



ITS
Institut
Teknologi
Sepuluh Nopember

TUGAS AKHIR - TE141599

Analisa Conservation Voltage Reduction (CVR) Pada Jaringan Distribusi Microgrid Menggunakan Line Drop Compensator (LDC).

Mochammad Kemal Achriansyah
NRP 2212106069

Dosen Pembimbing
Prof. Ir. Ontoseno Penangsang, M.Sc., Ph.D.
Ir. Teguh Yuwono

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



ITS
Institut
Teknologi
Sepuluh Nopember

FINAL PROJECT - TE141599

**Conservation Voltage Reduction (CVR) Analysis in A
Microgrid Distribution Network Using Line Drop
Compensator (LDC).**

Mochammad Kemal Achriansyah
NRP 2212106069

Supervisors
Prof. Ir. Ontoseno Penangsang, M.Sc., Ph.D.
Ir. Teguh Yuwono

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

**ANALISA CONSERVATION VOLTAGE REDUCTION
(CVR) PADA JARINGAN DISTRIBUSI MICROGRID
MENGUNAKAN LINE DROP COMPENSATOR (LDC)**

TUGAS AKHIR

Diajukan Guna 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,



Ir. Ontoseno Penangsang, M.Sc., Ph.D
NIP. 1949 07151974121001

Ir. Teguh Yuwono
NIP. 1950 08061976121002



ABSTRAK

Microgrid merupakan sistem energi listrik yang menggunakan berbagai energi terbarukan sebagai sumbernya. Dengan berkembangnya teknologi *microgrid*, muncullah berbagai pemikiran tentang efisiensi energi dan penyimpanan energi pada sistem kelistrikan *microgrid*. salah satu metode efisiensi energi yang dapat digunakan yaitu *conservation voltage reduction* (CVR). CVR merupakan metode yang diharapkan dapat menghemat energi dengan cara menurunkan level tegangan dari suatu jaringan distribusi kelistrikan. Dalam pengoperasiannya, CVR memiliki beberapa metode implementasi, salah satunya yaitu dengan *line drop compensation* (LDC). Fungsi dari *line drop compensation* adalah memodelkan resistansi dan reaktansi total dari transformator hingga pusat beban pada suatu saluran distribusi, yang kemudian akan digunakan untuk memantau nilai arus beban serta menjaga profil tegangan agar tetap sama dengan profil tegangan yang diinginkan. Bagaimanapun terdapat beberapa peralatan tenaga listrik yang menjaga masukan energinya agar tetap konstan, salah satu caranya yaitu dengan menaikkan nilai arus listrik, dimana hal ini mengakibatkan meningkatnya nilai rugi-rugi pada saluran. Oleh karena itu diperlukan suatu analisa dan perhitungan guna mengetahui seberapa efektif metode *conservation voltage reduction* (CVR) dalam penghematan konsumsi energi listrik.

Kata Kunci : *Microgrid*, *Conservation Voltage Reduction* (CVR), *Line Drop Compensation* (LDC).

ABSTRACT

Microgrid is an electrical energy system that uses a variety of renewable energy as a source. With the development of microgrid technology, comes a variety of ideas about energy efficiency and energy storage in electrical microgrid system. One method that can be used is conservation voltage reduction (CVR). CVR is a method that is expected to save energy by lowering the voltage level of an electricity distribution network. In operation, the CVR has several methods of implementation, one of which is the line drop compensation (LDC). The function of line drop compensation is to model the resistance and reactance of the transformer to the center of the total load on a distribution system, which will then be used to monitor the value of the load current and voltage in order to keep the profile remains the same with the desired voltage profile. However, there are some electrical power equipment that have to keep the input energy remains constant, in order to happen, it will increase the value of the electric current, where this has resulted in increased losses on the distribution line. Therefore we need an analysis and calculation to determine how effective conservation voltage reduction (CVR) in electrical energy consumption savings.

Keywords : *Microgrid, Conservation Voltage Reduction (CVR), Line Drop Compensation (LDC)*

KATA PENGANTAR

Puji Syukur penulis panjatkan kehadiran Allah Subhanahu Wa Ta'ala atas segala Rahmat, Karunia, dan Petunjuk yang telah dilimpahkan-Nya sehingga penulis mampu menyelesaikan tugas akhir dengan judul ***Analisa Conservation Voltage Reduction (CVR) Pada Jaringan Distribusi Microgrid Menggunakan Line Drop Compensator (LDC)***.

Tugas Akhir ini disusun sebagai salah satu persyaratan untuk menyelesaikan jenjang pendidikan S1 pada Bidang Studi Teknik Sistem Tenaga, Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember. Atas selesainya penyusunan tugas akhir ini, penulis ingin mengucapkan terima kasih kepada :

1. Allah Subhanahu Wa Ta'ala atas limpahan rahmat dan karunia-Nya.
2. Nabi Besar Muhammad Shallallahu'alaihi Wasallam sebagai panutan dan suri tauladan penulis.
3. Bapak dan Ibu Penulis, Totok Siswanto dan Mufida Hasan, serta seluruh keluarga yang selalu mendukung penulis dalam menyelesaikan studi.
4. Prof. Ir. Ontoseno Penangsang, M.Sc, PhD dan Ir. Teguh Yuwono sebagai dosen pembimbing yang telah memberikan arahan dan perhatiannya dalam tugas akhir.
5. Bapak Suyanto, ST., MT. dan Dimas Fajar Uman Putra, ST., MT. yang telah memberikan dukungan penulis dalam menyelesaikan tugas akhir.
6. Keluarga Lab. B103, Ratih, Leli, Yuli, Aji serta keluarga besar LJ Elektro Sistem Tenaga 106-2012.
7. Seluruh dosen yang telah memberikan ilmunya selama kuliah, karyawan, dan keluarga besar Jurusan Teknik Elektro ITS yang tidak bisa disebutkan satu per satu.

Semoga tugas akhir ini bermanfaat bagi mahasiswa maupun peneliti. Penulis menyadari bahwa masih banyak kekurangan, untuk itu kritik dan saran diharapkan untuk penyempurnaan tugas akhir ini.

Surabaya, Januari 2015
Penulis

DAFTAR ISI

	HALAMAN
JUDUL	i
LEMBAR PENGESAHAN	iii
ABSTRAK	v
ABSTRACT	vii
KATA PENGANTAR	ix
DAFTAR ISI	xi
DAFTAR GAMBAR	xv
DAFTAR TABEL	xvii
BAB 1 PENDAHULUAN	
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Permasalahan.....	2
1.3 Tujuan.....	2
1.4 Batasan Masalah.....	2
1.5 Metodologi.....	2
1.6 Sistematika.....	3
1.7 Relevansi.....	4
BAB 2 DASAR SISTEM TENAGA LISTRIK	
2.1 Sistem Tenaga Listrik.....	5
2.1.1 Besaran Sistem Tenaga Listrik.....	5
2.1.1.1 Tegangan.....	5
2.1.1.2 Arus Listrik.....	5
2.1.1.3 Daya Listrik.....	6
2.1.2 Sistem Tenaga Listrik 3 Fasa.....	7
2.2 Sistem Kelistrikan <i>Microgrid</i>	10
2.2.1 Pembangkitan <i>Microgrid</i>	10
2.2.1.1 <i>Photovoltaic</i>	10
2.2.1.2 <i>Turbin Angin</i>	11
2.2.1.3 <i>Diesel Generator</i>	13
2.2.1.4 <i>Baterai</i>	13
2.2.2 Mode Operasi <i>Microgrid</i>	14
2.2.2.1 <i>Stand-alone (Off-grid)</i>	15
2.2.2.2 <i>Grid Connected (On-grid)</i>	15
2.3 Jaringan Distribusi Radial.....	16

BAB 2	DASAR SISTEM TENAGA LISTRIK	
	2.4 Analisis Aliran Daya.....	18
	2.5 <i>Conservation Voltage Reduction (CVR)</i>	22
	2.5.1 <i>CVR-factor</i>	23
	2.6 <i>Line Drop Compensation (LDC)</i>	23
BAB 3	PENERAPAN METODE CVR DENGAN LDC PADA JARINGAN DISTRIBUSI <i>MICROGRID</i> IEEE 34 BUS	
	3.1 <i>IEEE 34 Bus Radial Distribution Feeder</i>	25
	3.1.1 <i>IEEE 34 Bus Microgrid Radial Distribution Feeder</i>	27
	3.2 Metode <i>forward-backward</i>	28
	3.2.1 Metode Z_{BR}	28
	3.3 <i>Line Drop Compensation (LDC)</i>	32
	3.4 <i>Conservation Voltage Reduction (CVR)</i>	33
	3.4.1 <i>CVR-factor</i>	35
BAB 4	SIMULASI DAN ANALISIS	
	4.1 Analisis Aliran Daya pada Sistem Distribusi IEEE 34 Bus.....	37
	4.2 Parameter Rangkaian Kompensator (LDC).....	38
	4.2.1 Parameter Rangkaian Kompensator Trafo 1	38
	4.2.2 Parameter Rangkaian Kompensator Trafo 2	42
	4.2.3 Parameter Rangkaian Kompensator Trafo 3	45
	4.2.4 Parameter Rangkaian Kompensator Trafo 4	48
	4.3 Analisa Aplikasi CVR Pada Sistem Distribusi <i>Microgrid</i> IEEE 34 Bus.....	52
	4.3.1 Hasil <i>CVR-factor</i> Pada Bus Beban Sistem Distribusi <i>Microgrid</i> IEEE 34 Bus.....	53
	4.3.1.1 Hasil <i>CVR-factor</i> Pada Bus Beban <i>Constant Power</i>	53
	4.3.1.2 Hasil <i>CVR-factor</i> Pada Bus Beban <i>Constant Current</i>	55
	4.3.1.3 Hasil <i>CVR-factor</i> Pada Bus Beban <i>Constant Impedance</i>	56

BAB 5	PENUTUP	
	5.1 Kesimpulan.....	59

DAFTAR PUSTAKA
RIWAYAT HIDUP

DAFTAR TABEL

	HALAMAN
Tabel 2.1 Penggolongan Tegangan	5
Tabel 2.2 <i>Table of Base Values</i>	24
Tabel 3.1 <i>Overhead Line Configuration</i>	25
Tabel 3.2 <i>Line Segment Data</i>	26
Tabel 3.3 <i>Spot Load Data</i>	27
Tabel 3.4 <i>Distributed Generator Data</i>	27
Tabel 4.1 Hasil analisis aliran daya sistem distribusi <i>microgrid</i> IEEE 34 bus.....	37
Tabel 4.2 Hasil analisis aliran daya sistem distribusi <i>microgrid</i> IEEE 34 bus dengan CVR	52
Tabel 4.3 Parameter daya aktif, tegangan, dan arus saat CVR Off dan CVR On pada bus 29	53
Tabel 4.4 Parameter daya aktif, tegangan, dan arus saat CVR Off dan CVR On pada bus 30	54
Tabel 4.5 Parameter daya aktif, tegangan, dan arus saat CVR Off dan CVR On pada bus 24	55
Tabel 4.6 Parameter daya aktif, tegangan, dan arus saat CVR Off dan CVR On pada bus 32	55
Tabel 4.7 Parameter daya aktif, tegangan, dan arus saat CVR Off dan CVR On pada bus 16	56
Tabel 4.8 Parameter daya aktif, tegangan, dan arus saat CVR Off dan CVR On pada bus 27	57

DAFTAR GAMBAR

HALAMAN

Gambar 2.1	Segitiga daya	6
Gambar 2.2	Gelombang listrik 3 fasa	7
Gambar 2.3	Sistem tiga fasa hubungan Y	8
Gambar 2.4	Sistem 3 fasa hubungan Δ	9
Gambar 2.5	Kurva daya actual dan modelnya dari AIR403	12
Gambar 2.6	Tipe <i>microgrid stand-alone</i>	15
Gambar 2.7	Tipe <i>grid-connected</i> pada <i>microgrid</i>	15
Gambar 2.8	Jaringan distribusi radial tipe pohon	17
Gambar 2.9	Jaringan distribusi radial tie dan switch	17
Gambar 2.10	Jaringan distribusi radial pusat beban	18
Gambar 2.11	Jaringan distribusi radial dengan fasa area	18
Gambar 2.12	Contoh rangkaian analisis aliran daya <i>forward-backward</i>	19
Gambar 2.13	<i>Single line diagram</i> contoh analisis <i>forward-backward</i>	22
Gambar 2.14	<i>Line Drop Compensator Circuit</i>	24
Gambar 3.1	Konfigurasi IEEE 34 Bus <i>Radial Distribution Feeder</i>	25
Gambar 3.2	Konfigurasi IEEE 34 Bus <i>Microgrid Radial Distribution Feeder</i>	28
Gambar 3.3	<i>Single line diagram</i> contoh analisis menggunakan metode <i>network topology</i>	29
Gambar 3.4	Contoh rangkaian 3 fasa untuk membentuk matrik Z_{BR}	31
Gambar 3.5	<i>Line Drop Compensator Circuit</i>	32
Gambar 3.6	Perubahan Daya Saat Implementasi CVR	36

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Pertumbuhan kebutuhan energi listrik begitu cepat pada era industri modern saat ini. Bertambahnya penggunaan energi listrik ini berbanding lurus dengan meningkatnya emisi gas rumah kaca, serta biaya produksi energi listrik. Untuk itu dibutuhkan suatu sistem guna mengurangi dampak negatif akibat penggunaan energi tak terbarukan serta besarnya penggunaan akan energi listrik. *Microgrid* merupakan sistem energi listrik yang menggunakan berbagai energi terbarukan sebagai sumbernya. Dengan berkembangnya teknologi *microgrid*, muncullah berbagai pemikiran tentang efisiensi energi dan penyimpanan energi pada sistem kelistrikan *microgrid*.

Salah satu metode efisiensi energi yang efisien dan relatif murah yaitu *Conservation Voltage Reduction* (CVR)[1]. CVR ditujukan untuk mengurangi pemakaian energi dengan cara menurunkan level tegangan pada system distribusi kelistrikan. CVR mengatur level tegangan pelanggan serendah mungkin namun masih memenuhi standart ANSI[2]. Selain dapat mereduksi konsumsi energi, CVR juga dapat mengatasi masalah beban puncak, serta berjalan baik untuk beberapa tipe beban dan dapat diterapkan secara real time menggunakan SCADA[3]. Nilai kuantitas perbandingan konsumsi energi dan penurunan level tegangan disebut dengan *CVR factor*. Perhitungan *CVR factor* dilakukan pada tiap penyulang untuk mengetahui efektifitas CVR dalam penghematan penggunaan energi.

