringan tiga fasa seimbang didefinisikan sebagai :

$$VRJ_j^{balanced} = \frac{V_{j,collapse}}{V_{j,no-load}} \quad (2.8)$$

Untuk menghitung nilai VRI pada jaringan tiga fasa seimbang, $V_{j,collapse}$ dapat dihitung berdasarkan studi aliran daya Newton-Raphson dengan menyamadengkan nol pada persamaan 2.3. Hubungan matrik Jacobian dengan persamaan 2.3 didefinisikan sebagai berikut :

$$J = \begin{bmatrix} -V_i V_j \sin \delta_{ij} & V_i V_j \cos \delta_{ij} - 2V_j \\ V_i V_j \cos \delta_{ij} & V_i \sin \delta_{ij} \end{bmatrix} \quad (2.9)$$

Pada saat titik *collapse*, Matrik Jacobian sudah *singular*, sehingga:

$$\det(J) = 0, \quad \frac{V_j \cos \delta_{ij}}{V_i} = \frac{1}{2}, \quad V_{j,collapse} = \frac{0.5 V_j}{\cos \delta_{ij}} \quad (2.10)$$

Substitusi persamaan (2.6) dan (2.10) ke persamaan (2.8) maka akan didapatkan persamaan (2.11).

$$VRI_j^{balanced} = \frac{V_{j,collapse}}{V_{j,no-load}} = \frac{0.5}{\cos \delta_{ij}} \quad (2.11)$$

Didapatkan sudut δ_{ij} dapat dihitung dari persamaan (2.13) berikut ini :

$$\delta_{ij} = \tan^{-1} \left(\frac{[P_j X_{ij} - Q_j R_{ij}]}{[P_j R_{ij} + Q_j X_{ij}] + (V_j)^2} \right) \quad (2.12)$$

Untuk mendefinisikan VRI pada jaringan *multiphase*, komponen simetris digunakan pada tegangan tiga fasa yang dihasilkan dari proses aliran daya tiga fasa[10]. Indeks baru yang diaplikasikan pada jaringan *multiphase* didefinisikan sebagai rasio tegangan urutan positif pada titik *collapse* terhadap tegangan urutan positif pada kondisi tanpa beban.

$$VRI_j^{multiphase} = \frac{V_{j,collapse}^+}{V_{j,no-load}^+} \quad (2.13)$$

2.8 Logika Fuzzy

2.8.1 Pengertian Logika Fuzzy

Ada beberapa metode penalaran dalam membangun sebuah logika fuzzy. Salah satunya adalah metode Mamdani. Logika Fuzzy sendiri adalah suatu logika yang memiliki nilai kekaburan atau kesamaran (*fuzzyness*) antara benar atau salah. Dalam teori logika fuzzy suatu nilai bisa bernilai benar atau salah secara bersama. Namun berapa besar keberadaan dan kesalahan suatu tergantung pada bobot keanggotaan yang dimilikinya [9].

Fuzzy mampu memodelkan persepsi manusia yang menggunakan insting dan learning sebagai sensor, menjadi data numerik dan dapat dikomputerisasikan, sehingga fuzzy masuk dalam salah satu kategori kecerdasan buatan. Dalam penelitian ini, fuzzy digunakan sebagai alat penentu keputusan lokasi pelepasan beban dan besar beban yang ingin dilepas.

Memahami fuzzy mencakup tiga garis besar, yaitu defuzzifikasi, aplikasi rule fuzzy dan defuzzifikasi. Ketiga hal tersebut merupakan langkah utama fuzzy. Secara singkat, defuzzifikasi dapat dikatakan sebagai memodelkan bahasa manr usia kedalam perhitungan logika

komputer. Selanjutnya adalah aplikasi rule fuzzy yang merupakan aplikasi batasan-batasan, hubungan antar variable terkait dan penentuan keputusan suatu masalah. Terakhir adalah defuzzifikasi yang merupakan proses penerjemahan keputusan perhitungan komputer kedalam bahasa manusia kembali.

2.8.2 Sistem Inferensi Fuzzy

Dalam sistem inferensi fuzzy ada beberapa komponen utama yang dibutuhkan. Komponen tersebut meliputi data variabel input, data variable output, dan data aturan. Untuk mengolah data masukan dibutuhkan beberapa fungsi meliputi fungsi fuzzifikasi yang terbagi 2, yaitu fungsi untuk untuk menentukan nilai jenis keanggotaan suatu himpunan dan fungsi penggunaan operator. Fungsi fuzzifikasi akan mengubah nilai *crisp* (nilai aktual) menjadi nilai fuzzy (nilai kabur). Selain itu, dibutuhkan pula fungsi defuzzifikasi, yaitu fungsi untuk memetakan kembali nilai fuzzy menjadi nilai *crisp* yang menjadi output/nilai solusi permasalahan. Untuk lebih jelasnya berikut adalah gambar 2.9 yaitu penjelasan proses inferensi fuzzy.



Gambar 2.9. Inferensi Fuzzy

2.8.3 Properti Fuzzy

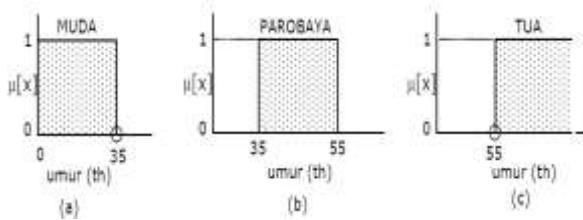
Dalam memahami sistem fuzzy, ada beberapa hal yang perlu diketahui. Berikut penjelasan beberapa properti fuzzy :

a. Variabel

Variabel yaitu sesuatu yang akan diproses dalam fuzzy. Seperti umur, jarak, kepadatan, suhu dan lain-lain.

b. Himpunan Fuzzy

Himpunan fuzzy adalah himpunan kondisi yang menjelaskan tentang variabel. Himpunan fuzzy memiliki domain dengan batasan atribut angka dan linguistik suatu himpunan fuzzy. Berikut contoh himpunan fuzzy beserta atributnya :



Gambar 2.10. Himpunan Fuzzy
(Sumber : Google)

Pada gambar 2.6 dijelaskan bahwa variabel umur memiliki 3 himpunan fuzzy yaitu MUDA umur < 35 tahun, PAROBAYA $35 \leq \text{umur} < 55$ tahun dan TUA umur > 55 tahun. Muda, Parobaya dan Tua merupakan atribut linguistik dan batasan umurnya merupakan atribut angka himpunan tersebut.

c. Nilai Keanggotaan

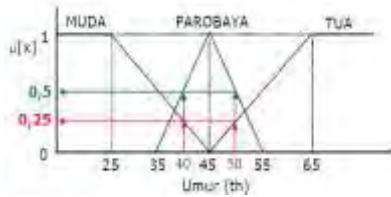
Nilai keanggotaan : adalah suatu nilai kabur terhadap variabel tertentu.

Nilai keanggotaan dalam fuzzy berada dalam range antara 0 sampai 1. Jika memiliki nilai nol atau satu maka penjelasannya sebagai berikut :

- satu (1), yang berarti bahwa suatu item menjadi anggota dalam suatu himpunan, atau
- nol (0), yang berarti bahwa suatu item tidak menjadi anggota dalam suatu himpunan.

d. Kurva Representasi

Kurva representasi digunakan untuk menggambarkan nilai keanggotaan dalam suatu himpunan fuzzy. Berikut adalah penggunaan kurva representasi bentuk bahu untuk menggambarkan suatu variabel, himpunan dan nilai keanggotaan dalam fuzzy :



Gambar 2.11 : Kurva Representasi Fuzzy
(Sumber : Google)

Pada Gambar 2.11, dapat dilihat bahwa:

- Seseorang yang berumur 40 tahun, termasuk dalam himpunan MUDA dengan $\mu_{MUDA}[40]=0,25$; namun dia juga termasuk dalam himpunan PAROBAYA dengan $\mu_{PABOBAYA}[40]=0,5$.
- Seseorang yang berumur 50 tahun, termasuk dalam himpunan MUDA dengan $\mu_{TUATUA}[50]=0,25$; namun dia juga termasuk dalam himpunan PAROBAYA dengan $\mu_{PABOBAYA}[50]=0,5$.

2.8.4 Operasi Fuzzy

Operasi Fuzzy ada dua macam, yaitu OR (Union) dan AND (Intersection). Fuzzy Union (U) : union dari dua himpunan adalah maksimum dari tiap-tiap pasang elemen-elemen pada kedua himpunan. Fuzzy Intersection (\cap) : irisan dari dua himpunan fuzzy adalah minimum dari tiap pasang elemen dari kedua himpunan.