Beberapa strategi yang dapat dilakukan dalam penerapan CVR antara lain *line drop compensation (LDC)*, *voltage control*, *voltage speed reduction*, dan *volt/VAR control*[1]. Dalam penelitian ini, CVR dilakukan dengan cara mengatur tap pada transformator. Pengaturan tap pada transformator diatur melalui *line drop compensation*. *Line drop compensation* akan memodelkan resistansi dan reaktansi total dari transformator hingga pusat beban pada suatu saluran distribusi, yang kemudian akan digunakan untuk memantau nilai arus beban serta menjaga profil tegangan agar tetap sama dengan profil tegangan yang diinginkan[4].

1.2 Permasalahan

Hal yang menjadi permasalahan dan akan dibahas dalam tugas akhir ini adalah :

1. Bagaimana Menentukan dan menganalisa nilai CVR berdasarkan jenis beban ?
2. Bagaimana mencari parameter *compensator circuit* yang akan digunakan pada sistem?

1.3 Tujuan

Tujuan yang ingin dicapai dalam tugas akhir ini :

1. Mengetahui seberapa efektif penghematan energi listrik melalui metode CVR.
2. Memperoleh nilai perbandingan antara penurunan konsumsi energi dengan penurunan level tegangan (*CVR factor*).

1.4 Batasan Masalah

Untuk mendapatkan hasil penelitian yang terarah dan tidak menyimpang, maka masalah yang dibahas dalam tugas akhir ini dibatasi sebagai berikut:

1. Model sistem *Micro Grid* yang digunakan berdasarkan jaringan distribusi radial IEEE 34 Bus.
2. Sistem merupakan sistem kelistrikan 3 fasa dengan beban seimbang.
3. Sistem dalam keadaan stabil.
4. Simulasi digunakan dengan menggunakan software Matlab.

1.5 Metodologi

Metodologi yang digunakan dalam penyusunan Tugas Akhir ini antara lain:

1. Studi Literatur
Studi literatur dilakukan dengan membaca buku dan melakukan *browsing* mengenai *Conservation Voltage Reduction* (CVR), sistem kelistrikan *Micro Grid*, dan *Line Drop Compensation* (LDC).
2. Pengumpulan Data
Data yang dikumpulkan meliputi data parameter pembangkit, data tarif jual-beli listrik, emisi, dan biaya pembangkitan tiap pembangkit pada sistem *microgrid*.
3. Simulasi dan Analisis
Melakukan simulasi *Conservation Voltage Reduction* pada sistem *microgrid* dan melakukan analisis terhadap hasil simulasi.

4. Penyusunan Laporan

Penyusunan laporan dilakukan sebagai penggambaran kesimpulan dari tugas akhir ini. Kesimpulan tersebut merupakan jawaban dari permasalahan yang dianalisis. Selain itu juga akan diberikan saran sebagai masukan berkaitan dengan apa yang telah dilakukan.

1.6 Sistematika

Sistematika penulisan dalam Tugas Akhir ini terdiri atas lima bab dengan uraian sebagai berikut :

Bab 1 : Pendahuluan

Bab ini membahas tentang penjelasan mengenai latar belakang, permasalahan dan batasan masalah, tujuan, metode penelitian, sistematika pembahasan, dan relevansi.

Bab 2 : Dasar Teori

Penjelasan mengenai dasar teori yang meliputi sistem kelistrikan *Microgrid*, *Conservation Voltage Reduction (CVR)*, dan *Line Drop Compensation (LDC)*.

Bab 3 : Penerapan Metode CVR dengan LDC Pada Jaringan Distribusi *Microgrid IEEE 34 Bus*

Penjelasan mengenai penerapan *Conservation Voltage Reduction* dengan menggunakan *Line Drop Compensation* pada sistem kelistrikan *microgrid.IEEE 34 bus*.

Bab 4 : Simulasi dan Analisis

Menganalisis hasil simulasi penerapan *Conservation Voltage Reduction* dengan menggunakan *Line Drop Compensation* pada sistem kelistrikan *microgrid*.

Bab 5 : Penutup

Bab ini berisi tentang kesimpulan dari hasil pembahasan yang telah dilakukan.

1.7 Relevansi

Hasil yang diperoleh dari tugas akhir ini diharapkan dapat memberi manfaat sebagai berikut:

1. Dapat dijadikan sebagai acuan dalam pelaksanaan penghematan konsumsi energi listrik pada sistem kelistrikan *microgrid*.
2. Menjadi referensi bagi mahasiswa lain yang akan melakukan penelitian yang berhubungan dengan analisis yang dilakukan penulis.

BAB 2

DASAR TEORI

2.1 Sistem Tenaga Listrik

Energi listrik merupakan jenis energi yang paling efisien dan efektif untuk dibangkitkan dan didistribusikan untuk keperluan masyarakat. Energi listrik diperoleh dari hasil konversi energi primer seperti energi panas, energi potensial, energi mekanik dan lain-lain. Sehingga dalam proses pembangkitan maupun rekayasanya, banyak parameter maupun besaran yang harus diperhatikan.

2.1.1 Besaran Sistem Tenaga Listrik

Untuk mempelajari dan menganalisis suatu sistem tenaga listrik wajib diketahui beberapa parameter maupun besaran yang ada untuk mengetahui gejala-gejala listrik yang ada.

2.1.1.1 Tegangan

Tegangan adalah perbedaan potensial antara dua titik dalam suatu rangkaian listrik dan dinyatakan dalam satuan volt. Tegangan dapat menunjukkan besar energi potensial listrik yang menimbulkan adanya aliran listrik pada suatu konduktor. Secara umum dalam sistem tenaga listrik, besar tegangan dibagi menjadi beberapa golongan yaitu:

Tabel 2.1 Penggolongan tegangan

Golongan Tegangan	Rentang Nilai Tegangan
Tegangan Ekstra Rendah	< 50 volt
Tegangan Rendah	50 volt – 1000 volt
Tegangan Menengah	1000 volt – 35000 volt
Tegangan Tinggi	> 35000 volt

2.1.1.2 Arus Listrik

Arus listrik adalah jumlah muatan listrik yang mengalir pada konduktor sirkuit listrik per detik. Arus listrik terjadi akibat adanya pergerakan elektron-elektron dalam konduktor yang bertegangan. Arus listrik dinyatakan dalam satuan Coulomb/detik atau lebih umum disebut dengan Ampere.

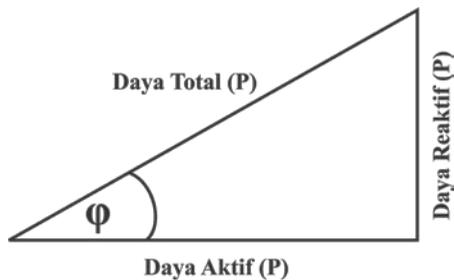
2.1.1.3 Daya Listrik

Daya listrik adalah laju hantaran energi listrik dalam suatu sirkuit listrik. Dalam sistem tenaga listrik, daya listrik dibagi menjadi 3 jenis daya sesuai dengan bagaimana proses pembangkitannya, yaitu daya aktif, daya reaktif, dan daya total.

Daya aktif adalah daya yang dihasilkan dari energi yang nyata dan digunakan untuk melakukan energi yang nyata pula. Pada prinsipnya daya aktif dibangkitkan dari proses konversi energi primer seperti energi panas, energi mekanik, ataupun energi potensial. Daya aktif disimbolkan dengan “P” dan dinyatakan dalam satuan Watt.

Daya reaktif adalah daya yang dibutuhkan untuk membangkitkan medan magnet. Pada prinsipnya daya reaktif dihasilkan dari pembangkitan medan listrik pada generator sinkron melalui sistem eksitasinya. Daya reaktif disimbolkan dengan “Q” dan dinyatakan dalam satuan VAR. Daya total adalah daya yang dihasilkan dari perkalian antara arus dan tegangan, disimbolkan dengan “S” dan dinyatakan dalam satuan VA.

Dalam mendefinisikan hubungan antara tiga daya tersebut, digunakan teori segitiga daya.



Gambar 2.1 Segitiga daya

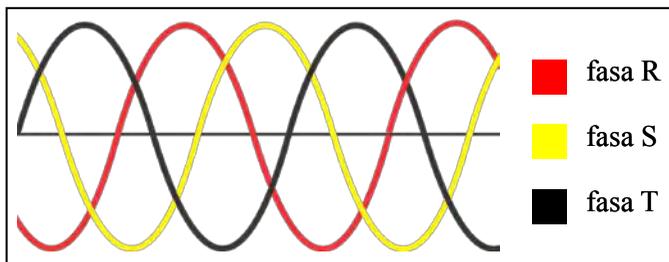
Dari gambar segitiga daya di atas dapat disimpulkan hubungan antara ketiganya sebagai berikut :

$$\begin{aligned} S &= V \times I \\ P &= V \times I \times \cos \varphi \\ Q &= V \times I \times \sin \varphi \end{aligned}$$

$\cos \phi$ merupakan sudut yang merepresentasikan hubungan antara ketiga daya tersebut. Dalam sistem tenaga listrik, $\cos \phi$ merupakan parameter penting yang biasa disebut dengan faktor daya. $\cos \phi$ juga menunjukkan adanya perbedaan sudut antara gelombang tegangan dan gelombang arus dalam fungsi waktu. Apabila suatu beban memiliki karakteristik gelombang arus yang tertinggal maka beban tersebut memiliki nilai $\cos \phi$ negatif atau disebut dengan *lagging*. Namun, apabila suatu beban memiliki karakteristik gelombang arus yang mendahului gelombang tegangan maka beban tersebut memiliki nilai $\cos \phi$ positif atau disebut dengan *leading*.

2.1.2 Sistem Tenaga Listrik 3 Fasa

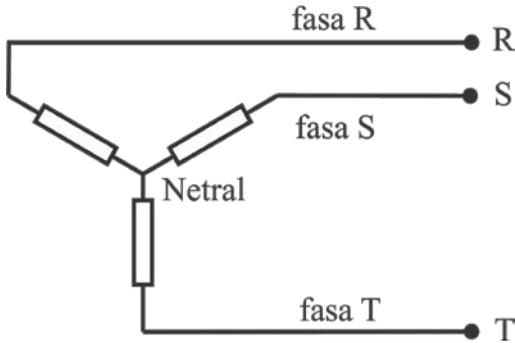
Dalam membangkitkan dan menyalurkan daya listrik, pada teknik sistem tenaga dikenal istilah sistem tiga fasa. Sistem tenaga listrik 3 fasa adalah sistem penyaluran daya listrik yang dibangkitkan dan disalurkan menggunakan tiga gelombang listrik yang berbeda sudut namun memiliki parameter magnitudo dan frekuensi yang sama. Biasanya ketiga fasa tersebut didefinisikan sebagai fasa a, fasa b, dan fasa c, atau dalam literatur lain disebut dengan fasa R, fasa S, dan fasa T.



Gambar 2.2 Gelombang listrik 3 fasa

Gelombang di setiap fasa merupakan gelombang sinusoidal dengan perbedaan sudut antarfasa sebesar 120° . Sistem listrik tiga fasa digunakan agar didapatkan efisiensi penyaluran daya yang tinggi, menjaga kontinuitas pelayanan apabila terdapat fasa yang terganggu, serta untuk mendapatkan kestabilan yang baik. Listrik tiga fasa dibangkitkan dari generator yang memiliki 3 belitan stator dengan konstruksi yang berdampingan.

Secara umum terdapat 2 cara menghubungkan sistem tiga fasa yaitu sistem hubungan Y dan sistem hubungan Δ . Pada hubungan Y, setiap salah satu ujung tiga konduktor fasa dihubungkan membentuk satu *node*, sehingga terdapat titik netral dari sistem 3 fasa. Apabila sistem tiga fasa yang diimplementasikan, maka titik netral tidak memiliki tegangan karena resultan dari ketiga fasa konduktor adalah 0.



Gambar 2.3 Sistem 3 fasa hubungan Y

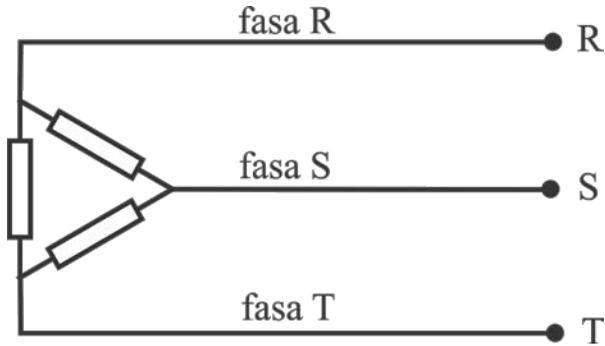
Tegangan antarterminal pada titik R, S, dan T memiliki besar magnitude dan beda fasa yang berbeda dengan tegangan tiap terminal dengan titik netralnya. Tegangan di titik R, S dan T disebut dengan tegangan fasa. jika diamati tegangan antara titik fasa dengan netral juga akan membentuk sistem tiga fasa yang seimbang, yang nilainya adalah $1/\sqrt{3}$ kali dari tegangan antar fasa.

$$V_{line} = \sqrt{3} V_{fasa}$$

Sedangkan karena salah satu ujung di setiap fasa membentuk node yang saling terhubung maka arus yang mengalir pada terminal fasa dan antarfasa memiliki besar yang sama.

$$I_{line} = I_{fasa}$$

Pada hubungan Δ , setiap ujung terminal dari setiap fasa saling dihubungkan satu dengan yang lain sehingga membentuk konfigurasi segitiga.



Gambar 2.4 Sistem 3 fasa hubungan Δ

Karena pada hubungan Δ semua ujung fasa saling berhubungan, maka tegangan pada tiap fasa akan sama besar dengan tegangan pada terminal R, S, dan T. Maka dapat dirumuskan sebagai berikut :

$$V_{line} = V_{fasa}$$

Namun arus yang mengalir pada terminal merupakan resultan arus yang mengalir pada tiap fasa. Sehingga besarnya arus *line* adalah :

$$I_{line} = \sqrt{3} I_{fasa}$$

Pada sistem tiga fasa hubungan Δ , daya total pada keseluruhan fasa adalah penjumlahan daya pada tiap fasa. Sehingga secara sederhana pada sistem tiga fasa yang seimbang, daya aktif yang diserap oleh beban tiga fasa dengan perbedaan sudut antara tegangan dan arus sebesar φ adalah sebagai berikut :

$$P_{fasa} = V_{fasa} \times I_{fasa} \times \cos\varphi$$

$$P_{total} = 3 \times V_{fasa} \times I_{fasa} \times \cos\varphi$$

Untuk hubungan Y, karena besar tegangan *line* adalah $\sqrt{3} V_{fasa}$, maka besar daya yang diserap oleh beban tiga fasa adalah :

$$P_{fasa} = \frac{V_{line}}{\sqrt{3}} \times I_{line} \times \cos\phi$$

$$P_{total} = \sqrt{3} \times V_{line} \times I_{line} \times \cos\phi$$

2.2 Sistem Kelistrikan *Microgrid*

Microgrid atau jaringan kelistrikan mikro merupakan suatu bentuk kelistrikan yang banyak dikembangkan, karena mampu mengurangi rugi-rugi transmisi. Semakin lama beban akan semakin naik maka rugi-rugi saluran transmisi semakin besar dan salah satu solusinya adalah dengan pembangkitan tersebar seperti yang ada pada jaringan *microgrid*.