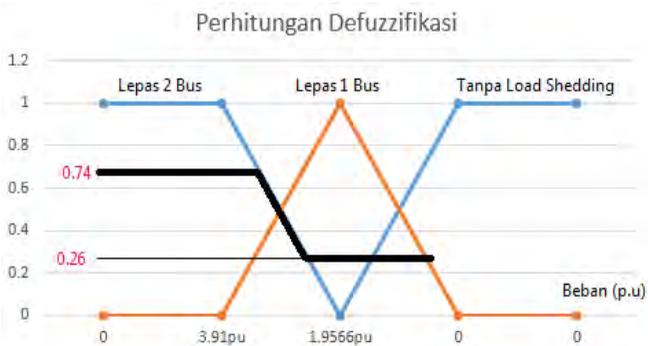
Contoh dari penerapan operasi fuzzy ditunjukkan pada table 2.1. dari table tersebut akan ditarik beberapa keputusan sehingga dapat dilanjutkan dengan proses defuzzifikasi untuk menghitung nilai spesifik beban yang harus dilepas.

Tabel 2.1. Rule Fuzzy

operasi AND(find min)		Variabel 1		
		% kurang	% sedang	% bagus
variabel 2	% kurang	keputusan 1	keputusan 2	keputusan 3
	% sedang	keputusan 4	keputusan 5	keputusan 6
	% bagus	keputusan 7	keputusan 8	keputusan 9

2.8.5 Defuzzifikasi

Proses terakhir dalam penelitian ini adalah operasi defuzzifikasi, yaitu proses dimana nilai nyata yang telah dibuat ‘kabur’ (Fuzzy) maka akan dikembalikan kepada nilai yang nyata. Dua metode fuzzy yang paling terkenal adalah Sugeno dan Mamdani. Pada penelitian ini akan digunakan proses defuzzifikasi mamdani. Proses defuzzifikasi mamdani ditunjukkan pada gambar berikut ini.



Gambar 2.12 Proses Defuzzifikasi

Dari gambar 2.12 maka dapat dihitung nilai beban spesifik yang harus dilepas. Berikut adalah rumus defuzzifikasi untuk menentukan beban spesifik yang harus dilepas dari persamaan 2.14 dibawah ini.

$$\frac{(A2 \times B2) + (A1 \times B1) + (A0 \times B0)}{A2 + A1 + A0} \quad (2.14)$$

- A2 : nilai keputusan melepas 2 bus (%)
- A1 : nilai keputusan melepas 1 bus (%)
- A0 : nilai keputusan melepas 0 bus (%)
- B2 : beban total pada 2bus
- B1 : beban total pada 1bus
- B0 : beban 0

Jika merujuk pada gambar 2.12 maka nilai nilai membership function hasil operasi rule yang didapatkan akan dihitung sesuai rumus. Berikut adalah rumus defuzzifikasi untuk menentukan beban spesifik yang harus dilepas dari persamaan 2.14.

$$\frac{(\% \text{Lepas 2bus x beban 2bus}) + (\% \text{Lepas 1bus x beban 1bus}) + (\% \text{tanpa lepas x beban 0})}{\% \text{Lepas 2bus} + \% \text{Lepas 1bus} + \% \text{tanpa lepas beban}}$$

Sehingga diperoleh perhitungan sebagai berikut :

$$\frac{(0.7179 \times 3.91) + (0.2821 \times 1.9566) + (0 \times 0)}{(0.7179 + 0.2821 + 0)} = 1.4 \text{ p.u}$$

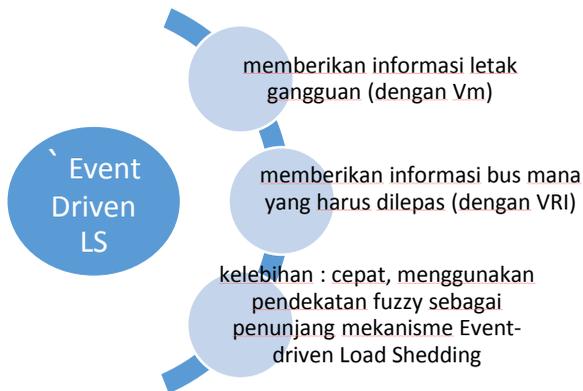
0.7179 atau 72% menghendaki untuk melepas dua bus sekaligus, dan 28% menghendaki melepas satu bus saja. Sedangkan 0% menghendaki tidak melepas beban. Hal tersebut adalah keluaran dari proses inferensi fuzzy sebelumnya yang kemudian diterapkan kedalam proses defuzzifikasi. Perhitungan ini menggunakan prinsip Mamdani sehingga dapat dihasilkan nilai real dengan ketelitian yang lebih tinggi dibandingkan dengan defuzzifikasi metode Sugeno. Hal ini dikarenakan nilai yang menggunakan batasan area dan bukan suatu titik seperti pada metode Sugeno.

Dari beban total dalam suatu bus, dengan jumlah 1.9566 pu dapat dilepas 1.4 saja dan mampu mengembalikan tegangan kepada batas yang diijinkan. Sehingga fuzzy dapat menjawab pelepasan beban secara spesifik.

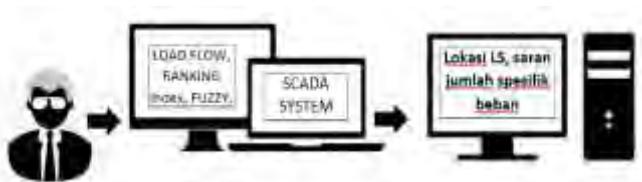
~halaman ini sengaja dikosongkan~

BAB III RANCANGAN PROGRAM

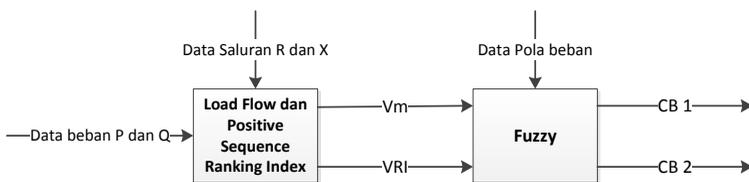
Dalam bab ini akan dibahas mengenai langkah – langkah perancangan dan pembuatan aplikasi mulai dari mengolah data, metode yang digunakan untuk mengolah data, hingga hasil yang didapatkan. Yaitu berupa pengumpulan data, simulasi load flow menggunakan Network Topology, dan penerapan fuzzy. Berikut adalah gambaran sistem secara umum:



Gambar 3.1 Manfaat aplikasi

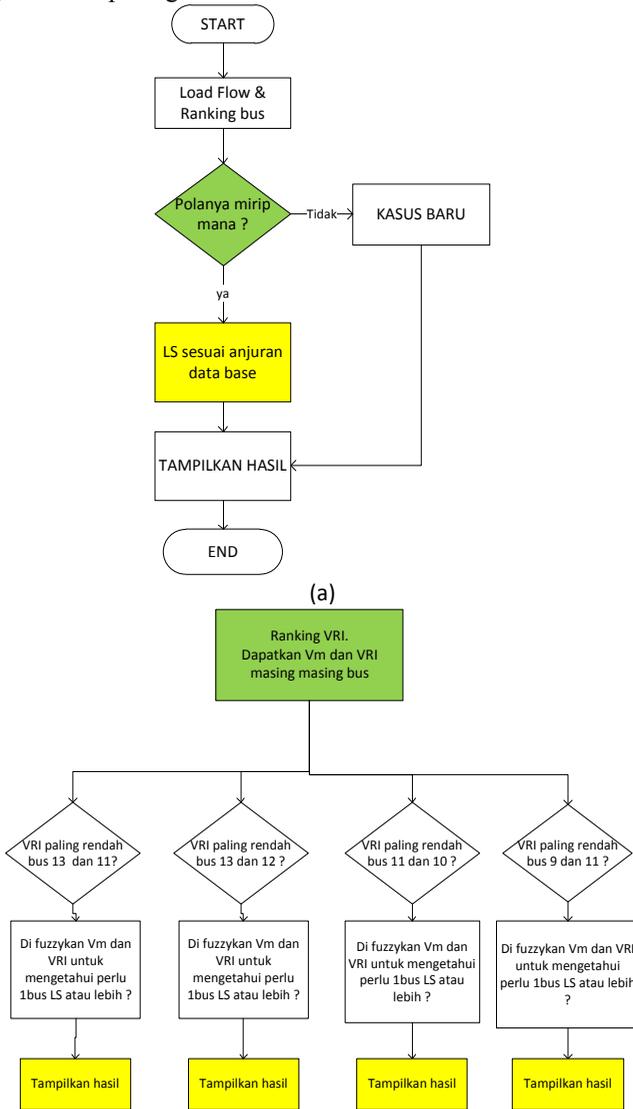


Gambar 3.2 Gambaran Umum Sistem



Gambar 3.3 Gambaran Umum Sistem

Sistem ini menjalankan beberapa tugas yang dapat dijelaskan dengan *flowchart* pada gambar 3.4.

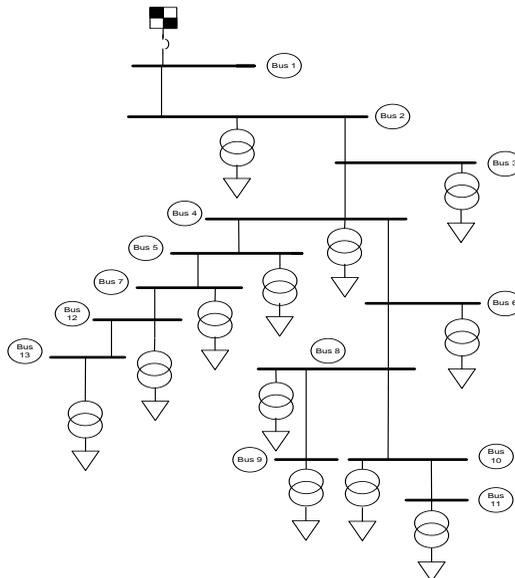


Gambar 3.4 (a) Flowchart Utama, (b) Flowchart lanjutan

Pada gambar 3.4(a) menunjukkan langkah kerja sistem. Yaitu dengan mengecek sistem apakah perlu diadakan pelepasan beban atau tidak. Jika perlu, maka sistem akan menyarankan nomor bus yang harus dilepas dan saran berupa jumlah spesifik beban yang sebenarnya bisa dilepas. Dan jika tidak perlu dilakukan pelepasan beban maka sistem akan menampilkan hasil *load flow*. Database yang digunakan ini didapatkan dari uji sistem secara keseluruhan sehingga didapatkan pola tertentu untuk berbagai macam gangguan. Dari rangkaian langkah yang telah dilakukan maka akan didapatkan analisa yang akan dibahas pada Bab 4 selanjutnya.

3.1 Pengumpulan Data

Data yang digunakan dalam penelitian ini adalah data penyulang Ometraco pada PT. PLN untuk Surabaya Utara pada sistem 13 Bus. Berikut disajikan data beban dan data saluran pada penyulang Ometraco. Berikut adalah single line diagram pada penyulang Ometraco.



Gambar 3.5. Single Line Diagram Penyulang Ometraco

Tabel 3.1 Data Saluran Penyulang Ometraco

Saluran		Impedansi		Panjang (m)
Bus	Bus	R (ohm)	X (ohm)	
1	2	0.1001	0.0491	377.67
2	3	0.0265	0.0130	100.00
3	4	0.0048	0.0023	18.00
4	5	0.0265	0.0130	100.00
4	6	0.0286	0.0140	107.90
5	7	0.0265	0.0130	100.00
6	8	0.0265	0.0130	100.00
8	9	0.0265	0.0130	100.00
8	10	0.0265	0.0130	100.00
10	11	0.0265	0.0130	100.00
7	12	0.0265	0.0130	100.00
12	13	0.0265	0.0130	100.00

Pada table 3.1 jalur terpanjang adalah jalur antara bus 1 dan 2 sehingga memiliki impedansi paling besar dibandingkan jarak antara bus lainnya. Sedangkan jalur terpendek terletak pada antara bus 3 dan bus 4. Berikut ini adalah data beban pada table 3.2 yang menunjukkan pembebanan tertinggi terletak pada bus 11 dan pembebanan paling rendah ada pada bus 4. Pada table 3.2 tersebut terlihat bahwa pembebanan masing-masing bus berbeda.

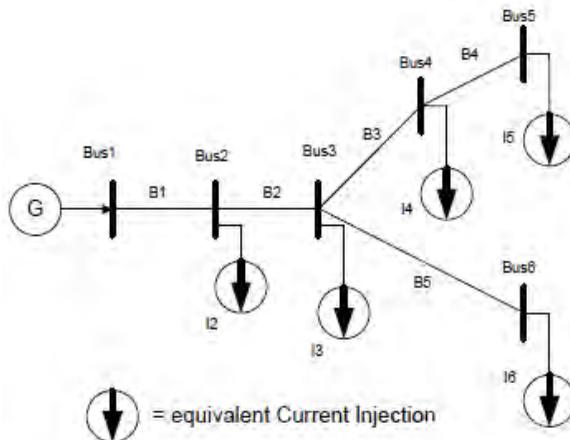
Tabel 3.2 Data Beban Penyulang Ometraco dalam pu

Bus	Daya (pu)					
	R		S		T	
	P	Q	P	Q	P	Q
1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2	0.4035	0.0985	0.4275	0.081	0.4155	0.095
3	0.1125	0.023	0.115	0.0335	0.1135	0.016
4	0.125	0.075	0.125	0.075	0.125	0.1
5	0.13	0.0215	0.2025	0.039	0.1845	0.4945
6	0.2055	0.0385	0.189	0.042	0.2165	0.025
7	0.285	0.054	0.307	0.063	0.291	0.062
8	0.177	0.036	0.2185	0.0805	0.1445	0.324
9	0.343	0.0925	0.3185	0.1005	0.333	0.099
10	0.343	0.046	0.261	0.0425	0.188	0.044
11	0.6045	0.1285	0.7855	0.214	0.4925	0.1805
12	0.605	0.1015	0.657	0.13	0.58	0.1
13	0.6045	0.1285	0.7855	0.214	0.4925	0.1805

3.2 Analisa Aliran Daya

Analisa aliran daya dilakukan dengan menggunakan software matlab r2009a dengan membuat perhitungan load flow metode network topology. Dari hasil running program tersebut akan didapatkan nilai tegangan dari sistem pada masing-masing bus. Selanjutnya akan dimodifikasi dengan metode positive sequence Voltage ranking Index (VRI) yang akan menunjukkan nilai index tiap-tiap bus.

Dalam penelitian ini analisa aliran dayanya akan digunakan metode Network Topology. Berikut akan dijelaskan langkah-langkah penerapan Network Topology pada analisa aliran daya sistem distribusi [4].



Gambar 3.6. Jaringan Distribusi 6 Bus
(Sumber Radial Power Flow by Matt)

Perhitungan arus setiap cabang disimbolkan dengan 'B' dengan perhitungan masing masing cabang sebagai berikut :

$$\begin{aligned} B_5 &= I_6 \\ B_4 &= I_5 \\ B_3 &= I_4 + I_5 \\ B_2 &= I_4 + I_5 + I_6 \\ B_1 &= I_2 + I_3 + I_4 + I_5 + I_6 \end{aligned}$$

Sehingga matriks BIBC(Bus-Injection to Branch-Current) didapatkan sebagai berikut :

$$\begin{bmatrix} B1 \\ B2 \\ B3 \\ B4 \\ B5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I1 \\ I2 \\ I3 \\ I4 \\ I5 \end{bmatrix}$$

Jadi dapat ditulis ulang menjadi : $[B] = [BIBV][I]$ (3.1)

Selanjutnya akan diciptakan matrik BCBV(Branch-Current to Bus-Voltage) sebagai berikut :

$$V_2 = V_1 - B_1.Z_{12}$$

$$\begin{aligned} V_3 &= V_1 - B_1.Z_{12} - B_2.Z_{23} \\ &= V_2 - B_2.Z_{23} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} V_4 &= V_1 - B_1.Z_{12} - B_2.Z_{23} - B_3.Z_{34} \\ &= V_3 - B_3.Z_{34} \end{aligned}$$

$$V_5 = V_4 - B_4.Z_{45}$$

$$V_6 = V_5 - B_5.Z_{36}$$

$$V_1 - V_2 = B_1.Z_{12}$$

$$V_1 - V_3 = B_1.Z_{12} + B_2.Z_{23}$$

$$V_1 - V_4 = B_1.Z_{12} + B_2.Z_{23} + B_3.Z_{34}$$

$$V_1 - V_5 = B_1.Z_{12} + B_2.Z_{23} + B_3.Z_{34} + B_4.Z_{45}$$

$$V_1 - V_6 = B_1.Z_{12} + B_2.Z_{23} + B_5.Z_{36}$$

$$\begin{bmatrix} V1 - V2 \\ V1 - V3 \\ V1 - V4 \\ V1 - V5 \\ V1 - V6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z12 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ Z12 & Z23 & 0 & 0 & 0 \\ Z12 & Z23 & Z34 & 0 & 0 \\ Z12 & Z23 & Z34 & Z45 & 0 \\ Z12 & Z23 & 0 & 0 & Z36 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} B1 \\ B2 \\ B3 \\ B4 \\ B5 \end{bmatrix}$$

Jadi dapat ditulis ulang menjadi : $[\Delta V] = [BCBV][B]$ (3.2)

Substitusikan persamaan (3.1) ke (3.2) jadi didapatkan :

$$[\Delta V] = [BCBV][BIBC][I] \quad (3.4)$$

$$[\Delta V] = [DLF][I] \quad (3.5)$$

Proses selanjutnya adalah menghitung nilai I yang baru dengan perhitungan sebagai berikut :

$$I_i^k = \frac{P_i + jQ_i}{V_i^k} \quad (3.6)$$

$$[\Delta V^k] = [\text{DLF}][I^k] \quad (3.7)$$

Sehingga diperoleh nilai tegangannya adalah :

$$[V^{k+1}] = [V_{noload}] - [\Delta V^k] \quad (3.8)$$

Proses aliran daya, akan menghasilkan nilai daya pada setiap bus dengan berbagai macam arus yang berbeda. Nilai daya dan arus tersebut akan digunakan untuk menentukan nilai tegangan masing-masing bus. Dan akhirnya akan didapatkan nilai tegangan dan nilai tegangan urutan positif yang akan digunakan untuk proses selanjutnya.