Selain itu tingkat kehandalan juga akan semakin naik dengan adanya suatu jaringan kelistrikan mikro yang tersebar. Ditambah lagi dengan jaringan *microgrid* ini memanfaatkan sumber energi terbarukan untuk menambah pembangkit dalam mensupply kebutuhan beban sehingga dapat mengurangi biaya pembangkitan.

2.2.1 Pembangkitan *Microgrid*

Perbedaan jaringan *microgrid* dengan kelistrikan konvensional yang menonjol adalah pembangkitan listriknya. *Microgrid* menggunakan teknologi dengan memanfaatkan sumber energi terbarukan. Teknologi pembangkitan *microgrid* diantaranya yaitu *photovoltaic* (PV), turbin angin (*wind turbine*), *fuel cel*, *micro turbine* dan baterai serta diesel generator sebagai *backup* saat beban naik. Berikut adalah pembangkit yang digunakan pada tugas akhir ini :

2.2.1.1 *Photovoltaic*

Photovoltaic (PV) merupakan pembangkit sumber energi terbarukan yang mampu merubah cahaya sinar matahari menjadi energi listrik. Dengan kata lain, PV adalah teknologi berdasarkan semikonduktor dalam kondisi padat yang mengkonversi energi cahaya matahari secara langsung menjadi energi listrik, tanpa ada bagian yang berputar, tidak mengeluarkan gas buangan, PV juga merupakan pembangkit yang sangat menarik dan cocok digunakan untuk pembangkit pada jaringan distribusi perkotaan dikarenakan ukurannya yang relatif kecil dan tidak ada kebisingan saat dioperasikan.

Karakteristik dari PV pada saat beroperasi tidak selalu sama dengan kondisi standar (1000 W/m^2 , suhu sel 25°C) maka pengaruh radiasi dan suhu akan mempengaruhi karakteristik PV. Pengaruh intensitas matahari dimodelkan dengan mempertimbangkan output daya dari modul sel surya yang akan sebanding dengan radiasinya. Modul sel surya diuji dalam *Standard Test Condition (STC)*. Daya keluaran dari modul sel surya dapat dihitung menggunakan persamaan sebagai berikut

$$P_{PV} = M \left\{ P_{STC} \frac{G_{ING}}{G_{STC}} (1 + k (T_C - T_r)) \right\}$$

dimana :

P_{PV} adalah daya keluaran dari modul saat radiasi G_{ING} (W)

P_{STC} adalah daya maksimum modul saat STC (W)

G_{ING} adalah radiasi aktual (W/m^2)

G_{STC} adalah radiasi saat STC (1000 W/m^2)

M adalah jumlah modul PV

k adalah koefisien suhu untuk daya modul dalam $\%/^\circ\text{C}$

T_C adalah suhu sel dalam $^\circ\text{C}$

T_r adalah referensi suhu (25°C)

Dalam tugas akhir ini, digunakan modul sel surya SOLAREX MSX-83. Karakteristik dari modul ini yaitu:

Daya maksimum saat STC (P_{STC}) = 83 W

Tegangan saat daya maksimum = 17.1 V

Arus saat daya maksimum = 4.85 A

Arus *short-circuit* saat STC = 5.27 A

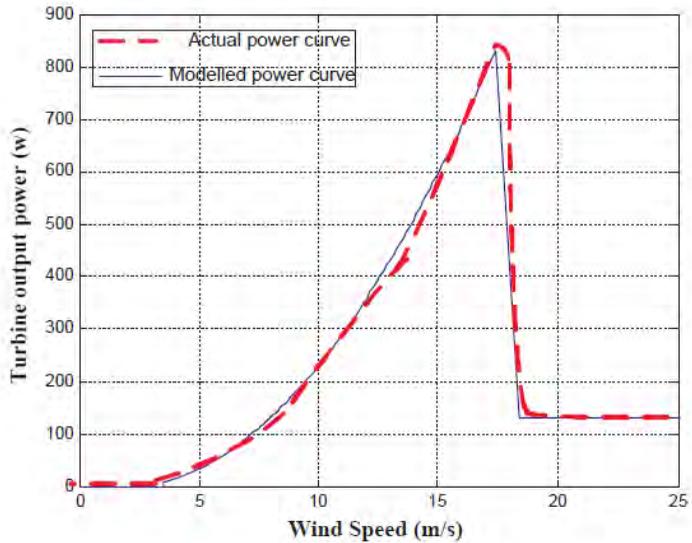
Tegangan *open-circuit* saat STC = 21.2 V

Koefisien suhu untuk daya (k) = -0.5

2.2.1.2 Turbin Angin (*Wind Turbine*)

Pembangkit turbin angin merupakan suatu sistem yang mengubah angin menjadi energi listrik. Angin yang berhembus akan menggerakkan kipas yang di kopel dengan generator, sehingga menghasilkan energi listrik. Dalam permodelan turbin angin, terdapat dua hal penting yang harus diperhitungkan yaitu ketersediaan angin dan kurva daya dari turbin angin itu sendiri. Keluaran daya dari turbin angin merupakan fungsi dari kecepatan angin. Untuk memodelkan performansi dari turbin angin, kurva daya harus diperoleh.

Dalam tugas akhir ini, digunakan turbin angin AIR403. Kurva daya dari turbin angin ini adalah sebagai berikut:



Gambar 2.5 Kurva daya aktual dan modelnya dari AIR403

Dari model kurva daya tersebut, dapat diperoleh persamaan sebagai berikut :

$$\begin{aligned}
 P_{WT} &= 0, & V_{ac} &< V_{ci} \\
 P_{WT} &= aV_{ac}^2 + bV_{ac} + c, & V_{ci} &\leq V_{ac} < V_r \\
 P_{WT,r} &= 130, & V_r &\leq V_{ac} > V_{co} \\
 P_{WT} &= J \times P_{WT}
 \end{aligned}$$

dimana :

- P_{WT} adalah daya keluaran dari turbin angin (W)
- $P_{WT,r}$ adalah rating daya (W)
- J adalah jumlah turbin angin terpasang
- V_{ci} adalah kecepatan cut-in (m/s)
- V_{co} adalah kecepatan cut-out (m/s)
- V_r adalah rating kecepatan angin (m/s)
- V_{ac} adalah kecepatan angin aktual (m/s)

Untuk memodelkan performansi dari turbin angin, persamaan matematis dari kurva daya harus diperoleh. Berdasarkan kurva diatas, didapatkan parameter sebagai berikut:

$$\begin{aligned} a &= 3.4 \\ b &= -12 \\ c &= 9.2 \\ P_{wt,r} &= 130 \\ V_{ci} &= 3.5 \\ V_{co} &= 18 \\ V_r &= 17.5 \end{aligned}$$

2.2.1.3 Diesel Generator

Diesel generator merupakan pembangkit yang sudah dikembangkan lebih dari 100 tahun yang lalu. Pembangkit ini menggunakan bahan bakar fosil yang artinya bukan termasuk pada pembangkit energi terbarukan. Sehingga pada jaringan *microgrid* ini, diesel generator akan dinyalakan terakhir pada saat tidak ada *renewable energy* dan atau pembangkitan dari *renewable* kurang untuk menanggung beban. Meski begitu pembangkit ini banyak digunakan karena memiliki instalasi yang mudah dan keandalan yang tinggi.

Diesel generator adalah jenis yang paling umum digunakan dalam teknologi *microgrid* saat ini. Biaya operasi dari sistem dapat dinyatakan sebagai fungsi daya keluaran dan dapat dimodelkan dengan polinomial kuadrat. Biaya operasi untuk diesel generator adalah sebagai berikut :

$$CF(P_{DG}) = (a + b P_{DG} + c P_{DG}^2) * R$$

dimana :

$CF(P_{DG})$ adalah total biaya operasi diesel generator (R/h)

R adalah harga bahan bakar (Rupiah/liter)

$a, b,$ dan c adalah koefisien diesel generator

P_{DG} adalah keluaran daya dari diesel generator (kW)

2.2.1.4 Baterai

Sebuah media penyimpan energi pada sistem kelistrikan *microgrid* merupakan bagian utama karena sifat dari energi terbarukan yang berubah-ubah dan tidak menentu, tetapi sering dilupakan rugi-rugi

tentang umur baterainya. Padahal biaya yang dikeluarkan untuk intalasi baterai cukup mahal. Sehingga keawetan dari baterai merupakan hal yang penting untuk dilakukan optimasi.

Strategi yang dilakukan untuk melakukan penghematan adalah mengatur penggunaan baterainya, hal tersebut juga akan berimbas pada kerja sistem kelistrikan secara keseluruhan. Pada setiap waktu *state of charge* (SOC) dari baterai harus memenuhi persyaratan berikut :

$$SOC_{min} \leq SOC \leq SOC_{max}$$

Dimana SOC_{max} adalah batas atas yang diperbolehkan dari kapasitas baterai, dan SOC_{min} adalah batas minimal dari kapasitas baterai.

$$P_{cha_max} \leq P_{bat} \leq P_{discha_max}$$

Dimana P_{cha_max} adalah daya maksimum yang diperbolehkan pada saat *charging* baterai dan P_{discha_max} adalah daya maksimum yang diperbolehkan pada saat baterai *discharging*. Sedangkan P_{bat} merupakan daya baterai, dimana P_{bat} akan bernilai positif saat *discharging* dan bernilai negatif pada saat *charging*.

Besar nilai SOC pada waktu tertentu ditentukan oleh SOC awal dan daya baterai selama periode tersebut. Secara matematis ditunjukkan seperti berikut :

$$SOC_{(t+\Delta t)} = SOC_t - P_{bat} \times \frac{\Delta t}{C_{bat}}$$

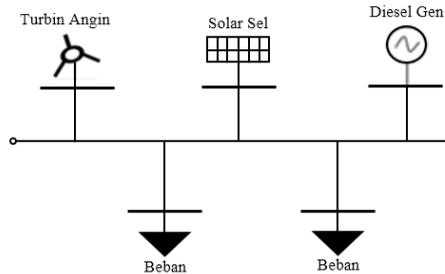
P_{bat-t} adalah daya baterai selama waktu t sampai dengan $(t + \Delta t)$ dan C_{bat} adalah kapasitas dari baterai yang digunakan. Nilai SOC harus berada diantara nilai minimum dan maksimumnya.

2.2.2 Mode Operasi *Microgrid*

Pada sistem kelistrikan microgrid ada dua mode operasi yang umum digunakan, yakni operasi *Stand-alone(Off grid)* dan *Grid connected (On Grid)*. Dimana kedua mode tersebut dapat diuraikan sebagai berikut :

2.2.2.1 Stand-alone (Off Grid)

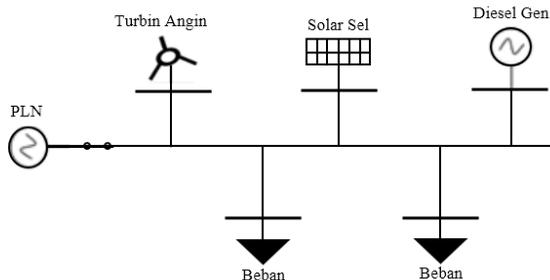
Mode operasi *Stand-alone microgrid (Off Grid)* merupakan mode operasi dimana sistem kelistrikan tidak terhubung pada main grid (PLN). Pembangkit yang ada beroperasi secara mandiri dalam memenuhi kebutuhan sistem. Mode operasi ini menekankan pada stabilitas sistem terutama frekuensi dan tegangan.



Gambar 2.6 Tipe *micro grid stand-alone*

2.2.2.2 Grid Connected (On Grid)

Mode operasi *Grid-connected* merupakan mode operasi dimana sistem terhubung ke main grid (PLN). Pembangkit yang ada beroperasi bersama dengan PLN dalam memenuhi kebutuhan sistem. Mode operasi ini menekankan pada minimisasi harga import dari *PCC (Point of Common Coupling)*, meningkatkan *power factor* di *PCC* dan optimisasi profil tegangan sistem.



Gambar 2.7 Tipe *grid-connected pada micro grid*

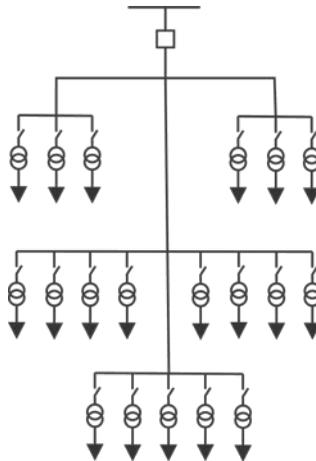
2.3 Jaringan Distribusi Radial

Jaringan distribusi radial adalah jaringan yang salurannya ditarik secara radial dari suatu titik sumber dan dicabang-cabang. Jenis jaringan ini digunakan jika antara titik sumber dan titik beban hanya memiliki satu saluran dan tidak ada alternatif jalur yang lain. Karena model sistem yang bercabang-cabang, maka Jaringan radial merupakan jenis jaringan yang paling sederhana dan banyak diterapkan pada saluran distribusi. Konduktor pada jaringan radial ukurannya tidak harus sama, karena arus yang mengalir di tiap bagian jaringan tidak sama. Saluran yang semakin dekat dengan titik sumber akan menanggung besar arus yang semakin besar. Sedangkan saluran yang dekat dengan ujung beban akan menanggung arus yang lebih kecil sehingga ukuran konduktornya akan lebih kecil.