3.3 Positive Sequence Voltage Ranking Index

Berikut adalah perhitungan untuk menentukan nilai VRI.

$$VRI_j^{conventional} = \frac{V}{V_0} = \frac{\sqrt{(0.5 V_i^2 - P_j R_{ij} - Q_j X_{ij}) + A}}{V_i} \quad (2.7)$$

Dimana :

$$A = \sqrt{0.25(V_i^2 - 2P_j R_{ij} - 2Q_j X_{ij})^2 - (P_j^2 + Q_j^2)(R_{ij}^2 + X_{ij}^2)}$$

Nilai VRI ini akan digunakan sebagai penunjuk bus mana yang paling lemah, sedangkan V_m atau tegangan masing masing bus, menunjukkan lokasi bus yang mengalami gangguan.

3.4 Besaran Per Unit (p.u)

Proses aliran daya yang dilakukan dan menunjukkan hasil nilai tegangan dan VRI akan ditunjukkan dalam bentuk besaran *p.u.*. Perhitungan *p.u* ini memudahkan dalam pembacaan data. Besaran *per unit* didefinisikan sebagai berikut:

$$pu = \frac{\text{Besaran Sesungguhnya}}{\text{Besaran Dasar}} \quad (3.1)$$

Besaran dasar yang biasanya diketahui adalah tegangan dasar (ikut tegangan pada lokal trafo) dan daya dasar yang sudah ditentukan. Sehingga besaran yang lain dapat diketahui dengan persamaan sebagai berikut [5]:

Daya dalam pu :

$$S_{pu} = \frac{\text{daya (MW)}}{\text{daya dasar (MVA}_b)} \quad (3.2)$$

Tegangan pu :

$$V_{pu} = \frac{\text{tegangan (kV)}}{\text{tegangan dasar (kV}_b)} \quad (3.3)$$

Arus dasar :

$$I_b = \frac{\text{daya dasar (KVA}_b) \text{ 1phasa}}{\text{tegangan dasar (KV}_b \text{ line-netral)}} \quad (3.4)$$

Arus pu :

$$I_{pu} = \frac{I}{I_b} \quad (3.5)$$

Impedansi dasar :

$$Z_b = \frac{(\text{tegangan dasar (KV}_b \text{ line-netral)})^2}{\text{daya dasar (MVA}_b \text{ 1 phasa)}} \quad (3.6)$$

Impedansi pu :

$$Z_{pu} = \frac{Z}{Z_b} \quad (3.7)$$

3.5 Proses Pembelajaran Karakteristik *Overload* pada Penyulang Ometraco

Proses pembelajaran karakteristik *overload* pada penyulang dilakukan untuk mengetahui batas-batas nilai VRI pada setiap bus, sehingga diketahui nilai VRI pada masing-masing bus saat memerlukan lepas beban pada satu bus atau dua bus sekaligus.

Batas-batas nilai VRI ini akan digunakan untuk variable VRI yang akan digunakan pada proses fuzzy.

Penentuan range untuk variable VRI dilakukan dengan mengevaluasi seluruh kemungkinan gangguan dalam penyulang ometraco. Hal ini dilakukan untuk mendapatkan data tentang perilaku sistem dengan adanya berbagai macam gangguan. Evaluasi ini dilakukan dengan cara menambahkan beban pada masing-masing bus secara bergiliran sampai didapatkan nilai tegangan pada salah satu bus menurun

sampai menyentuh angka kurang dari 0.9 pu. Dari data yang didapatkan maka diambil 3 nilai tegangan dan VRI terendah yang digunakan sebagai batas range VRI tanpa pelepasan beban. Sedangkan untuk mendapatkan batas antara pelepasan beban 1 bus atau dua bus maka diuji dengan cara menambahkan beban sampai pada tegangan kurang dari 0.9 pu, lalu dilakukan pelepasan beban pada bus dengan nilai VRI paling kecil. Setelah beban pada bus tersebut dilepas maka penambahan beban dilakukan lagi sampai ditemukan tegangan kurang dari 0.9 pu lagi. Dengan demikian sistem dikatakan membutuhkan pelepasan beban tambahan, tidak hanya satu bus. Kemudian dengan beban yang terus bertambah dan satu bus lepas sampai ditemukan $v < 0.9$ pu maka beban pada bus yang dilepas dikembalikan dan dicatat nilai VRI nya sebagai syarat pelepasan beban membutuhkan 2 bus.

Dari mekanisme tersebut didapatkan masing-masing perilaku bus saat terjadi gangguan. Dari masing-masing perilaku tersebut ternyata ditemukan pola penyelesaian dengan berbagai jenis macam gangguan.

Batas range VRI yang digunakan untuk menentukan pelepasan beban atau tidak, dan pola yang didapatkan dari penyulang ometraco ditunjukkan pada tabel 3.3 dan 3.4.

Pada tabel 3.3 dan 3.4 adalah hasil yang diperoleh dari proses pembelajaran karakteristik terhadap penyulang Ometraco. Terdapat empat macam pola pada berbagai macam *overload* pada setiap bus. Pola pertama adalah pelepasan pada bus 13, 11 dan 12. Pola kedua 13,12,7; pola ketiga 11,10,9; pola keempat 9,11,dan 10.

Table 3.3 Data Hasil Pembelajaran Karakteristik Penyulang untuk Pelepasan dua buah bus

Overload di bus	Terendah ke 1		Terendah ke 2		Terendah ke 3	
	nilai Vri	LS pada bus	nilai Vri	LS pada bus	nilai Vri	LS pada bus
2	0.81814	13	0.81867	11	0.81882	12
3	0.81981	13	0.82033	11	0.82048	12
4	0.821	13	0.82152	11	0.82167	12
5	0.81961	13	0.82029	12	0.82167	7
7	0.81838	13	0.81905	12	0.82023	7
12	0.81741	13	0.81792	12	0.82195	7
13	0.81197	13	0.81558	12	0.81988	7
6	0.82076	11	0.82146	10	0.82208	9
8	0.81138	11	0.81211	10	0.81276	9
10	0.82109	11	0.82164	10	0.82466	9
11	0.81229	11	0.81593	10	0.81966	9
9	0.81155	9	0.81393	11	0.81464	10

Table 3.4 Data Hasil Pembelajaran Karakteristik Penyulang untuk Pelepasan satu buah bus

Overload di bus	Terendah ke 1		Terendah ke 2		Terendah ke 3	
	nilai Vri	LS pada bus	nilai Vri	LS pada bus	nilai Vri	LS pada bus
2	0.81429	13	0.81481	11	0.81497	12
3	0.81649	13	0.81702	11	0.81717	12
4	0.81595	13	0.81649	11	0.81664	12
5	0.81368	13	0.81438	12	0.81578	7
7	0.81333	13	0.81402	12	0.81517	7
12	0.81146	13	0.81193	12	0.81671	7
13	0.81146	13	0.81193	12	0.81671	7
6	0.81341	11	0.81412	10	0.81475	9
8	0.81363	11	0.81435	10	0.81499	9
10	0.812	11	0.81251	10	0.81671	9
11	0.812	11	0.81251	10	0.81671	9
9	0.81966	9	0.81229	11	0.81593	10

3.6 Penerapan Fuzzy

Setelah proses load flow dengan metode network topology dan pencarian positive sequence voltage ranking index(VRI) dilaksanakan, maka didapatkan nilai tegangan dan VRI masing masing bus kemudian diurutkan berdasarkan ranking VRI paling kecil yang artinya paling lemah. Kemudian 2 ranking teratas atau 2 bus dengan VRI paling lemah akan diambil dan di cocokkan dengan database. Sistem pencocokan ini menggunakan metode biasa yaitu dengan memilih kondisi yang sama, jika tidak ada yang sama maka akan digunakan sebagai referensi kondisi baru.

Setelah ditemukan pola gangguan yang sama dengan database, maka sistem akan mengambil nilai tegangan dan VRI bus terlemah tersebut kemudian memasukkannya kedalam proses fuzzyfikasi sesuai dengan rule masing-masing kondisi.

Kondisi dalam sistem ini dibagi menjadi 4 sesuai dengan pola yang ditemukan saat evaluasi sistem secara keseluruhan. Masing masing pola memiliki range nilai keanggotaan sendiri-sendiri.

3.6.1 Proses Fuzzyfikasi

Proses fuzzyfikasi adalah proses dimana suatu nilai 0 dan 1 yang dikenal oleh computer, akan dimodelkan seperti perkiraan manusia. Proses ini disebut juga proses ‘mengkaburkan’. Berikut proses

fuzzifikasi akan dilakukan dengan tahap pertama adalah menentukan nilai keanggotaan.



Gambar 3.7 Nilai keanggotaan Tegangan

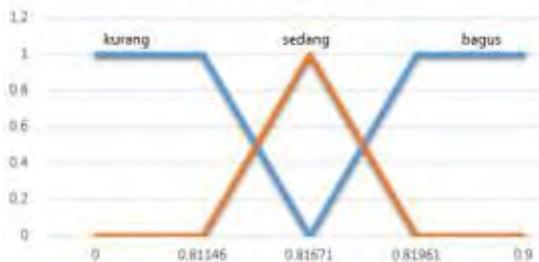
Berikut adalah batas nilai keanggotaan masing-masing pola.

Nilai Keanggotaan VRI

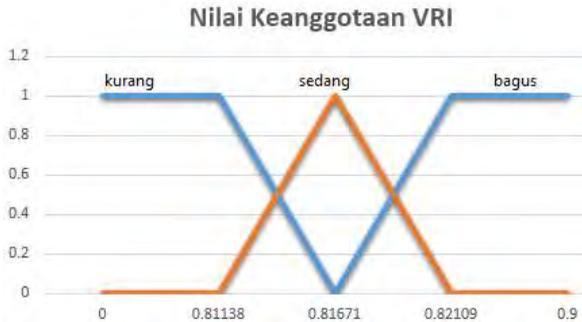


Gambar 3.8 Nilai keanggotaan VRI apabila kasus 1

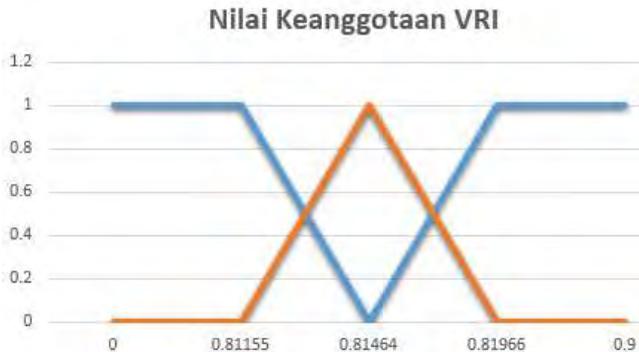
Nilai Keanggotaan VRI



Gambar 3.9 Nilai keanggotaan VRI apabila kasus 2



Gambar 3.10 Nilai keanggotaan VRI apabila kasus 3



Gambar 3.11 Nilai keanggotaan VRI apabila kasus 4

Gambar 3.8 sampai dengan gambar 3.11 merupakan representasi nilai keanggotaan untuk masing masing kondisi yang diperoleh dari proses pembelajaran pada karakteristik penyulang Ometraco. Masing-masing pola memiliki batas yang berbeda untuk nilai VRI.

Langkah untuk mendapatkan nilai keanggotaan (*membership function*) pada penelitian ini adalah sebagai berikut.

Misal : Bus terlemah pertama 13 dan Bus terlemah kedua 11
 Data yang didapatkan adalah $V_m : 0.91$ dan $VRI : 0.8150$

Nilai keanggotaan tegangan :

- $\mu_{\text{TEGANGANKurang}} [0.91] = (0.94-0.91)/(0.94-0.90) = 0.75$
- $\mu_{\text{TEGANGANsedang}} [0.91] = (0.91-0.90)/(0.94-0.90) = 0.25$
- $\mu_{\text{TEGANGANbagus}} [0.91] = 0$

Nilai keanggotaan VRI :

- $\mu_{\text{VRI_LS2bus}} [0.8150] = (0.81702-0.8150)/(0.81702-0.81429) = 0.74$
- $\mu_{\text{VRI_LS1bus}} [0.8150] = (0.8150-0.81429)/(0.81702-0.81429) = 0.26$
- $\mu_{\text{VRI_TanpaLS ramai}} [0.8150] = 0$

Setelah didapatkan nilai keanggotaan tegangan dan VRI maka akan dimasukkan kedalam table operasi fuzzy sebagai berikut [3]:

Tabel 3.5 Tabel *Rule* Operasi Fuzzy

operasi AND (find min)		VRI		
		kurang	sedang	bagus
Vm	kurang	layak LS 2 bus	layak LS 1 bus	layak LS 1 bus
	sedang	layak LS 2 bus	layak LS 1 bus	tanpa LS
	bagus	layak LS 1 bus	tanpa LS	tanpa LS

Operasi fuzzy menggunakan operasi AND untuk mencari nilai minimum dari masing masing elemen.

3.6.2 Proses Defuzzifikasi

Setelah nilai minimum tersebut didapatkan maka akan masuk proses defuzzifikasi dengan metode Mamdani, yaitu dengan mengalikan masing masing elemen yang dipilih dengan jumlah beban real sehingga didapatkan nilai crisp / nyata pelepasan beban.

Nilai beban real didapatkan dari beban pada masing-masing bus yang berbeda, sehingga akan didapatkan nilai pelepasan beban yang berbeda juga dengan berbagai macam kasus.

Tabel 3.6 Tabel Operasi Defuzzyfikasi

operasi AND(find min)		VRI		
		LS 2 BUS	LS 1 BUS	TANPA LS
		0.74	0.26	0
Vm	kurang 0.75	layak LS 2 bus 0.74	layak LS 1 bus 0.26	tanpa LS 0
	sedang 0.25	layak LS 2 bus 0.25	layak LS 1 bus 0.26	tanpa LS 0
	bagus 0	tanpa LS 0	tanpa LS 0	tanpa LS 0

Sistem telah memutuskan untuk melepas beban pada 2 bus yaitu 13 dan 11. Jumlah total beban jika kedua bus dilepas adalah 3.91 pu, dan jika hanya melepas bus 13 saja, jumlah beban yang dilepas adalah 1.9566 pu.

Dengan proses logika fuzzy maka beban pada bus 13 dan 11 tidak perlu dilepas total. Perhitungan beban yang harus dilepas menggunakan proses defuzzifikasi mamdani sebagai berikut :

$$\text{Beban yang harus dilepas} = \frac{(0,74 \times 3,91) + (0,25 \times 1,955)}{0,74 + 0,25}$$

Beban yang harus dilepas adalah 3.42 pu. Tidak perlu 3.91

BAB IV IMPLEMENTASI DAN ANALISA

Pada penelitian sebagai tugas akhir ini dilakukan analisa pada jaringan distribusi 20kV wilayah Surabaya Utara pada penyulang Ometraco dengan 13 bus. Data yang digunakan adalah sebagai berikut.

Tabel 4.1 Data Beban Penyulang Ometraco

Nomor Bus	Daya (pu)					
	R		S		T	
	P	Q	P	Q	P	Q
1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2	0.4035	0.0985	0.4275	0.081	0.4155	0.095
3	0.1125	0.023	0.115	0.0335	0.1135	0.016
4	0.125	0.075	0.125	0.075	0.125	0.1
5	0.13	0.0215	0.2025	0.039	0.1845	0.4945
6	0.2055	0.0385	0.189	0.042	0.2165	0.025
7	0.285	0.054	0.307	0.063	0.291	0.062
8	0.177	0.036	0.2185	0.0805	0.1445	0.324
9	0.343	0.0925	0.3185	0.1005	0.333	0.099
10	0.343	0.046	0.261	0.0425	0.188	0.044
11	0.6045	0.1285	0.7855	0.214	0.4925	0.1805
12	0.605	0.1015	0.657	0.13	0.58	0.1
13	0.6045	0.1285	0.7855	0.214	0.4925	0.1805

4.1 Uji Coba Penambahan Beban pada Bus 2

Pada uji coba ini akan dilakukan penambahan beban pada bus 2 sehingga diketahui jawaban dari sistem untuk tingkat keperluan pelepasan beban dan lokasi pelepasan beban.

Uji coba pertama dilakukan penambahan beban pada bus 2 sebesar 13 kali lipat. Hasil load flow menunjukkan bahwa tegangan pada 13 bus dalam penyulang ometraco turun sampai pada batas yang diijinkan. Sehingga sistem menyarankan untuk lepas beban pada bus 13. Berikut adalah hasil load flow keadaan sistem normal, setelah dinaikkan bebannya sebanyak 13 kali, lepas beban pada bus 13 sesuai saran sistem, dan melepas beban pada bus 13 namun tidak 100% (jumlah spesifik beban).