Umumnya saluran distribusi merupakan saluran tiga fasa dengan lajur yang sama. Sehingga saluran untuk per fasa yang disalurkan ke beban bermula dari transformator distribusi. *Output* transformator (sisi sekunder) disalurkan ke beban dengan konfigurasi dan proporsi beban yang dibagi sedemikian rupa sehingga sistem tiga fasa tetap dalam kondisi seimbang. Namun pada prakteknya transformator distribusi selalu dalam keadaan tidak seimbang karena beban yang dilayani tiap fasa berubah-ubah secara dinamis dan tidak serempak. Sehingga dapat diketahui bahwa saluran distribusi memiliki faktor ketidakseimbangan beban yang cukup besar.

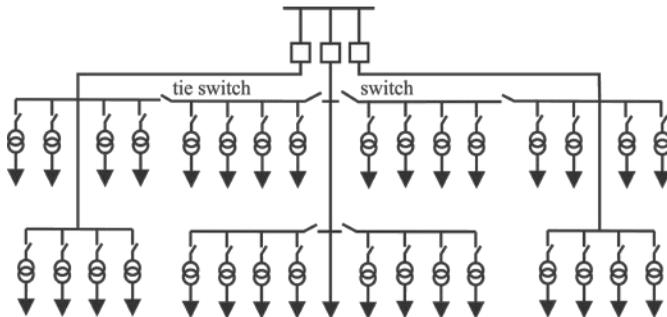
Beberapa keuntungan dari jaringan distribusi radial adalah bentuknya sederhana, serta biaya investasi yang lebih murah. Sedangkan beberapa kekurangannya adalah kualitas pelayanan daya yang lebih rendah karena besar drop tegangan yang relatif besar, serta tingkat kenadalan saluran yang rendah karena saluran hanya memiliki satu jalur suplai. Biasanya peralatan yang digunakan untuk melokalisir gangguan adalah fuse, sectionaliser, recloser, dan peralatan pengamanan yang lainnya yang fungsinya hanya untuk mencegah pemadaman total apabila terdapat gangguan pada salah satu daerah saluran. Beberapa tipe modifikasi jaringan distribusi radial adalah distribusi radial tipe pohon, radial dengan tie dan switch pemisah, radial dengan pusat beban, serta radial dengan pembagian fasa area.

Jaringan radial tipe pohon adalah jaringan radial dengan satu sumber yang melayani beban dengan jalur yang bercabang-cabang dengan model membentang pada node percabangannya.



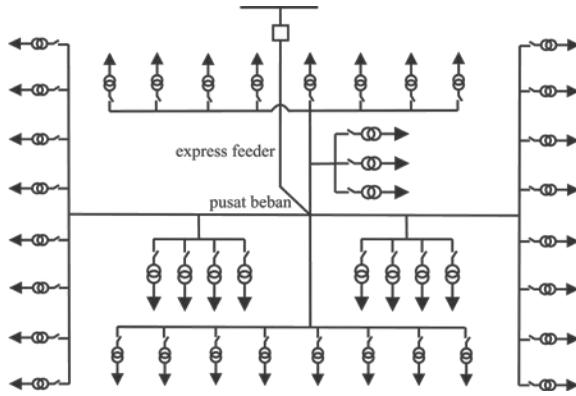
Gambar 2.8 Jaringan distribusi radial tipe pohon

Jaringan tipe radial dengan tie dan switch merupakan modifikasi dari bentuk jaringan radial dasar dengan menambahkan peralatan switch untuk meningkatkan keandalan sistem. Apabila terdapat gangguan pada suatu penyulang maka akan dilakukan manuver dengan menggunakan tie atau switch untuk memindahkan suplai beban ke penyulang yang lain.



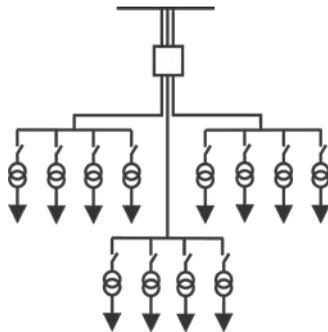
Gambar 2.9 jaringan distribusi radial tipe tie dan switch

Jaringan radial dengan tipe pusat beban adalah jaringan dengan penyulang langsung (*express feeder*) menuju ke titik tengah daerah beban. Kemudian di titik tengah, penyulang disebar dengan cabang-cabang tersebar menuju beban.



Gambar 2.10 jaringan distribusi radial pusat beban

Jaringan radial dengan fasa area merupakan model jaringan radial dengan penyulang masing-masing fasanya melayani beban yang berbeda jalur. Jenis jaringan ini dapat menimbulkan efek ketidakseimbangan yang besar bila ditempatkan pada daerah yang baru dan belum mantap pembagian bebannya. Sehingga jaringan dengan fasa area hanya cocok untuk daerah yang stabil penambahan atau pengaturan keseimbangan tiap fasanya.



Gambar 2.11 Jaringan distribusi radial dengan fasa area

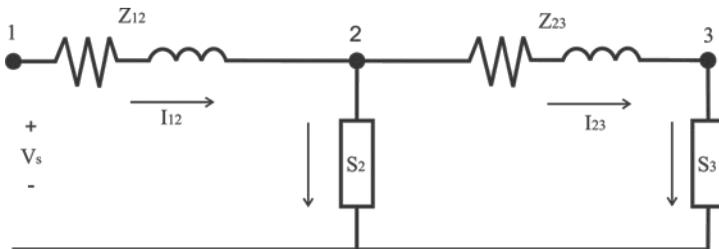
2.4 Analisis Aliran Daya

Sistem distribusi merupakan bagian penyaluran daya yang penting karena letaknya yang dekat dengan beban. Di bagian sistem

inilah beban dapat dipantau dan dilakukan pengaturan kuantitas dan kualitas daya yang dikirim. Untuk melakukan pemantauan, rekayasa, maupun desain suatu sistem distribusi harus dilaksanakan dengan tepat, dan akurat. Sehingga tentunya diperlukan analisis aliran daya sebelum melakukan analisis yang lebih lanjut. Dengan karakteristik khusus dan berbeda dengan saluran transmisi maka diperlukan analisis aliran daya yang tepat digunakan untuk saluran distribusi. Beberapa penelitian dan pengembangan pemodelan matematis saluran distribusi dikenal beberapa metode analisis aliran daya pada saluran distribusi. Salah satu metode yang banyak digunakan dan dikembangkan adalah metode *forward-backward*.

Metode *forward-backward* merupakan metode analisis aliran daya dengan menggunakan prinsip hukum Kirchoff. Metode *forward-backward* tersiri dari dua langkah perhitungan dalam menghitung nilai tegangan yang pasti dalam sistem distribusi radial. Langkah yang pertama adalah menghitung besar arus yang mengalir pada cabang dimulai dari beban terujung hingga menuju *infinite bus*. Langkah ini disebut dengan metode *forward*. Kemudian arus yang mengalir di tiap cabang dikalikan dengan impedansi saluran untuk mendapatkan besar drop tegangan. Dengan melakukan perhitungan drop tegangan pada tiap saluran dan cabang sistem distribusi radial tersebut, tegangan pada tiap bus transformator distribusi dapat diketahui.

Berikut adalah contoh sederhana perhitungan analisis aliran daya sederhana menggunakan metode *forward-backward*.



Gambar 2.12 Contoh Rangkaian Analisis Aliran Daya *forward-backward*

Diketahui suatu rangkaian listrik dengan tegangan sumber $V_s = 7200V$ impedansi saluran adalah :

$$Z_{12} = 0.1705 + j0.3490 \Omega$$

$$Z_{23} = 0.2273 + j0.4545 \Omega$$

Data beban :

$$S_2 = 1500kW + j750 kVAR$$

$$S_3 = 900kW + j500 kVAR$$

Langkah pertama yang dilakukan adalah dengan menghitung arus yang mengalir pada tiap cabang, dengan asumsi awal tegangan di ujung titik paralel adalah sama dengan tegangan sumber.

$$I_3 = \left(\frac{S_3}{V_3} \right)^*$$

$$I_3 = \left(\frac{(900 + j500) \cdot 1000}{7200 \angle 0^\circ} \right)^*$$

$$I_3 = \left(\frac{1029563,014 \angle 29,5^\circ}{7200 \angle 0^\circ} \right)^*$$

$$I_3 = (142,995 \angle 29,05^\circ)^*$$

$$I_3 = 142,995 \angle - 29,05^\circ$$

Karena I_3 mengalir pada cabang paralel paling ujung, maka nilainya sama dengan I_{23} . Kemudian hitung tegangan pada V_2 dengan menghitung besar drop tegangan di Z_{23} .

$$V_2 = V_3 + Z_{23} \cdot I_{23}$$

$$V_2 = 7200 \angle 0^\circ + (0,2273 + j0,4545) \cdot 143 \angle - 29,05^\circ$$

$$V_2 = 7260,1 \angle 0,32^\circ$$

Langkah berikutnya adalah menghitung arus I_2 .

$$I_2 = \left(\frac{S_2}{V_2} \right)^*$$

$$I_2 = \left(\frac{(1500 + j750) \cdot 1000}{7260,1 \angle 0,32^\circ} \right)^*$$

$$I_2 = (231,0 \angle 26,3^\circ)^*$$

$$I_2 = 231,0 \angle - 26,3^\circ$$

Arus I_{12} dapat dihitung dengan menjumlahkan arus yang mengalir di seluruh cabang.

$$I_{12} = I_{23} + I_2$$

$$I_{12} = 143,0\angle -29,5^\circ + 231,0\angle -26,3^\circ$$

$$I_{12} = (125,01 + j69,437) + (207,088 + j102,399)$$

$$I_{12} = (332,098 - j171,836)$$

$$I_{12} = 373,92\angle -27,36^\circ$$

Kemudian dapat dihitung arus pada titik sumber.

$$V_1 = V_2 + Z_{12} \cdot I_{12}$$

$$V_1 = 7260,1\angle 0,32^\circ + (0,1705 + j0,3409) \cdot 373,9\angle -26,3^\circ$$

$$V_1 = 7260,1\angle 0,32^\circ + (0,381\angle 63,43^\circ) \cdot 373,9\angle -26,3^\circ$$

$$V_1 = 7260,1\angle 0,32^\circ + 142,46\angle 37,13^\circ$$

$$V_1 = 7373,58 + j126,55$$

$$V_1 = 7374,67\angle 0,983^\circ$$

Untuk melakukan cek konvergensi perhitungan, maka dapat dilakukan perhitungan error.

$$Error = ||V_1| - |V_s||$$

$$Error = ||7374,67| - |7200||$$

$$Error = 174,67 \quad (\text{biasanya toleransi error adalah } 0,0001)$$

Setelah dilakukan perhitungan tegangan, kemudian dilanjutkan dengan langkah analisis berikutnya yaitu metode *backward*. Dengan menghitung kembali besar drop tegangan dengan menggunakan arus yang didapat dari perhitungan *forward*. Perhitungan awal dimulai dengan menghitung tegangan pada titik paralel pertama yaitu V_2 .

$$V_2 = V_s + Z_{12} \cdot I_{12}$$

$$V_2 = 7200\angle 0^\circ + (0,1705 + j0,3409) \cdot 373,9\angle -26,3^\circ$$

$$V_2 = 7085,4\angle - 0,68^\circ$$

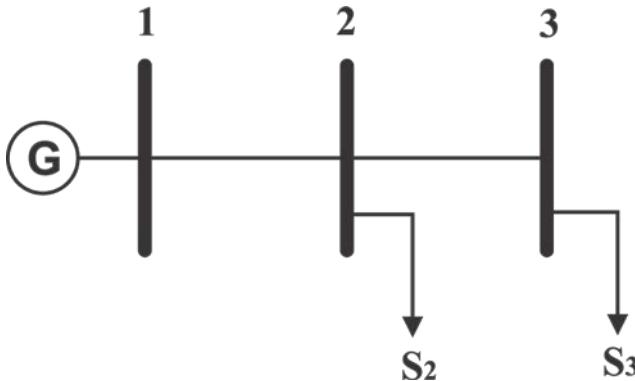
Setelah didapatkan nilai V_2 kemudian hitung nilai V_3 .

$$V_3 = V_2 + Z_{23} \cdot I_{23}$$

$$V_3 = 7085,4\angle - 0,68^\circ - (0,2273 + j0,4545) \cdot 143\angle - 29,5^\circ$$

$$V_3 = 7026,1\angle - 1,02^\circ$$

Setelah dilakukan kedua langkah di atas, proses perhitungan diulang hingga error perhitungan kurang dari nilai toleransi. Dalam sistem tenaga listrik, perhitungan rangkaian di atas dapat digambarkan menggunakan single line diagram sebagai berikut :



Gambar 2.13 Single line diagram contoh analisis forward-backward

2.5 Conservation Voltage Reduction (CVR)

Conservation Voltage Reduction (CVR) merupakan suatu metode yang ditujukan untuk menghemat konsumsi energi, dengan cara menurunkan level tegangan pada sistem distribusi tenaga listrik. Efektifitas CVR sangat bergantung pada jenis peralatan listrik yang terpasang. Berbagai macam jenis peralatan listrik dapat dibagi menjadi empat kategori beban, yaitu:

1. *Constant-resistant load*: Mengurangi konsumsi energi baik dari sisi beban maupun sisi saluran.
2. *Constant-energy load*: Merupakan *Constant-resistant load* yang dilengkapi dengan *feedback loop*. Kategori ini memiliki sifat mengkonsumsi energi secara konstan.
3. *Constant-power load*: Penggunaan CVR pada *Constant-power load* akan menambah konsumsi daya, dikarenakan meningkatnya nilai rugi-rugi saluran yang disebabkan oleh naiknya arus saluran akibat diturunkannya level tegangan.
4. *Constant-current load*: Mengurangi konsumsi energi listrik dari sisi beban saja, sedangkan untuk konsumsi energi pada saluran bernilai konstan, dikarenakan nilai arus tetap konstan berapapun level tegangan diturunkan.

2.5.1 CVR factor

CVR factor merupakan salah satu cara untuk mengetahui efektifitas penurunan tegangan dalam menurunkan konsumsi energi maupun konsumsi daya reaktif. CVR factor untuk daya aktif dan daya reaktif dirumuskan sebagai berikut:

$$CVR\ factor_{real} = \frac{\%KWh\ saving}{\%Voltage\ reduction}$$

$$CVR\ factor_{real} = \frac{\%KVAR\ saving}{\%Voltage\ reduction}$$

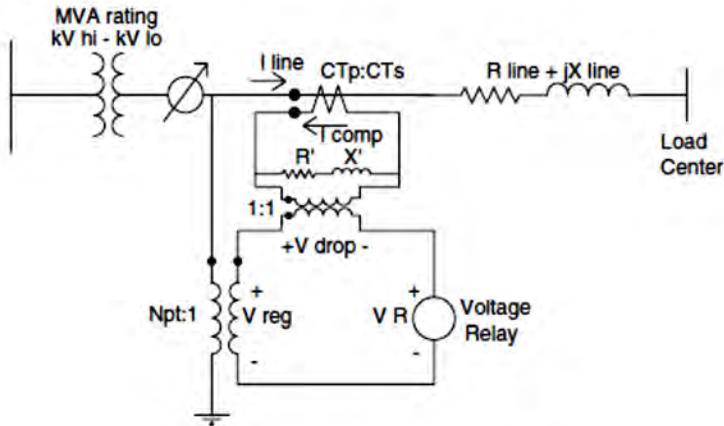
2.6 Line Drop Compensation (LDC)

Line Drop Compensation (LDC) merupakan salah satu metode implementasi dari CVR. Fungsi utama dari LDC yaitu untuk memodelkan *voltage drop* pada saluran distribusi, mulai dari transformator hingga pusat beban. *Compensator input voltage* pada umumnya bernilai 120 volts, dimana akan membutuhkan sebuah transformator tegangan untuk menurunkan level tegangan ke 120 volts.

Pada compensator circuit, setting yang paling kritikal yaitu R' dan X' yang terukur dalam volts. Nilai parameter tersebut harus dapat mewakili nilai impedansi ekivalen dari transformator hingga pusat beban. Salah satu syarat yang harus dipenuhi agar impedansi ekivalen dan impedansi compensator bernilai sama, yaitu nilai per-unit impedansi saluran harus sama dengan nilai per-unit impedansi compensator. Untuk memenuhi agar syarat tersebut terpenuhi diperlukan nilai yang konsisten pada *base values*. Berikut merupakan persamaan yang digunakan untuk mendapatkan nilai yang konsisten pada *base values*.

Tabel 2.2 Table of Base Values

Base	Line Circuit	Compensator Circuit
Tegangan	V_{LN}	$\frac{V_{LN}}{N_{PT}}$
Arus	CT_P	CT_S
Impedansi	$Z_{base_{line}} = \frac{V_{LN}}{CT_P}$	$Z_{base_{comp}} = \frac{V_{LN}}{N_{PT} \cdot CT_S}$



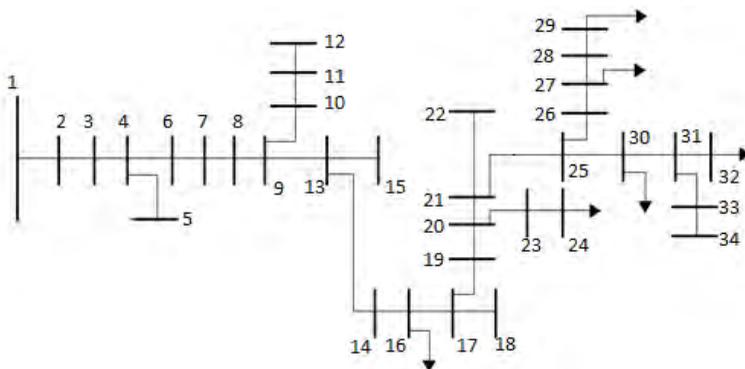
Gambar 2.14 Line Drop Compensator Circuit

BAB 3

PENERAPAN METODE CVR DENGAN LDC PADA JARINGAN DISTRIBUSI MICROGRID IEEE 34 BUS

3.1 IEEE 34 Bus Radial Distribution Feeder

IEEE 34 Bus Radial Distribution Feeder menggunakan sistem 50Hz, 20KV, 12MVA, dengan berbagai macam jenis beban yang terhubung ke *substation* utama. Berbagai jenis beban tersebut meliputi *Constant-Resistance Load*, *Constant-Power Load*, dan *Constant-Current Load*. Keseluruhan konfigurasi ditunjukkan pada gambar berikut:



Gambar 3.1 Konfigurasi *IEEE 34 Bus Radial Distribution Feeder*

Berikut informasi tentang data impedansi saluran dan data beban dalam Konfigurasi *IEEE 34 Bus Radial Distribution Feeder*

Tabel 3.1 *Overhead Line Configuration*

Configuration	Z (R +jX) in ohms per mile
300	1.3368 + j1.3343
301	1.9300 + j1.4115
302	2.7995 + j1.4855
303	2.7995 + j1.4855
304	1.9217 + j1.4212

Tabel 3.2 *Line Segment Data*

Node A	Node B	Length (ft)	Configuration
1	2	2580	300
2	3	1730	300
3	4	32230	300
4	5	5804	303
4	6	37500	300
6	7	29730	300
7	8	10	301
9	10	1710	302
9	13	10210	301
10	11	48150	302
11	12	13740	302
13	15	3030	303
13	14	840	301
14	16	20440	301
16	17	520	301
20	21	4900	301
20	23	209	300
25	30	2020	301
25	26	280	301
31	32	860	301
31	33	280	301
26	27	1350	301
27	28	3640	301
28	29	530	301
8	9	310	301
19	20	10	301
17	18	23330	303
17	19	36830	301
21	22	1620	302
21	25	5830	301
30	31	2680	301

Tabel 3.2 *Line Segment Data* (Lanjutan)

Node A	Node B	Length (ft)	Configuration
33	34	4860	304
23	24	10560	300

Tabel 3.3 *Spot Load Data*

Bus	Load Model	Ph-1	Ph-1	Ph-2	Ph-2	Ph-3	Ph-3
		kW	kVAr	kW	kVAr	kW	kVAr
30	3	20	16	20	16	20	16
32	2	9	7	9	7	9	7
27	3	135	105	135	105	135	105
29	1	20	16	20	16	20	16
24	1	150	75	150	75	150	75
16	2	10	5	10	5	10	5
Total		344	224	344	224	344	224

❖ Keterangan (*load model*) :

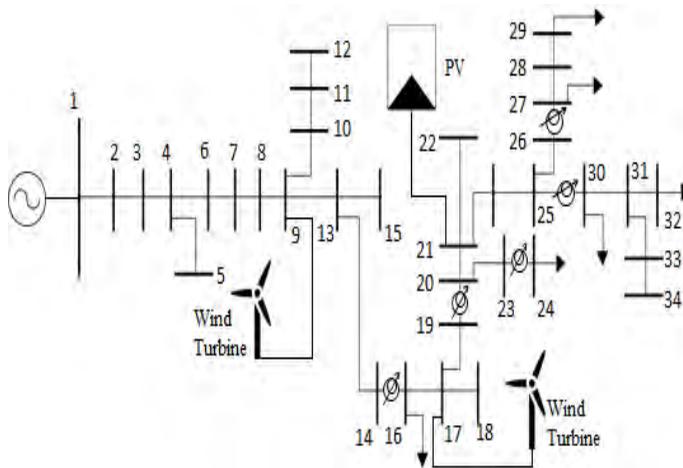
1. *Constant Power Load*
2. *Constant Current Load*
3. *Constant Impedance Load*

3.1.2 IEEE 34 Bus Microgrid Radial Distribution Feeder

IEEE 34 bus microgrid radial distribution feeder terhubung dengan *distributed generator* (DG) berupa *photovoltaic* (PV), dan 2 *wind turbines*. Berikut data dan konfigurasi sistem *IEEE 34 bus microgrid radial distribution feeder* :

Tabel 3.4 *Distributed Generator Data*

Bus	Type DG	Active Power (MW)	Reactive Power (MVAR)
9	<i>Wind Turbine</i>	0.04	0.005
17	<i>Wind Turbine</i>	0.01	0.075
22	<i>Photovoltaics</i>	0.04	0.144



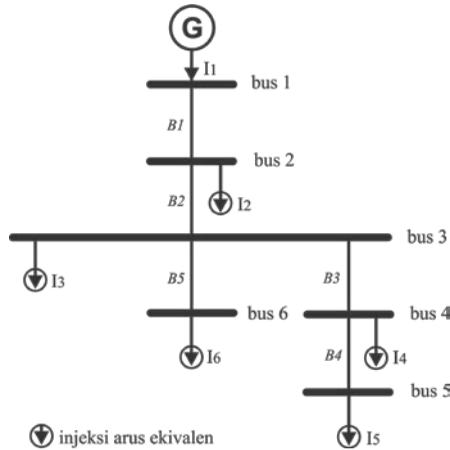
Gambar 3.2 Konfigurasi *IEEE 34 Bus Microgrid Radial Distribution Feeder*

3.2 Metode *forward-backward*

Dalam perkembangan analisis aliran daya pada sistem distribusi menggunakan metode *forward-backward*, terdapat beberapa pengembangan yang telah dilakukan untuk menambah kekakuratan, kemudahan dan kecepatan perhitungan analisis. Terutama untuk dapat mengakomodir sistem tiga fasa dalam keadaan tidak seimbang, maka perlu adanya rekayasa perhitungan secara matematik menggunakan beberapa cara kalkulasi dan pemodelan sistem.

3.2.1 Metode Z_{BR}

Untuk melakukan analisis aliran daya sistem distribusi dengan sistem yang kompleks menggunakan metode *forward-backward*, diperlukan modifikasi perhitungan untuk memudahkan proses iterasi dan membentuk persamaan. Salah satu metode yang dikembangkan adalah metode Z_{BR} . Metode Z_{BR} adalah metode yang digunakan untuk membentuk persamaan aliran daya dengan menyusun impedansi saluran distribusi radial dalam suatu matrik untuk menghitung drop tegangan. Sebelum membentuk matrik Z_{BR} , digunakan metode *network topology* untuk mendapatkan persamaan analisis aliran daya. Salah satu contoh pembentukan persamaan aliran daya adalah sebagai berikut :



Gambar 3.3 *Single line diagram* contoh analisis menggunakan metode *network topology*

Sebuah sistem distribusi sederhana dengan model rangkaian radial murni disuplai dari satu sumber pada *infinite bus* menyuplai beban yang tersebar dengan jalur tertentu. Maka didapatkan persamaan sederhana sebagai berikut :

$$B_5 = I_6$$

$$B_4 = I_5$$

$$B_3 = I_4 + I_5$$

$$B_2 = I_3 + I_4 + I_5 + I_6$$

$$B_1 = I_2 + I_3 + I_4 + I_5 + I_6$$

Persamaan injeksi arus ke bus di atas dapat diringkas perhitungan selanjutnya dengan menggunakan matrik.

$$\begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \\ B_3 \\ B_4 \\ B_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \\ I_4 \\ I_5 \end{bmatrix}$$

Persamaan matrik di atas dapat dirumuskan menjadi model persamaan dengan komponen matrik BIBC (*Bus Injection to Branch Current*).

$$[B] = [BIBC][I]$$

Kemudian dibentuk persamaan untuk mencari nilai drop tegangan berdasarkan jalur injeksi arusnya.

$$V_2 = V_1 - B_1 \cdot Z_{12}$$

$$V_3 = V_1 - B_1 \cdot Z_{12} - B_2 \cdot Z_{23}$$

$$V_4 = V_1 - B_1 \cdot Z_{12} - B_2 \cdot Z_{23} - B_3 \cdot Z_{34}$$

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

$$V_6 = V_1 - B_1 \cdot Z_{12} - B_2 \cdot Z_{23} - B_3 \cdot Z_{34} - B_4 \cdot Z_{45} - B_5 \cdot Z_{26}$$

Maka drop tegangan dapat dihitung menjadi sebagai berikut :

$$V_1 - V_2 = B_1 \cdot Z_{12}$$

$$V_1 - V_3 = B_1 \cdot Z_{12} - B_2 \cdot Z_{23}$$

$$V_1 - V_4 = B_1 \cdot Z_{12} - B_2 \cdot Z_{23} - B_3 \cdot Z_{34}$$

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

$$V_1 - V_6 = B_1 \cdot Z_{12} - B_2 \cdot Z_{23} - B_3 \cdot Z_{34} - B_4 \cdot Z_{45} - B_5 \cdot Z_{26}$$

Persamaan di atas dapat dibentuk dan diselesaikan menggunakan suatu bentuk matrik dengan komponen matrik BCBV (*Branch Current to Branch Voltage*).

$$\begin{bmatrix} V_1 - V_2 \\ V_1 - V_3 \\ V_1 - V_4 \\ V_1 - V_5 \\ V_1 - V_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{12} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ Z_{12} & Z_{23} & 0 & 0 & 0 \\ Z_{12} & Z_{23} & Z_{34} & 0 & 0 \\ Z_{12} & Z_{23} & Z_{34} & Z_{45} & 0 \\ Z_{12} & Z_{23} & 0 & 0 & Z_{36} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \\ B_3 \\ B_4 \\ B_5 \end{bmatrix}$$

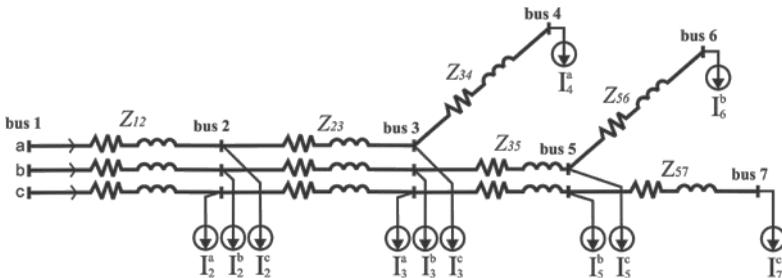
$$[\Delta V] = [BCBV][B]$$

Sehingga, untuk mendapatkan nilai ΔV didapatkan persamaan akhir sebagai berikut :

$$[\Delta V] = [BCBV][BIBC][I]$$

$$[\Delta V] = [DLF][I]$$

Untuk melakukan analisis aliran daya tiga fasa, persamaan disusun dengan langkah-langkah yang sama. Untuk metode Z_{BR} , cara menghitung drop tegangan dilakukan per fasa dengan mengubah dimensi matrik menjadi 3 kali lipat karena digunakan untuk menghitung 3 rangkaian fasa. Matrik Z_{BR} merupakan matrik yang merepresentasikan impedansi saluran tiga fasa yang dibentuk dengan menelusuri jalur arus mengalir ke beban dan dikonversikan ke dalam matrik sesuai dengan nilai impedansi.