Tabel 4.2 Hasil Load Flow pada bus 2

Hasil <i>load flow</i> kondisi normal			Hasil <i>load flow</i> kondisi <i>overload</i>		
No. Bus	Vm(pu)	VRI	No. Bus	Vm(pu)	VRI
13	0.9403	0.8397	13	0.8928	0.8181
11	0.9414	0.8402	11	0.894	0.8187
12	0.9418	0.8403	12	0.8944	0.8188
10	0.9429	0.8408	10	0.8955	0.8194
9	0.9441	0.8414	9	0.8968	0.82
7	0.9447	0.8416	7	0.8974	0.8202
8	0.9449	0.8417	8	0.8976	0.8203
5	0.9482	0.8432	5	0.9011	0.8219
6	0.9482	0.8432	6	0.9012	0.8219
4	0.9523	0.8451	4	0.9055	0.8239
3	0.9555	0.8463	3	0.9086	0.8252
2	0.9641	0.8494	2	0.9176	0.8273
1	1	1	1	1	1

Hasil <i>load flow</i> kondisi setelah lepas beban			Hasil <i>load flow</i> kondisi setelah lepas beban sesuai perhitungan		
No. Bus	Vm(pu)	VRI	No. Bus	Vm(pu)	VRI
11	0.9027	0.8227	11	0.9003	0.8216
10	0.9043	0.8234	10	0.9018	0.8223
9	0.9056	0.824	9	0.9031	0.8229
8	0.9064	0.8243	13	0.9037	0.8231
12	0.9078	0.825	8	0.9039	0.8232
13	0.9078	0.8251	12	0.9041	0.8233
7	0.9093	0.8257	7	0.906	0.8241
6	0.9099	0.8259	6	0.9074	0.8248
5	0.9114	0.8266	5	0.9085	0.8253
4	0.9141	0.8279	4	0.9117	0.8268
3	0.9168	0.829	3	0.9145	0.8279
2	0.9241	0.8304	2	0.9223	0.8295
1	1	1	1	1	1

Hasil running program hingga sistem menjawab bahwa harus dilakukan pelepasan 1 bus pada bus 13 adalah sebagai berikut :

```

system(Windows)
13 pada bus 13

tm =
    0.1433    0.8567    0

vri =
     0    0.7179    0.2821

find min
lgi =
     0     0     0

lgi =
    0.1433    0.7179    0

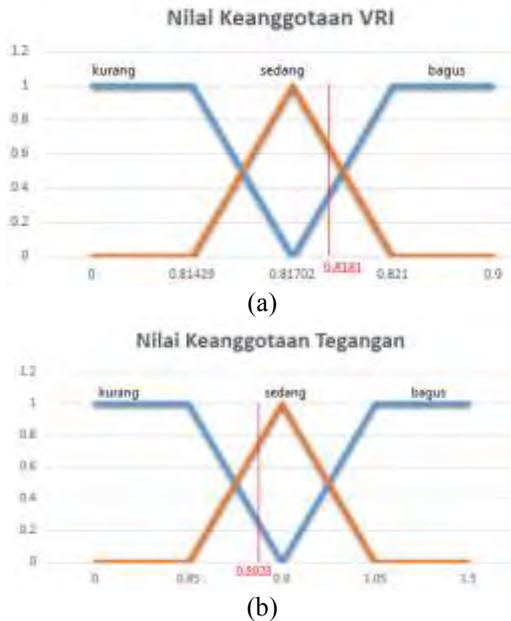
lgi =
    0.1433    0.2821    0

la_real =
    1.4048
  
```

Gambar 4.1 Hasil running program uji coba bus 2

Terlihat pada table 4.2 pada pembebanan normal, hasil analisa aliran daya menunjukkan tegangan pada masing-masing bus normal. Kemudian saat beban dinaikkan pada bus 2 sampai mencapai 13 kali lipat didapatkan bahwa tegangan pada beberapa bus tidak memenuhi standart sehingga sistem menyarankan untuk melepaskan beban pada bus 13. Selanjutnya kolom keempat merupakan hasil analisa aliran daya setelah saran sistem diikuti dengan melepas seluruh beban pada bus 13 dan didapatkan sistem kembali kepada keadaan tegangan normal yaitu dengan tegangan rata-rata pada sistem adalah 0.90 pu. Namun di sisi lain sistem juga dapat menjawab bahwa sebenarnya pelepasan beban pada bus 13 tidak harus dilepas secara keseluruhan. Nilai spesifik beban yang harus dilepas ini didapatkan dari perhitungan proses defuzzifikasi.

Untuk mendapatkan jawaban bahwa harus dilepas 2 bus, 1 bus atau tanpa pelepasan beban adalah hasil dari proses fuzzifikasi dan defuzzifikasi. Data dari hasil load flow pada Tabel 4.2 kolom kedua (kenaikan beban 13 kali lipat) didapatkan bahwa nilai paling rendah berada pada bus 13 dengan nilai tegangan 0.8928 dan nilai VRI 0.8181. kedua nilai tersebut menjadi input dari proses fuzzy, sebagaimana ditunjukkan pada gambar berikut ini.



Gambar 4.2 (a)Membership function vri, (b)Membership function tegangan

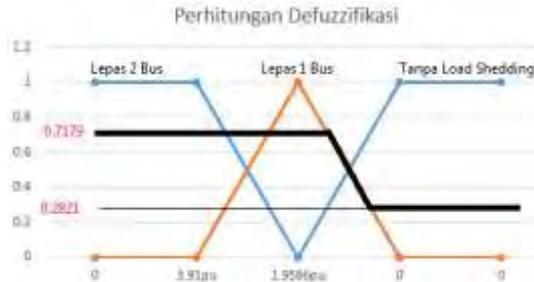
Dari hasil membership function pada gambar 4.2 diatas maka didapatkan table hasil fuzzifikasi beserta penerapan rule yang ditunjukkan pada table 4.3.

Tabel 4.3 Hasil Fuzzyfikasi kasus penambahan beban bus 2

Vm & VRI			VRI		
			kurang	sedang	bagus
			0	0.7179	0.2821
Vm	kurang	0.1433	0	0.1433	0.1433
	sedang	0.8567	0	0.7179	0.2821
	bagus	0	0	0	0

Setelah didapatkan nilai keanggotaan masing masing variable yang ditunjukkan pada table 4.3, maka akan diambil perhitungan untuk menentukan nilai spesifik beban yang harus dilepas sebagai berikut :

$$* (0.7179 \times 1.9566) + (0.2821 \times 0) / (0.7179+0.2821) = 1.4\text{pu}$$



Gambar 4.3 Perhitungan defuzzifikasi Uji Coba bus 2

Beban total pada bus 13 adalah sejumlah 1.9566 pu. Sedangkan sesuai perhitungan hanya perlu melepas 1.4 pu saja untuk mengembalikan tegangan sistem kedalam range yang diijinkan. Untuk aplikasi dalam dunia nyata adalah melepas beban pada satu bus (1 trafo), untuk pengembangan selanjutnya dapat diterapkan pelepasan beban dengan jumlah yang spesifik. Hal ini dilakukan untuk meminimalisir jumlah beban yang harus dilepas.

Pada table 4.2 terlihat bahwa terdapat selisih nilai tegangan antara pelepasan beban pada 1 bus secara total (100%) dengan pelepasan beban dengan nilai spesifik pada suatu bus. Selisih tegangan pada bus 11 adalah 0.9027 pu dengan 0.9003 pu.

4.2 Uji Coba Penambahan Beban pada Bus 4

Uji coba kedua dilakukan pada bus 4 sehingga sistem memberikan saran untuk melepas dua bus sekaligus pada bus 13 dan 11.

Tabel 4.4 Hasil *load flow* pada bus 4

Hasil <i>load flow</i> kondisi normal			Hasil <i>load flow</i> kondisi <i>overload</i>		
No. Bus	Vm(pu)	VRI	No. Bus	Vm(pu)	VRI
13	0.9403	0.8397	13	0.8857	0.8149
11	0.9414	0.8402	11	0.8868	0.8155
12	0.9418	0.8403	12	0.8872	0.8156
10	0.9429	0.8408	10	0.8884	0.8162
9	0.9441	0.8414	9	0.8897	0.8168
7	0.9447	0.8416	7	0.8903	0.817
8	0.9449	0.8417	8	0.8906	0.8171
5	0.9482	0.8432	5	0.8941	0.8187
6	0.9482	0.8432	6	0.8941	0.8187
4	0.9523	0.8451	4	0.8985	0.8208
3	0.9555	0.8463	3	0.9073	0.8244
2	0.9641	0.8494	2	0.9259	0.8315

Hasil <i>load flow</i> kondisi setelah lepas beban			Hasil <i>load flow</i> kondisi setelah lepas beban sesuai perhitungan		
No. Bus	Vm(pu)	VRI	No. Bus	Vm(pu)	VRI
12	0.9101	0.8261	13	0.9062	0.8244
13	0.9101	0.8262	12	0.9064	0.8244
9	0.9111	0.8266	11	0.9074	0.8249
10	0.9114	0.8267	9	0.9077	0.825
11	0.9114	0.8267	10	0.9077	0.825
7	0.9116	0.8268	7	0.9081	0.8252
8	0.9119	0.8269	8	0.9085	0.8254
5	0.9137	0.8277	5	0.9106	0.8263
6	0.9138	0.8278	6	0.9107	0.8263
4	0.9164	0.829	4	0.9136	0.8277
3	0.9241	0.8321	3	0.9214	0.8309
2	0.9392	0.8378	2	0.9371	0.8368
1	1	1	1	1	1

Dari table 4.4 terlihat bahwa saran yang diberikan sistem adalah pelepasan beban pada bus 13 dan 11. Setelah saran diikuti dan dilakukan pelepasan beban pada bus 13 dan 11 maka didapatkan tegangan sistem yang sudah kembali normal yaitu dengan nilai rata-rata tegangan 0.91 pu. Namun pada kolom keempat ditunjukkan hasil analisa aliran daya saat pelepasan beban tidak dilakukan 100% pada bus 13 dan 11. Sistem dapat menjawab spesifik beban yang harus dilepas.