Gambar 3.4 Contoh rangkaian 3 fasa untuk membentuk matrik z_{br}

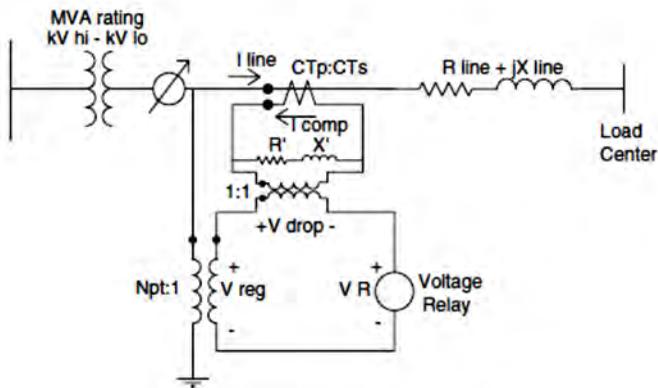
Dari contoh rangkaian 3 fasa di atas, dapat dibentuk matrik untuk menghitung injeksi arus menggunakan matrik BCBV.

$$Z_{BR} = \begin{bmatrix} \begin{bmatrix} Z_a & 0 & 0 \\ 0 & Z_b & 0 \\ 0 & 0 & Z_c \end{bmatrix} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \begin{bmatrix} Z_a & 0 & 0 \\ 0 & Z_b & 0 \\ 0 & 0 & Z_c \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} Z_a & 0 & 0 \\ 0 & Z_b & 0 \\ 0 & 0 & Z_c \end{bmatrix} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ [Z_a] & [Z_a] & [Z_a] & 0 & 0 & 0 \\ \begin{bmatrix} Z_b & 0 \\ 0 & Z_c \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} Z_b & 0 \\ 0 & Z_c \end{bmatrix} & 0 & \begin{bmatrix} Z_b & 0 \\ 0 & Z_c \end{bmatrix} & 0 & 0 \\ [Z_b] & [Z_b] & 0 & [Z_b] & [Z_b] & 0 \\ [Z_c] & [Z_c] & 0 & [Z_c] & 0 & [Z_c] \end{bmatrix}$$

3.3 Line Drop Compensation (LDC)

Line Drop Compensation (LDC) merupakan salah satu metode implementasi dari CVR. Fungsi utama dari LDC yaitu untuk memodelkan *voltage drop* pada saluran distribusi, mulai dari transformator hingga pusat beban. *Compensator input voltage* pada umumnya bernilai 120 volts, dimana akan membutuhkan sebuah transformator tegangan untuk menurunkan level tegangan ke 120 volts.

Pada kompensator circuit, setting yang paling kritikal yaitu R' dan X' yang terukur dalam volts. Nilai parameter tersebut harus dapat mewakili nilai impedansi ekivalen dari transformator hingga pusat beban. Salah satu syarat yang harus dipenuhi agar impedansi ekivalen dan impedansi kompensator bernilai sama, yaitu nilai per-unit impedansi saluran harus sama dengan nilai per-unit impedansi kompensator.



Gambar 3.5 *Line Drop Compensator Circuit*

Setting R' dan X' yang terukur dalam ohm dapat dicari menggunakan persamaan berikut :

$$R_{pu} + jX_{pu} = \frac{Rline_{\Omega} + jXline_{\Omega}}{Zbase_{line}}$$

$$R_{pu} + jX_{pu} = (Rline_{\Omega} + jXline_{\Omega}) \frac{CT_P}{V_{LN}}$$

Hasil per-unit R' dan X' pada saluran dan rangkaian kompensator harus bernilai sama. Impedansi rangkaian kompensator dalam ohm dapat dicari dengan mengalikan impedansi per-unit dengan base impedansi rangkaian kompensator.

$$R_{comp\Omega} + jX_{comp\Omega} = (R_{pu} + jX_{pu}) \cdot Z_{base_{comp}}$$

$$R_{comp\Omega} + jX_{comp\Omega} = (R_{line\Omega} + jX_{line\Omega}) \frac{CT_P}{V_{LN}} \frac{V_{LN}}{N_{PT} \cdot CT_S}$$

$$R_{comp\Omega} + jX_{comp\Omega} = (R_{line\Omega} + jX_{line\Omega}) \frac{CT_P}{N_{PT} \cdot CT_S} \quad \Omega$$

Setting R' dan X' dalam volt dapat diketahui dengan mengalikan R dan X rangkaian kompensator dalam ohm dengan rating arus sekunder pada trafo arus (CT_S)

$$R' + jX' = (R_{comp\Omega} + jX_{comp\Omega}) \cdot CT_S$$

$$R' + jX' = (R_{line\Omega} + jX_{line\Omega}) \frac{CT_P}{N_{PT} \cdot CT_S} \cdot CT_S$$

$$R' + jX' = (R_{line\Omega} + jX_{line\Omega}) \frac{CT_P}{N_{PT}} \quad V$$

3.4 Conservation Voltage Reduction (CVR)

Conservation Voltage Reduction merupakan suatu metode efisiensi energi yang bekerja dengan menurunkan level tegangan dalam suatu jaringan distribusi kelistrikan guna mengurangi konsumsi energi listrik. Efektifitas CVR sangat bergantung dari peralatan tenaga listrik yang digunakan oleh konsumen. Berikut adalah kategori peralatan tenaga listrik yang dibagi menjadi empat kategori beban :

- a) *Constant-Resistance Load* : Pada kategori ini CVR dapat mengurangi konsumsi energi listrik baik di sisi beban maupun pada sisi saluran. Berikut merupakan perhitungan konsumsi daya pada beban

$$P_{load} = \frac{V_{source}^2}{(R_{load} + R_{lines})^2} R_{load}$$

Sedangkan untuk mengetahui rugi-rugi daya pada saluran dan konsumsi daya total menggunakan persamaan

$$P_{lines} = \frac{V_{source}^2}{(R_{load} + R_{lines})^2} R_{lines}$$

$$P_{total} = \frac{V_{source}^2}{(R_{load} + R_{lines})}$$

- b) *Constant-Energy Load* : Kategori ini memiliki sifat mengkonsumsi energi secara konstan. Berapapun level tegangan yang digunakan pada jaringan distribusi tenaga listrik konsumsi energi di sisi beban akan sebanding dengan konsumsi energi tahunan. Dan rugi-rugi pada saluran dapat diketahui dengan persamaan

$$U_{lines} = \frac{U_{load} R_{lines}}{R_{load}}$$

- c) *Constant-Power Load* : Pada kategori ini penggunaan CVR hanya akan menambah konsumsi energi, karena dengan menurunkan level tegangan, maka arus saluran akan naik dan menyebabkan bertambahnya rugi-rugi daya pada saluran. Adapun untuk mengetahui konsumsi daya pada saluran menggunakan persamaan:

$$P_{lines} = \frac{(V_{source} - \sqrt{V_{source}^2 - 4P_{load}R_{lines}})^2}{4R_{lines}}$$

- d) *Constant-Current Load* : Pada kategori ini CVR hanya mampu mengurangi konsumsi energi pada sisi beban saja. Untuk konsumsi daya pada beban dan konsumsi daya total dapat diketahui dengan persamaan:

$$P_{total} = V_{source} I$$

$$P_{load} = P_{total} - P_{lines}$$

3.4.1 CVR factor

CVR factor digunakan untuk mengetahui seberapa efektif penurunan level tegangan dalam menghemat konsumsi energi listrik, baik daya aktif maupun daya reaktif. *CVR factor* dapat didapatkan melalui persamaan berikut:

$$CVR_f = \frac{\%KWh\ saving}{\%Voltage\ reduction}$$

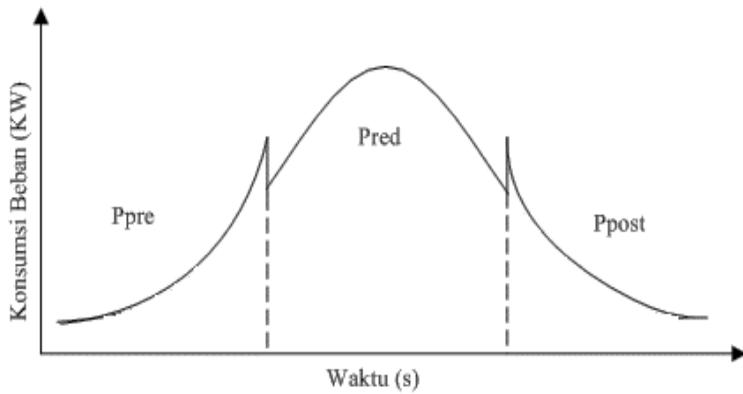
$$CVR_f = \frac{(P_{cvroff} - P_{cvron})/P_{cvroff}}{(V_{cvroff} - V_{cvron})/V_{cvroff}}$$

Kebutuhan beban puncak akan menurun dengan menggunakan CVR. Data pengujian bisa di bagi menjadi 3 bagian yaitu Ppre, Pred, Ppost. Pre dan Ppost secara berurutan adalah daya sebelum dan sesudah dilakukan reduksi tegangan, sedangkan Pred adalah daya yang didapatkan dengan mengimplementasikan CVR. Hasil pengujian yang umum ditunjukkan pada gambar 3.2, terjadi penurunan konsumsi daya akibat penerapan CVR.

CVR sangat efektif untuk tipe beban resistansi atau arus konstan. Dimana persamaan perhitungan daya total, yaitu daya beban dan rugi daya pada jaringan dapat dirumuskan pada persamaan 1 dan 2. Persamaan 1 untuk tipe beban resistansi konstan dan untuk persamaan 2 untuk tipe beban arus konstan.

$$P_{tot} = \frac{V_{source}^2}{R_{load} + R_{line}}$$

$$P_{tot} = V_{source} \times I$$



Gambar 3.6 Perubahan Daya Saat Implementasi CVR

BAB 4 SIMULASI DAN ANALISIS

4.1 Analisis Aliran Daya pada Sistem Distribusi *Microgrid* IEEE 34 Bus

Sistem distribusi *microgrid* IEEE 34 bus memiliki konfigurasi penyulang radial 3 fasa penuh tiap bus yang disuplai dari beberapa *distributed generator*. Analisis aliran daya dilakukan menggunakan program *Matlab*, dan dijalankan untuk mendapatkan parameter arus dan tegangan bus yang akan digunakan dalam menentukan parameter-parameter dalam rangkaian kompensator serta menghitung nilai *CVR factor* pada setiap bus beban. Langkah pertama yang dilakukan untuk melakukan analisis aliran daya menggunakan metode K-matrik adalah melakukan penelusuran jalur fasa saluran distribusi. Berikut hasil analisis aliran daya secara detail :

Tabel 4.1 Hasil analisis aliran daya sistem distribusi *microgrid* IEEE 34 bus

Bus	Tegangan		Arus	
	Magnitude (kV)	Sudut	Magnitude (A)	Sudut
1	20.000	0	14.9054	-14.6957
2	19.9919	-0.023454	12.4489	0.4929
3	19.9865	-0.039194	12.4489	0.4929
4	19.8862	-0.333970	12.4489	0.4929
5	19.8862	-0.333970	0	0
6	19.7700	-0.680699	12.4489	
7	19.6785	-0.958485	12.4489	0.4929
8	19.6785	-0.958587	12.4489	0.4929
9	19.6771	-0.961695	12.4489	0.4929
10	19.6771	-0.961695	0	0
11	19.6771	-0.961695	0	0
12	19.6771	-0.961695	0	0
13	19.6233	-1.077746	14.4778	-0.7167
14	19.6188	-1.087324	14.4778	-0.7167
15	19.6233	-1.077746	0	0
16	19.5114	-1.325934	14.4778	-0.7167
17	19.5088	-1.331867	13.9949	0.3031
18	19.5088	-1.331867	0	0
19	20.0045	-1.560088	14.9054	-14.6957
20	20.0045	-1.560165	14.9054	-14.6957
21	19.9917	-1.587296	7.8120	-1.2962

Tabel 4.1 Hasil analisis aliran daya sistem distribusi *microgrid* IEEE 34 bus (Lanjutan)

Bus	Tegangan		Arus	
	Magnitude (kV)	Sudut	Magnitude (A)	Sudut
22	19.9917	-1.587296	0	0
23	20.0040	-1.560191	8.0919	-26.5651
24	19.9753	-1.590082	8.0919	-26.5651
25	19.9609	-1.584539	11.6482	-39.5570
26	19.9597	-1.584429	9.8152	-39.5615
27	19.9537	-1.583888	9.8152	-39.5615
28	19.9516	-1.583625	1.2838	-40.2434
29	19.9513	-1.583587	1.2838	-40.2434
30	19.9592	-1.584390	1.8331	-39.5333
31	19.9586	-1.584387	0.5501	-37.8750
32	19.9584	-1.584385	0.5501	-37.8750
33	19.9586	-1.584387	0	0
34	19.9586	-1.584387	0	0

4.2 Parameter Rangkaian Kompensator (LDC)

Rangkaian kompensator merupakan rangkaian analog yang berfungsi untuk memodelkan saluran tenaga listrik. Dalam memodelkan saluran tenaga listrik diperlukan parameter-parameter seperti CTp, CTs, Npt, R' dan X'. Nilai dari parameter-parameter tersebut sangat berpengaruh terhadap pemodelan saluran tenaga listrik yang akan dimodelkan oleh rangkaian kompensator.