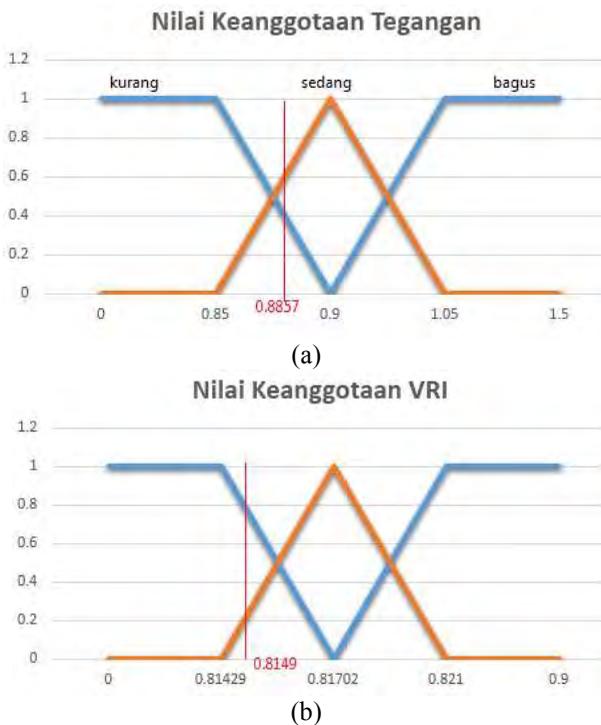
Hasil running program :



Gambar 4.4 Hasil Running Program

Jawaban Sistem untuk melepas beban 2 bus sekaligus, pada lokasi 13 dan 11 dapat dilihat dari ranking hasil load flow yang ditunjukkan table 4.4. Selanjutnya adalah proses fuzzifikasi dan defuzzifikasi. Data dari hasil load flow pada Tabel 4.4 kolom kedua (kenaikan beban 27 kali lipat) didapatkan bahwa nilai paling rendah berada pada bus 13 dengan nilai tegangan 0.8857 dan nilai VRI 0.8149. kedua nilai tersebut menjadi

input dari proses fuzzy, sebagaimana ditunjukkan pada gambar berikut ini.



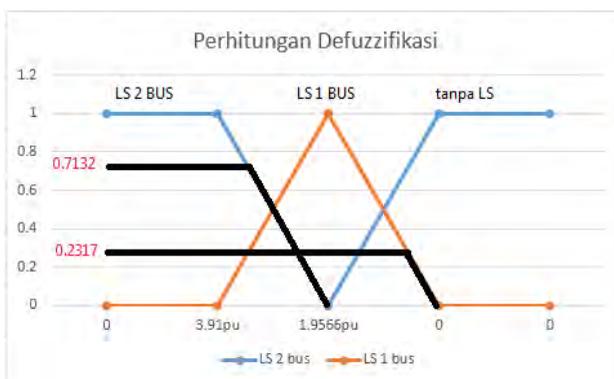
Gambar 4.5 (a) Membership function tegangan (b) Membership function tegangan dan vri

Tabel 4.5 Hasil Fuzzyfikasi kasus penambahan beban bus 4

Vm & VRI			VRI		
			LS 2 bus	LS 1 bus	tanpa LS
			0.7683	0.2317	0
Vm	kurang	0.2868	0.2868	0.2317	0
	sedang	0.7132	0.7132	0.2317	0
	bagus	0	0	0	0

Dari hasil *membership function* pada gambar 4.5 diatas maka didapatkan table hasil fuzzifikasi beserta penerapan rule yang ditunjukkan pada tabel 4.5 berikut ini. Setelah didapatkan nilai keanggotaan masing masing variable yang ditunjukkan dalam table 4.5, maka akan diambil perhitungan untuk menentukan nilai spesifik beban yang harus dilepas sebagai berikut :

$$* (0.7132 \times 3.91334) + (0.2317 \times 1.9566) / (0.7132+0.2317) = 3.27 \text{ pu}$$



Gambar 4.6 Perhitungan defuzzifikasi uji coba bus 4

Proses defuzzifikasi pada uji coba bus 4 digambarkan pada Gambar 4.3. dimana nilai persen untuk melakukan pelepasan beban untuk 2 bus adalah 0.7132 dan untuk 1 bus adalah 0.2317.

Beban pada 2 bus yang akan dilepas sekaligus memiliki nilai 3.91 pu dan jika melepas 1 bus saja maka akan melepas beban sebesar 1.95 pu. Maka dari itu, digunakan rumus defuzzifikasi sehingga menghasilkan beban 3.27 pu saja yang harus dilepas untuk mengembalikan sistem kepada kondisi normal dan meminimalisir jumlah beban yang dilepas. Pada table 4.4 kolom ke 4 dan 3 terlihat dari pelepasan beban 100% pada bus 13 dan 11, dibandingkan dengan tidak 100% atau 3.27 pu dari 3.91 pu menghasilkan hasil yang sama, yaitu mengembalikan sistem kepada keadaan normal dengan batas tegangan yang diijinkan. Namun untuk nilai tegangannya memang berbeda antara melepas 100% atau 3.91 dengan melepas tidak 100% atau 3.27 pu.. Perbedaan pada table 4.4 kolom 4 dan 3 adalah 0.9026 pu dan 0.9101 pu.

4.3 Uji Coba Penambahan Beban pada Bus 8

Uji coba kedua dilakukan pada bus 4 sehingga sistem memberikan saran untuk melepas dua bus sekaligus pada bus 11 dan 10.

Tabel 4.6 Uji Coba pada penambahan beban bus 8

Hasil <i>load flow</i> kondisi normal			Hasil <i>load flow</i> kondisi <i>overload</i>		
No. Bus	Vm(pu)	VRI	No. Bus	Vm(pu)	VRI
13	0.9403	0.8397	11	0.8779	0.8114
11	0.9414	0.8402	10	0.8795	0.8121
12	0.9418	0.8403	9	0.8809	0.8128
10	0.9429	0.8408	8	0.8817	0.8129
9	0.9441	0.8414	6	0.8933	0.8182
7	0.9447	0.8416	13	0.8936	0.8186
8	0.9449	0.8417	12	0.8952	0.8193
5	0.9482	0.8432	7	0.8982	0.8206
6	0.9482	0.8432	5	0.902	0.8223
4	0.9523	0.8451	4	0.9063	0.8244
3	0.9555	0.8463	3	0.9149	0.8279
2	0.9641	0.8494	2	0.9319	0.8344

Hasil <i>load flow</i> kondisi setelah lepas beban			Hasil <i>load flow</i> kondisi setelah lepas beban sesuai perhitungan		
No. Bus	Vm(pu)	VRI	No. Bus	Vm(pu)	VRI
9	0.8984	0.8208	9	0.896	0.8197
8	0.8992	0.821	11	0.8963	0.8199
11	0.8992	0.8212	8	0.8968	0.8199
10	0.8992	0.8212	10	0.8965	0.82
13	0.9063	0.8244	13	0.9046	0.8236
12	0.9079	0.8251	6	0.9064	0.8242
6	0.9084	0.8252	12	0.9061	0.8243
7	0.9109	0.8264	7	0.9091	0.8256
5	0.9146	0.8281	5	0.9129	0.8273
4	0.9189	0.8301	4	0.9172	0.8293
3	0.9266	0.8333	3	0.925	0.8326
2	0.9412	0.8388	2	0.9399	0.8382
1	1	1	1	1	1

Pada table 4.6 dilakukan uji coba dengan penambahan beban pada bus 8 sampai 15 kali lipat dan sistem menjawab bahwa harus dilakukan pelepasan bus pada bus 11 dan bus 10. Setelah saran diikuti dan dilakukan pelepasan beban pada bus 11 dan 10 maka didapatkan tegangan sistem yang sudah kembali normal yaitu dengan nilai rata-rata tegangan 0.9 pu. Namun pada kolom kelima ditunjukkan hasil analisa aliran daya saat pelepasan beban tidak dilakukan 100% pada bus 11 dan 10. Sistem dapat menjawab spesifik beban yang harus dilepas. Berikut adalah perhitungan dari proses hingga mendapatkan jumlah spesifik beban yang harus dilepas.