4.2.1 Parameter Rangkaian Kompensator Trafo 1

Trafo 1 memiliki rating 2500 KVA, 3 fasa, *Wye-Wye Grounded*, yang diletakkan pada saluran antara bus 14 dan bus 16, dengan impedansi saluran sebesar $7.4714 + j5.5642$. Berikut perhitungan pencarian parameter-parameter rangkaian kompensator pada trafo 1:

$$V_s = \frac{20000}{\sqrt{3}}$$

$$V_s = 11547 \text{ V}$$

Untuk mendapatkan tegangan sebesar 120 V pada rangkaian kompensator, maka *voltage transformer ratio* yaitu:

$$N_{PT} = \frac{11547}{120}$$

$$N_{PT} = 96.225 \approx 96$$

$$N_{PT} \approx 96$$

Dan rating arus pada trafo 1 yaitu:

$$I_{rated} = \frac{2500}{20 \cdot \sqrt{3}}$$

$$I_{rated} = 72.17 \text{ A}$$

Dari hasil diatas maka rating primer dari CT dipilih 75A, dan apabila arus pada rangkaian kompensator diturunkan menjadi 5A, maka rasio CT yaitu:

$$CT = \frac{CT_P}{CT_S}$$

$$CT = \frac{75}{5}$$

$$CT = 15$$

Menentukan R' dan X' setting dalam volt

$$R' + jX' = (7.4714 + j5.5642) \cdot \frac{15}{96}$$

$$R' + jX' = 1.167 + j0.87 \text{ V}$$

Setting R' dan X' dalam ohm, dapat ditentukan dengan membagi nilai setting R' dan X' dalam volt dengan rasio sekunder dari trafo arus

$$R'_{ohms} + jX'_{ohms} = \frac{1.167 + j0.87}{5}$$

$$R'_{ohms} + jX'_{ohms} = 0.2334 + j0.174 \Omega$$

Menghitung arus pada rangkaian kompensator

$$I_{comp} = \frac{I_{line\ 14-16}}{CT}$$

$$I_{comp} = \left(\frac{14.4778 \angle -0.7167^\circ}{15} \right)$$

$$I_{comp} = 0.965 \angle -0.7167^\circ A$$

Tegangan masukan pada rangkaian kompensator adalah

$$V_{reg} = \frac{VLN_{Bus\ 16}}{N_{PT}}$$

$$V_{reg} = \left(\frac{\frac{19511.4}{\sqrt{3}} \angle -1.326^\circ}{96} \right)$$

$$V_{reg} = 117.34 \angle -1.326^\circ$$

Drop tegangan pada rangkaian kompensator sebanding dengan nilai arus pada rangkaian kompensator dikalikan dengan nilai R' dan X' dalam ohm.

$$V_{drop} = (0.2334 + j0.174) \cdot (0.965\angle - 0.7167^\circ)$$

$$V_{drop} = (0.29112\angle 36.705^\circ) \cdot (0.965\angle - 0.7167^\circ)$$

$$V_{drop} = 0.28\angle 35.98^\circ V$$

Maka tegangan pada *voltage relay* yaitu

$$VR = V_{reg} - V_{drop}$$

$$VR = 117.34\angle - 1.326^\circ - 0.28\angle 35.98^\circ$$

$$VR = 117.308 - j2.715 - (0.226 + j0.164)$$

$$VR = 117.082 - j2.879$$

$$VR = 117.12\angle 1.4086^\circ V$$

Tegangan pada *voltage relay* mempresentasikan tegangan pada pusat beban. Menurut standard ANSI, dalam pengoperasian CVR tegangan yang diizinkan adalah 5% dibawah tegangan nominal 120V, yaitu 114V. Dikarenakan tegangan pada *voltage relay* berada diatas 114V, maka trafo 1 akan mengubah posisi tap hingga tegangan mendekati nilai 114V. Pada 120V-base, satu step perubahan tap pada trafo mengakibatkan perubahan tegangan sebesar 0.75V. Jumlah perubahan tap yang harus dilakukan dapat didapatkan dengan rumus:

$$Tap = \frac{114 - 117.12}{0.75}$$

$$Tap = -4.16$$

Ini menunjukkan bahwa untuk mendapatkan tegangan sebesar 114V trafo 1 harus menurunkan tap sebesar 4 step “-4”.

4.2.2 Parameter Rangkaian Kompensator Trafo 2

Trafo 2 memiliki rating 2500 KVA, 3 fasa, *Wye-Wye Grounded*, yang diletakkan pada saluran antara bus 23 dan bus 24, dengan impedansi saluran sebesar $2.6736 + j2.6680$. Berikut perhitungan pencarian parameter-parameter rangkaian kompensator pada trafo 2:

$$V_s = \frac{20000}{\sqrt{3}}$$

$$V_s = 11547 \text{ V}$$

Untuk mendapatkan tegangan sebesar 120 V pada rangkaian kompensator, maka *voltage transformer ratio* yaitu:

$$N_{PT} = \frac{11547}{120}$$

$$N_{PT} = 96.225$$

$$N_{PT} \approx 96$$

Dan rating arus pada trafo 2 yaitu:

$$I_{rated} = \frac{2500}{20 \cdot \sqrt{3}}$$

$$I_{rated} = 72.17 \text{ A}$$

Dari hasil diatas maka rating primer dari CT dipilih 75A, dan apabila arus pada rangkaian kompensator diturunkan menjadi 5A

$$CT = \frac{CT_P}{CT_S}$$

Maka rasio CT yaitu:

$$CT = \frac{75}{5}$$

$$CT = 15$$

Menentukan R' dan X' setting dalam volt

$$R' + jX' = (2.6736 + j2.6680) \cdot \frac{15}{96}$$

$$R' + jX' = 0.418 + j0.416 V$$

Setting R' dan X' dalam ohm, dapat ditentukan dengan membagi nilai setting R' dan X' dalam volt dengan rasio sekunder dari trafo arus

$$R'_{ohms} + jX'_{ohms} = \frac{0.418 + j0.416}{5}$$

$$R'_{ohms} + jX'_{ohms} = 0.0836 + j0.0832 \Omega$$

Menghitung arus pada rangkaian kompensator

$$I_{comp} = \frac{I_{line\ 23-24}}{CT}$$

$$I_{comp} = \left(\frac{8.0919 \angle -26.5651^\circ}{15} \right)$$

$$I_{comp} = 0.539 \angle -26.5651^\circ A$$

Tegangan masukan pada rangkaian kompensator adalah

$$V_{reg} = \frac{VLN_{Bus\ 24}}{N_{PT}}$$

$$V_{reg} = \left(\frac{\frac{19975.3}{\sqrt{3}} \angle -1.59^\circ}{96} \right)$$

$$V_{reg} = 120.13 \angle -1.59^\circ$$

Drop tegangan pada rangkaian kompensator sebanding dengan nilai arus pada rangkaian kompensator dikalikan dengan nilai R' dan X' dalam ohm.

$$V_{drop} = (0.0836 + j0.0832) \cdot (0.539 \angle -26.5651^\circ)$$

$$V_{drop} = (0.11795 \angle 44.863^\circ) \cdot (0.539 \angle -26.5651^\circ)$$

$$V_{drop} = 0.06 \angle 18.3^\circ V$$

Maka tegangan pada *voltage relay* yaitu

$$VR = V_{reg} - V_{drop}$$

$$VR = 120.13 \angle -1.59^\circ - 0.06 \angle 18.3^\circ$$

$$VR = 120.083 - j3.333 - (0.057 + j0.019)$$

$$VR = 120.026 - j3.352$$

$$VR = 120.07 \angle -1.6^\circ V$$

Tegangan pada *voltage relay* mempresentasikan tegangan pada pusat beban. Menurut standard ANSI, dalam pengoperasian CVR tegangan yang diizinkan adalah 5% dibawah tegangan nominal 120V, yaitu 114V.

Dikarenakan tegangan pada *voltage relay* berada diatas 114V, Maka trafo 2 akan mengubah posisi tap hingga tegangan mendekati nilai 114V. Pada 120V-base, satu step perubahan tap pada trafo mengakibatkan perubahan tegangan sebesar 0.75V. Jumlah perubahan tap yang harus dilakukan dapat didapatkan dengan rumus:

$$Tap = \frac{114 - 120.07}{0.75}$$

$$Tap = -8.09$$

Ini menunjukkan bahwa untuk mendapatkan tegangan sebesar 114V trafo 2 harus menurunkan tap sebesar 8 step “-8”.

4.2.3 Parameter Rangkaian Kompensator Trafo 3

Trafo 3 memiliki rating 2500 KVA, 3 fasa, *Wye-Wye Grounded*, yang diletakkan pada saluran antara bus 26 dan bus 27, dengan impedansi saluran sebesar $0.4935 + j0.3609$ Berikut perhitungan pencarian parameter-parameter rangkaian kompensator pada trafo 3:

$$V_s = \frac{20000}{\sqrt{3}}$$

$$V_s = 11547 \text{ V}$$

Untuk mendapatkan tegangan sebesar 120 V pada rangkaian kompensator, maka *voltage transformer ratio* yaitu:

$$N_{PT} = \frac{11547}{120}$$

$$N_{PT} = 96.225$$

$$N_{PT} \approx 96$$

Dan rating arus pada trafo 3 yaitu:

$$I_{rated} = \frac{2500}{20 \cdot \sqrt{3}}$$

$$I_{rated} = 72.17 \text{ A}$$

Dari hasil diatas maka rating primer dari CT dipilih 75A, dan apabila arus pada rangkaian kompensator diturunkan menjadi 5A, maka rasio CT yaitu:

$$CT = \frac{CT_P}{CT_S}$$

$$CT = \frac{75}{5}$$

$$CT = 15$$

Menentukan R' dan X' setting dalam volt

$$R' + jX' = (0.4935 + j0.3609) \cdot \frac{15}{96}$$

$$R' + jX' = 0.077 + j0.056 \text{ V}$$

Setting R' dan X' dalam ohm, dapat ditentukan dengan membagi nilai setting R' dan X' dalam volt dengan rasio sekunder dari trafo arus

$$R'_{ohms} + jX'_{ohms} = \frac{0.077 + j0.056}{5}$$

$$R'_{ohms} + jX'_{ohms} = 0.0154 + j0.0112 \Omega$$

Menghitung arus pada rangkaian kompensator

$$I_{comp} = \frac{I_{line\ 26-27}}{CT}$$

$$I_{comp} = \left(\frac{9.8152 \angle -39.5615^\circ}{15} \right)$$

$$I_{comp} = 0.654 \angle -39.5615^\circ A$$

Tegangan masukan pada rangkaian kompensator adalah

$$V_{reg} = \frac{VLN_{Bus\ 27}}{N_{PT}}$$

$$V_{reg} = \left(\frac{\frac{19953.7}{\sqrt{3}} \angle -1.584^\circ}{96} \right)$$

$$V_{reg} = 120.002 \angle -1.584^\circ$$

Drop tegangan pada rangkaian kompensator sebanding dengan nilai arus pada rangkaian kompensator dikalikan dengan nilai R' dan X' dalam ohm.

$$V_{drop} = (0.0154 + j0.0112) \cdot (0.654 \angle -39.5615^\circ)$$

$$V_{drop} = (0.02 \angle 36.027^\circ) \cdot (0.654 \angle -39.5615^\circ)$$

$$V_{drop} = 0.013 \angle -3.53^\circ V$$

Maka tegangan pada *voltage relay* yaitu:

$$VR = V_{reg} - V_{drop}$$

$$VR = 120.002\angle - 1.584^\circ - 0.013\angle - 3.53^\circ$$

$$VR = 119.956 - j3.317 - (0.013 + j0.0008)$$

$$VR = 119.943 - j3.3178$$

$$VR = 119.99\angle - 1.5845^\circ V$$

Tegangan pada *voltage relay* mempresentasikan tegangan pada pusat beban. Menurut standard ANSI, dalam pengoperasian CVR tegangan yang diizinkan adalah 5% dibawah tegangan nominal 120V, yaitu 114V. Dikarenakan tegangan pada *voltage relay* berada diatas 114V, maka trafo 3 akan mengubah posisi tap hingga tegangan mendekati nilai 114V. Pada 120V-base, satu step perubahan tap pada trafo mengakibatkan perubahan tegangan sebesar 0.75V. Jumlah perubahan tap yang harus dilakukan dapat didapatkan dengan rumus:

$$Tap = \frac{114 - 119.99}{0.75}$$

$$Tap = -7.98$$

Ini menunjukkan bahwa untuk mendapatkan tegangan sebesar 114V trafo 3 harus menurunkan tap sebesar 8 step “-8”.

4.2.4 Parameter Rangkaian Kompensator Trafo 4

Trafo 4 memiliki rating 2500 KVA, 3 fasa, *Wye-Wye Grounded*, yang diletakkan pada saluran antara bus 25 dan bus 30, dengan impedansi saluran sebesar $0.7384 + j0.5400$. Berikut perhitungan pencarian parameter-parameter rangkaian kompensator pada trafo 4:

$$V_s = \frac{20000}{\sqrt{3}}$$

$$V_s = 11547 V$$

Untuk mendapatkan tegangan sebesar 120 V pada rangkaian kompensator, maka *voltage transformer ratio* yaitu:

$$N_{PT} = \frac{11547}{120}$$

$$N_{PT} = 96.225$$

$$N_{PT} \approx 96$$

Dan rating arus pada trafo 4 yaitu:

$$I_{rated} = \frac{2500}{20 \cdot \sqrt{3}}$$

$$I_{rated} = 72.17 \text{ A}$$

Dari hasil diatas maka rating primer dari CT dipilih 75A, dan apabila arus pada rangkaian kompensator diturunkan menjadi 5A, maka rasio CT yaitu:

$$CT = \frac{CT_P}{CT_S}$$

$$CT = \frac{75}{5}$$

$$CT = 15$$

Menentukan R' dan X' setting dalam volt

$$R' + jX' = (0.7384 + j0.54) \cdot \frac{15}{96}$$

$$R' + jX' = 0.115 + j0.084 \text{ V}$$

Setting R' dan X' dalam ohm, dapat ditentukan dengan membagi nilai setting R' dan X' dalam volt dengan rasio sekunder dari trafo arus

$$R'_{ohms} + jX'_{ohms} = \frac{0.115 + j0.084}{5}$$

$$R'_{ohms} + jX'_{ohms} = 0.023 + j0.0168 \Omega$$

Menghitung arus pada rangkaian kompensator

$$I_{comp} = \frac{I_{line\ 25-30}}{CT}$$

$$I_{comp} = \left(\frac{1.8331 \angle -39.5333^\circ}{15} \right)$$

$$I_{comp} = 0.122 \angle -39.5333^\circ A$$

Tegangan masukan pada rangkaian kompensator adalah

$$V_{reg} = \frac{VLN_{Bus\ 30}}{N_{PT}}$$

$$V_{reg} = \left(\frac{\frac{19959.2}{\sqrt{3}} \angle -1.584^\circ}{96} \right)$$

$$V_{reg} = 120.03 \angle -1.584^\circ$$

Drop tegangan pada rangkaian kompensator sebanding dengan nilai arus pada rangkaian kompensator dikalikan dengan nilai R' dan X' dalam ohm.

$$V_{drop} = (0.023 + j0.0168) \cdot (0.122 \angle -39.5333^\circ)$$

$$V_{drop} = (0.028 \angle 36.146^\circ) \cdot (0.122 \angle -39.5333^\circ)$$

$$V_{drop} = 0.003 \angle -3.3873^\circ V$$

Maka tegangan pada *voltage relay* yaitu

$$VR = V_{reg} - V_{drop}$$

$$VR = 120.03 \angle -1.584^\circ - 0.003 \angle -3.3873^\circ$$

$$VR = 119.984 - j3.318 - (0.003 - j0.0002)$$

$$VR = 119.981 - j3.3178$$

$$VR = 120.03 \angle -1.584^\circ V$$

Tegangan pada *voltage relay* mempresentasikan tegangan pada pusat beban. Menurut standard ANSI, dalam pengoperasian CVR tegangan yang diizinkan adalah 5% dibawah tegangan nominal 120V, yaitu 114V. Dikarenakan tegangan pada *voltage relay* berada diatas 114V, maka trafo 4 akan mengubah posisi tap hingga tegangan mendekati nilai 114V. Pada 120V-base, satu step perubahan tap pada trafo mengakibatkan perubahan tegangan sebesar 0.75V. Jumlah perubahan tap yang harus dilakukan dapat didapatkan dengan rumus:

$$Tap = \frac{114 - 120.03}{0.75}$$

$$Tap = -8.04$$

Ini menunjukkan bahwa untuk mendapatkan tegangan sebesar 114V trafo 4 harus menurunkan tap sebesar 8 step “-8”.

4.3 Analisa Aplikasi *Conservation Voltage Reduction* Pada Sistem Distribusi *Microgrid IEEE 34 Bus*

Conservation Voltage Reduction merupakan suatu metode penghematan konsumsi energy dengan cara menurunkan level tegangan hingga maksimal 5% dibawah tegangan nominal. Berikut merupakan hasil analisis aliran daya sistem distribusi *microgrid IEEE 34 bus* dengan *conservation voltage reduction* :

Tabel 4.2 Hasil analisis aliran daya sistem distribusi *microgrid IEEE 34 bus* dengan CVR

Bus	Tegangan		Arus	
	Magnitude (kV)	Sudut	Magnitude (A)	Sudut
1	20.000	0	14.9809	-14.0429
2	19.9920	-0.024112	12.5512	1.6474
3	19.9867	-0.040292	12.5512	1.6474
4	19.8876	-0.343304	12.5512	1.6474
5	19.8876	-0.343304	0	0
6	19.7730	-0.699669	12.5512	1.6474
7	19.6828	-0.985136	12.5512	1.6474
8	19.6827	-0.985241	12.5512	1.6474
9	19.6813	-0.988457	12.5512	1.6474
10	19.6813	-0.988457	0	0
11	19.6813	-0.988457	0	0
12	19.6813	-0.988457	0	0
13	19.6279	-1.108065	14.5739	0.2821
14	19.6235	-1.117936	14.5739	0.2821
15	19.6279	-1.108065	0	0
16	19.0169	-1.399592	14.5739	0.2821
17	19.0144	-1.405875	14.1079	1.3038
18	19.0144	-1.405875	0	0
19	19.5102	-1.647124	14.9809	-14.0429
20	19.5102	-1.647205	14.9809	-14.0429
21	19.4982	-1.675787	6.9402	1.3406
22	19.4982	-1.675787	0	0
23	19.5097	-1.647236	8.092	-26.5651
24	19.0047	-1.721507	8.092	-26.5651
25	19.4681	-1.672957	11.3999	-39.6859
26	19.0171	-1.712424	9.4759	-39.6984
27	19.0113	-1.711873	9.4759	-39.6984
28	19.0091	-1.711584	1.3474	-40.3714
29	19.0088	-1.711542	1.3474	-40.3714
30	19.0066	-1.713277	1.9240	-39.6243

Tabel 4.2 Hasil analisis aliran daya sistem distribusi *microgrid* IEEE 34 bus dengan CVR (Lanjutan)

Bus	Tegangan		Arus	
	Magnitude (kV)	Sudut	Magnitude (A)	Sudut
31	19.0059	-1.713277	0.5500	-37.8750
32	19.0057	-1.713277	0.5500	-37.8750
33	19.0059	-1.713277	0	0
34	19.0059	-1.713277	0	0

4.3.1 Hasil CVR factor Pada Bus Beban Sistem Distribusi *Microgrid* IEEE 34 Bus

CVR factor merupakan suatu parameter yang digunakan untuk mengetahui seberapa efektif CVR dalam menghemat konsumsi energi. *CVR factor* menunjukkan persentase penurunan konsumsi daya di setiap penurunan tegangan sebesar 1%. Nilai dari *CVR factor* sangat berpengaruh dari jenis beban yang digunakan.

4.3.1.1 Hasil CVR factor Pada Bus Beban *Constant Power*

Berapapun level tegangan yang digunakan, beban dengan *constant power* mengkonsumsi daya secara konstan. Berikut adalah nilai dari CVR factor dari bus beban *constant power*:

a) Hasil CVR factor Pada Bus 29

Tabel 4.3 Parameter daya aktif, tegangan, dan arus saat CVR Off dan CVR On pada bus 29

Bus	Tegangan		Arus		Daya Aktif (kW)
	kV	Sudut	A	Sudut	
CVR Off					
29	19.9513	-1.583587	1.2838	-40.2434	19.08619
CVR On					
29	19.0088	-1.711542	1.3474	-40.3714	19.00894

Mencari nilai CVR factor

$$CVR_f = \frac{(P_{cvroff} - P_{cvron})/P_{cvroff}}{(V_{cvroff} - V_{cvron})/V_{cvroff}}$$

$$CVR_f = \frac{(19.08619 - 19.0088)/19.08619}{(19.9513 - 19.0088)/19.9513}$$

$$CVR_f = 0.085677954$$

Hasil *CVR factor* yang didapat menunjukkan bahwa setiap penurunan tegangan sebesar 1 %, CVR mampu menghemat daya sebesar 0.085677954 %.

b) Hasil *CVR factor* Pada Bus 30

Tabel 4.4 Parameter daya aktif, tegangan, dan arus saat CVR Off dan CVR On pada bus 30

Bus	Tegangan		Arus		Daya Aktif (kW)
	kV	Sudut	A	Sudut	
CVR Off					
30	19.9592	-1.584390	1.8331	-39.5333	27.56335
CVR On					
30	19.0057	-1.713277	0.5769	-37.8750	27.45692

Mencari nilai CVR factor

$$CVR_f = \frac{(P_{cvroff} - P_{cvron})/P_{cvroff}}{(V_{cvroff} - V_{cvron})/V_{cvroff}}$$

$$CVR_f = \frac{(27.56335 - 27.45692)/27.56335}{(19.9592 - 19.0066)/19.9592}$$

$$CVR_f = 0.080902998$$

Hasil *CVR factor* yang didapat menunjukkan bahwa setiap penurunan tegangan sebesar 1 %, CVR mampu menghemat daya sebesar 0.080902998 %.

4.3.1.2 Hasil CVR factor Pada Bus Beban Constant Current

Beban dengan *constant current* menarik arus secara konstan, berapapun level tegangan diturunkan. Berikut adalah nilai dari CVR factor dari bus beban *constant current*:

a) Hasil CVR factor Pada Bus 24

Tabel 4.5 Parameter daya aktif, tegangan, dan arus saat CVR Off dan CVR On pada bus 24

Bus	Tegangan		Arus		Daya Aktif (kW)
	kV	Sudut	A	Sudut	
CVR Off					
24	19.9753	-1.590082	8.0919	-26.5651	142.51195
CVR On					
24	19.0047	-1.721507	8.092	-26.5651	135.42216

Mencari nilai CVR factor

$$CVR_f = \frac{(P_{cvroff} - P_{cvron})/P_{cvroff}}{(V_{cvroff} - V_{cvron})/V_{cvroff}}$$

$$CVR_f = \frac{(142.51195 - 135.42216)/142.51195}{(19.9753 - 19.0047)/19.9753}$$

$$CVR_f = 1.023847119$$

Hasil CVR factor yang didapat menunjukkan bahwa setiap penurunan tegangan sebesar 1 %, CVR mampu menghemat daya sebesar 1.023847119 %.

b) Hasil CVR factor Pada Bus 32

Tabel 4.6 Parameter daya aktif, tegangan, dan arus saat CVR Off dan CVR On pada bus 32

Bus	Tegangan		Arus		Daya Aktif (kW)
	kV	Sudut	A	Sudut	
CVR Off					
32	19.9584	-1.584385	0.5501	-37.8750	8.4767
CVR On					
32	19.0057	-1.713277	0.5500	-37.8750	8.05564

Mencari nilai CVR factor

$$CVR_f = \frac{(P_{cvroff} - P_{cvron})/P_{cvroff}}{(V_{cvroff} - V_{cvron})/V_{cvroff}}$$

$$CVR_f = \frac{(8.4767 - 8.05564)/8.4767}{(19.9584 - 19.0057)/19.9584}$$

$$CVR_f = 1.040606969$$

Hasil *CVR factor* yang didapat menunjukkan bahwa setiap penurunan tegangan sebesar 1 %, CVR mampu menghemat daya sebesar 1.040606969 %.

4.3.1.3 Hasil *CVR factor* Pada Bus Beban *Constant Impedance*

Beban dengan *constant impedance* merupakan jenis beban dimana arus dan tegangan beban akan turun, pada saat level tegangan diturunkan. Berikut adalah nilai dari CVR factor dari bus beban *constant impedance*:

a) Hasil *CVR factor* Pada Bus 16

Tabel 4.7 Parameter daya aktif, tegangan, dan arus saat CVR Off dan CVR On pada bus 16

Bus	Tegangan		Arus		Daya Aktif (kW)
	kV	Sudut	A	Sudut	
CVR Off					
16	19.5114	-1.325934	14.4778	-0.7167	282.30265
CVR On					
16	19.0169	-1.399592	14.5739	0.2821	277.09769

Mencari nilai CVR factor

$$CVR_f = \frac{(P_{cvroff} - P_{cvron})/P_{cvroff}}{(V_{cvroff} - V_{cvron})/V_{cvroff}}$$

$$CVR_f = \frac{(282.30265 - 277.09769)/282.30265}{(19.5114 - 19.0169)/19.5114}$$

$$CVR_f = 0.727485896$$

Hasil *CVR factor* yang didapat menunjukkan bahwa setiap penurunan tegangan sebesar 1 %, CVR mampu menghemat daya sebesar 0.727485896 %.

b) Hasil *CVR factor* Pada Bus 27

Tabel 4.8 Parameter daya aktif, tegangan, dan arus saat CVR Off dan CVR On pada bus 27

Bus	Tegangan		Arus		Daya Aktif (kW)
	kV	Sudut	A	Sudut	
CVR Off					
27	19.9537	-1.583888	9.8152	-39.5615	147.48302
CVR On					
27	19.0113	-1.711873	9.4759	-39.6984	135.11053

Mencari nilai CVR factor

$$CVR_f = \frac{(P_{cvroff} - P_{cvron})/P_{cvroff}}{(V_{cvroff} - V_{cvron})/V_{cvroff}}$$

$$CVR_f = \frac{(147.48302 - 135.11053)/147.48302}{(19.9537 - 19.0113)/19.9537}$$

$$CVR_f = 1.776246562$$

Hasil *CVR factor* yang didapat menunjukkan bahwa setiap penurunan tegangan sebesar 1 %, CVR mampu menghemat daya sebesar 1.776246562 %.

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB 5

PENUTUP

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil yang didapatkan dari simulasi dan analisis pada tugas akhir ini, dapat diambil beberapa kesimpulan sebagai berikut:

- Dalam merancang suatu rangkaian kompensator (LDC), diperlukan beberapa parameter penting seperti CT_p , CT_s , N_{pt} , R' dan X' . Nilai dari parameter-parameter tersebut sangat berpengaruh terhadap modelan saluran tenaga listrik yang akan dimodelkan oleh rangkaian kompensator.
- Efektifitas penggunaan CVR dalam menghemat konsumsi energi sangat bergantung pada jenis beban yang digunakan.
- Pada kategori *constant power* didapatkan hasil penghematan energi sebesar 0.085677954 % dan 0.080902998 % per penurunan tegangan sebesar 1 %. Dimana penggunaan CVR tidak cukup efektif dalam melakukan penghematan daya dan hanya akan menambah konsumsi energi, karena dengan menurunkan level tegangan, maka arus saluran akan naik dan menyebabkan bertambahnya rugi-rugi daya pada saluran.
- Pada *constant current* didapatkan hasil penghematan energi sebesar 1.023847119 % dan 1.040606969 % per penurunan tegangan sebesar 1 %. Pada jenis beban ini, CVR hanya mampu mengurangi konsumsi energi pada sisi beban saja. Sedangkan rugi-rugi daya pada saluran tidak mengalami penurunan.
- Pada *constant impedance* didapatkan hasil penghematan energi sebesar 0.727485896 % dan 1.776246562 % per penurunan tegangan sebesar 1 %. Penggunaan CVR cukup efektif dalam melakukan penghematan daya dikarenakan penggunaan CVR pada jenis beban *constant impedance* dapat mengurangi konsumsi energi listrik baik di sisi beban maupun pada sisi saluran.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Ruchi Singh, Francis Tuffner, Jason Fuller, Kevin Schneider “*Effects of Distributed Energy Resources on CVR.*”(2011)
- [2] Marc Diaz-Aguiló, Julien Sandraz, Richard Macwan, Francisco de León, Dariusz Czarkowski, Christopher Comack, and David Wang “*Field-Validated Load Model for the Analysis of CVR in Distribution Secondary Networks Energy Conservation.*” (2013)
- [3] R. W. Uluski “*VVC in the Smart Grid Era.*” (2011).
- [4] Jeffrey M. Triplett, P.E., Sean A. Kufel, P.E. “*Implementing CVR through Voltage Regulator LDC Settings.*” (2012)
- [5] Wendy Ellens, Adam Berry, Sam West “*A Quantification of the Energy Savings by Conservation Voltage Reduction.*” (2011)
- [6] Clark W. Gellings “*The Smart Grid: Enabling energy Efficiency and Demand response.*” (2009)
- [7] William H. Kersting “*Distribution System Modeling and Analysis.*” (2001).

BIODATA PENULIS



Penulis bernama lengkap Mochammad Kemal Achriansyah. Anak pertama dari tiga bersaudara dari pasangan Bapak Totok Siswanto dan Ibu Mufida Hasan. Lahir pada tanggal 23 Januari 1992 di Kota Surabaya. Mengawali pendidikannya di SDN Sedati Gede I, Kota Sidoarjo, pada tahun 1997-2003. Kemudian melanjutkan pendidikan pada tingkat menengah pertama di SMPN 4 Waru pada tahun 2003- 2006. Setelah itu, penulis melanjutkan jenjang pendidikannya di SMA Hang Tuah 2 Sidoarjo pada tahun 2006–2009. Setelah lulus menyelesaikan pendidikannya di tingkat SMA pada tahun 2009, penulis meneruskan pendidikannya ke jenjang Diploma di Politeknik Elektronika Negeri Surabaya – ITS, Jurusan D3 Teknik Elektro Industri. Setelah menyelesaikan pendidikannya di tingkat Diploma, pada tahun 2012, penulis melanjutkan perkuliahan melalui program Lintas Jalur di Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya, Fakultas Teknologi Industri, Jurusan Teknik Elektro, bidang studi Teknik Sistem Tenaga.