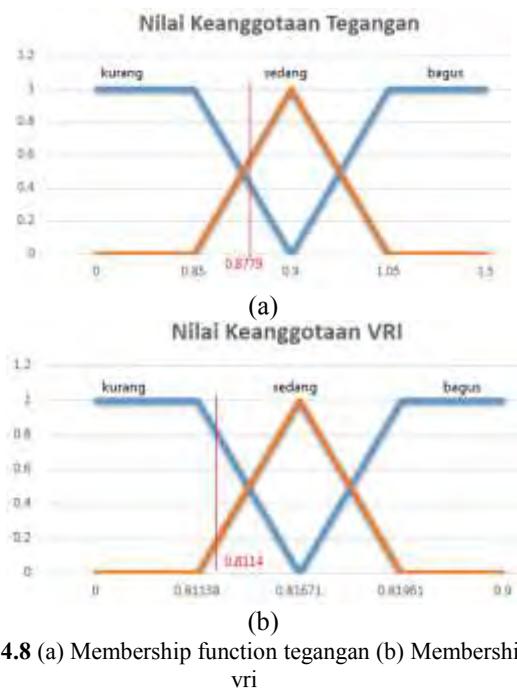
Hasil running program :



Gambar 4.7 Hasil Running Program

Jawaban sistem untuk melepas beban pada bus 10 dan 11 dapat dilihat dari ranking hasil load flow yang ditunjukkan table 4.6. Selanjutnya adalah proses fuzzifikasi dan defuzzifikasi. Data dari hasil

load flow pada Tabel 4.6 kolom kedua (kenaikan beban 15 kali lipat) didapatkan bahwa nilai paling rendah berada pada bus 10 dengan nilai tegangan 0.8779 dan nilai VRI 0.8114. kedua nilai tersebut menjadi input dari proses fuzzy, sebagaimana ditunjukkan pada gambar berikut ini.



Gambar 4.8 (a) Membership function tegangan (b) Membership function vri

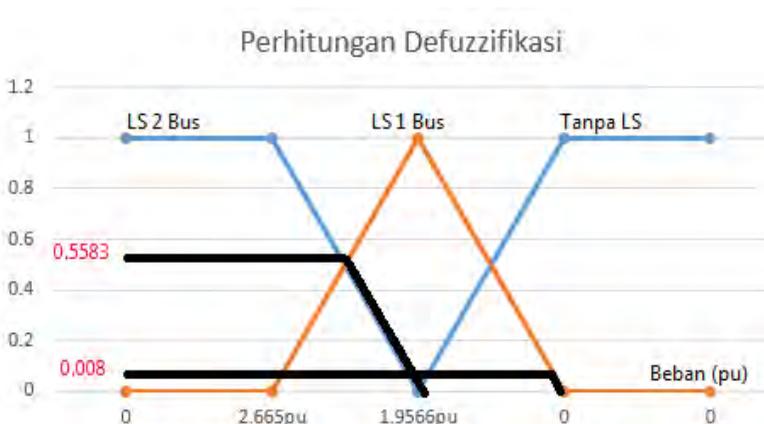
Tabel 4.7 Hasil Fuzzyfikasi kasus penambahan beban bus 8

Vm & VRI			VRI		
			LS 2 bus	LS 1 bus	tanpa LS
Vm	kurang	0.4417	0.992	0.008	0
	sedang	0.5583	0.5583	0.008	0
	bagus	0	0	0	0

Dari hasil membership function pada gambar 4.8 diatas maka didapatkan table hasil fuzzifikasi beserta penerapan rule yang ditunjukkan pada table 4.7

Setelah didapatkan nilai keanggotaan masing masing variable yang ditunjukkan dalam table 4.7, maka akan diambil perhitungan untuk menentukan nilai spesifik beban yang harus dilepas sebagai berikut :

$$* (0.5583 \times 2.665) + (0.008 \times 1.9566) / (0.5583 + 0.008) = 2.6569 \text{ pu}$$



Gambar 4.9 Perhitungan defuzzifikasi uji coba bus 8

Proses defuzzifikasi pada uji coba bus 8 digambarkan pada Gambar 4.6. dimana nilai persen untuk melakukan pelepasan beban untuk 2 bus adalah 0.5583 dan untuk 1 bus adalah 0.008.

Beban pada 2 bus yang akan dilepas sekaligus memiliki nilai 2.665 pu dan jika melepas 1 bus saja maka akan melepas beban sebesar 1.95 pu. Pada table 4.6 kolom ke 3 dan 5 terlihat dari pelepasan beban 100% pada bus 10 dan 11, dibandingkan dengan tidak 100% atau 2.65 pu dari 2.66 pu menghasilkan hasil yang sama, yaitu mengembalikan sistem kepada keadaan normal dengan batas tegangan yang diijinkan. Perbedaan terlihat pada nilai tegangan jika melepas 100% maka akan lebih bagus bila dibandingkan dengan melepas sebagian saja. Perbedaan pada table 4.6 kolom 4 dan 5 adalah 0.898 pu dan 0.894 pu.

~halaman ini sengaja dikosongkan~

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

Dalam bab penutup ini akan ditarik kesimpulan penting dari penelitian yang telah dilakukan sehingga dapat menjadi pertimbangan dalam pengoperasian sebuah sistem. Pada bab penutup ini juga akan diberikan saran untuk pengembangan penelitian selanjutnya karena segala sesuatu tidak luput dari suatu kesalahan.

5.1 Kesimpulan

Penelitian *event driven load shedding* menghasilkan kesimpulan sebagai berikut :

- a. *Event-driven load shedding* merupakan aplikasi yang dapat memberikan saran yang cepat untuk pelepasan beban pada penyulang ometraco.
- b. Metode Positive Sequence Ranking Index mampu menunjukkan urutan kekuatan bus.
- c. Metode fuzzy cocok digunakan untuk menggabungkan dua variabel yaitu VRI dan Vm dalam penentuan pelepasan beban sehingga dapat menyelesaikan permasalahan pelepasan beban dari segi jumlah bus yang harus dilepas.
- d. Metode defuzzifikasi Mamdani dapat menghitung jumlah spesifik beban yang harus dilepas.
- e. Saran pelepasan beban berdasarkan nilai tegangan dan positive sequence ranking index yang cepat dapat membantu sistem kelistrikan kembali kepada keadaan normal setelah penambahan beban sampai overload.

5.2 Saran

Penelitian ini dilakukan berdasarkan nilai tegangan dan ranking tegangan urutan positif. Pada sisi lain masalah pelepasan beban juga berkaitan dengan jumlah beban yang harus dilepas dan frekuensi sistem dimana sebuah pelepasan beban dilakukan. Sehingga untuk penelitian selanjutnya diharapkan dapat menentukan besar beban secara spesifik untuk dilepas. Dan atau dapat menggunakan metode neural network sebagai pendekatan proses pelepasan beban. Penelitian selanjutnya dapat menambahkan beberapa variable yang berpengaruh kepada pelepasan beban.

~Halaman ini sengaja dikosongkan~

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Yan Xu, Zaong Yang Dong, dkk., “*Parallel-differential evolution approach for optimal event-driven load shedding against voltage collapse in power sistem*” , IET Generation, Transmission & Distribution., 2014, Vol.8, Iss. 4, pp. 651-660 doi: 10.1049/iet-gtd.2013.0385.
- [2] Juanuwattanakul, P., “*Increasing distributed generation penetration in multiphase distribution networks considering grid losses, maximum loading factor and bus voltage limits*” , IET Generation, Transmission & Distribution, 2012, Vol.6, Iss.12, pp.1262-1271
- [3] J.Sasikala, M. Ramaswamy, “Fuzzy based Load Shedding Strategies for Avoiding Voltage Collapse”, Elsevier, Applied Soft Computing, 2010, doi:10.1016/j.asoc.2010.12.020.
- [4] Jen-Hao TENG, “*A Network-Topology-based Three-Phase Load Flow for Distribution Systems*”, Proc. Natl.Sci.Counc. ROC(A) Vol.24, No.4,2000.pp.259-264
- [5] Perkuliahan Analisis Sistem Tenaga, 21 Oktober 2013, Prof. Adi S
- [6] Materi Perkuliahan Analisis Sistem Tenaga, Stabilitas, Prof Ontoseno P
- [7] <http://sistem-tenaga-listrik.blogspot.com/2011/05/stabilitas-sistem-tenaga.html> (diakses pada 21 November)
- [8] Short, Tom. 1966, "Electric power distribution handbook",
- [9] Martiana, Entin. “Logika Fuzzy,” Modul Ajar Mata Kuliah Kecerdasan Buatan, Politeknik Elektronika Negeri Surabaya.2011.
- [10] Materi Perkuliahan Analisis Sistem Tenaga, Komponen Simetri, Prof Ontoseno P

BIOGRAFI PENULIS



Penulis memiliki nama lengkap A'at Khasanah, biasa dipanggil aat. Penulis lahir di kota Nganjuk, kota dengan sebutan kota angin pada tanggal 14 Desember 1990 merupakan anak ke-3 dari 4 bersaudara. Penulis telah menempuh pendidikan dasar selama 6 tahun di SDN Tanjunganom 1, menempuh pendidikan sekolah menengah pertama selama 3 tahun di SMPN 1 Tanjunganom, kemudian menempuh pendidikan sekolah menengah atas selama 3 tahun di SMAN 1 Tanjunganom. Penulis menyelesaikan program diploma tiga di Politeknik Elektronika Negeri Surabaya (PENS) dengan program studi Teknik Informatika. Dan saat ini tengah menempuh program strata satu di Institut Negeri Sepuluh November dengan jurusan Teknik Elektro, bidang studi Teknik Sistem Tenaga.