ANALISA KETIDAKSEIMBANGAN BEBAN TERHADAP RUGI-RUGI DAYA PADA SALURAN DAN TRANSFORMATOR DISTRIBUSI 20KV (STUDI KASUS PADA PENYULANG BADAI DI GARDU INDUK TELUK BETUNG)

(Skripsi)

Oleh Insan Hakim Maliki Priangga



FAKULTAS TEKNIK UNIVERSITAS LAMPUNG BANDAR LAMPUNG 2016

ABSTRACT

THE UNBALANCED LOAD ANALYSIS ON POWER LOSSES ON 20 KV LINE AND DISTRIBUTION TRANSFORMERS (CASE STUDY ON BADAI FEEDER IN TELUK BETUNG SUBSTATION)

By

INSAN HAKIM MALIKI PRIANGGA

The distribution system is part of a power system that serves to distribute electrical power from the substation to the load center. In the process of electricity distribution unbalance load usually happens on the phases. This is a result of the use neither of electrical load that does not coincide nor because of the addition of electrical loads that do not pay attention to the unbalance load on each phase. Load unbalance resulting in losses in conductors and transformers.

This research aims to analyze the unbalanced load in the distribution system and its influence on power loss on line and distribution transformers. The case studies used Badai feeder in Teluk Betung substation. Simulations are performed using ETAP software.

The results of simulations and calculations, the consequences of load unbalance on a bus that has a greatest percentage of unbalance, namely on the load bus transformer TK663 amounted to 76.91 percent and generates neutral current 60.87 ampere, losses in conductors toward the bus 51 to bus 52 is zero and losses on the transformer TK663 is 0.2 KW + 0.4 Kyar.

Keywords: Distribution System, load unbalance, losses

ABSTRAK

ANALISA KETIDAKSEIMBANGAN BEBAN TERHADAP RUGI RUGI DAYA PADA SALURAN DAN TRANSFORMATOR DISTRIBUSI 20KV (STUDI KASUS PADA PENYULANG BADAI DI GARDU INDUK TELUK BETUNG)

Oleh

INSAN HAKIM MALIKI PRIANGGA

Sistem distribusi merupakan bagian dari sistem tenaga listrik yang berfungsi untuk menyalurkan daya listrik dari gardu induk ke pusat beban. Pada proses penyaluran listrik biasanya sering kali terjadi beban tidak seimbang pada fasa-fasanya. Hal ini terjadi akibat dari penggunaan beban listrik yang tidak berbarengan maupun karena banyaknya penambahan beban-beban listrik yang tidak memperhatikan ketidakseimbangan beban pada masing-masing fasanya. Ketidakseimbangan beban mengakibatkan rugi-rugi pada penghantar dan transformator.

Penelitian tugas akhir ini bertujuan untuk menganalisis ketidakseimbangan beban pada sistem distribusi dan pengaruhnya terhadap rugi-rugi daya pada saluran dan transformator distribusi. Studi kasus yang digunakan adalah penyulang Badai di gardu induk Teluk Betung. Simulasi dilakukan dengan menggunakan software ETAP.

Hasil simulasi dan perhitungan menunjukkan dampak yang timbul akibat ketidakseimbangan beban pada bus yang memiliki persen ketidakseimbangan yang terbesar yaitu pada bus beban transformator TK663 sebesar 76.91 persen dan menghasilkan arus netral 60.87 ampere, rugi-rugi pada pengahantar bus 51 ke bus 52 adalah nol dan rugi-rugi pada transformator TK663 adalah 0.2 KW + 0.4 Kvar. Kata kunci: Sistem Distribusi, Ketidakseimbangan beban, rugi-rugi

ANALISA KETIDAKSEIMBANGAN BEBAN TERHADAP RUGI-RUGI DAYA PADA SALURAN DAN TRANSFORMATOR DISTRIBUSI 20KV (STUDI KASUS PADA PENYULANG BADAI DI GARDU INDUK TELUK BETUNG)

Oleh

Insan Hakim Maliki Priangga

Skripsi

Sebagai Salah Satu Syarat Untuk Memperoleh Gelar SARJANA TEKNIK

Pada

Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Lampung



JURUSAN TEKNIK ELEKTRO FAKULTAS TEKNIK UNIVERSITAS LAMPUNG 2016 Judul Skripsi

: ANALISA KETIDAKSEIMBANGAN BEBAN TERHADAP RUGI-RUGI DAYA PADA SALURAN DAN TRANSFORMATOR DISTRIBUSI 20KV (STUDI KASUS PADA PENYULANG BADAI DI GARDU INDUK TELUK BETUNG)

Nama Mahasiswa

: Insan Hakim Maliki Priangga

Nomor Pokok Mahasiswa: 0645031032

Jurusan

: Teknik Elektro

Fakultas

: Teknik

MENYETUJUI

1. Komisi Pembimbing

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

Ir. Noer Soedjarwanto, M.T. NIP 19631114 199903 1 001

2. Ketua Jurusan Teknik Elektro

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

1. Tim Penguji

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

Sekretaris

: Ir. Noer Soedjarwanto, M.T.

Penguji

Bukan Pembimbing : Herri Gusmedi, S.T., M.T.

Dekan Fakultas Teknik

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

Tanggal Lulus Ujian Skripsi: 22 Juni 2016

LEMBAR PERNYATAAN

Sebagai mahasiswa Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Lampung. Saya yang bertanda tangan dibawah ini:

Nama

: Insan Hakim Maliki Priangga

NPM

: 0645031032

Menyatakan bahwa karya ilmiah saya yang berjudul:

ANALISA KETIDAKSEIMBANGAN BEBAN TERHADAP RUGI-RUGI DAYA PADA SALURAN DAN TRANSFORMATOR DISTRIBUSI 20KV (STUDI KASUS PADA PENYULANG BADAI DI GARDU INDUK TELUK BETUNG)

Merupakan karya ilmiah asli saya dan belum pernah dipublikasikan dimana pun. Apabila dikemudian hari, karya saya disinyalir bukan merupakan karya asli saya, maka saya bersedia menerima konsekuensi apa pun yang diberikan Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Lampung kepada saya. Demikian surat pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Dibuat di

: Bandar Lampung

Pada Tanggal : 22 Juni 2016

Yang menyatakan

(Insan Hakim Maliki Priangga)

RIWAYAT HIDUP



Penulis dilahirkan di Bandar Lampung pada tanggal 6 September 1988, sebagai anak kedua dari lima bersaudara, dari pasangan bapak Piping Setia Priangga dan ibu Fadillah Hakim.

Penulis menyelesaikan pendidikan Sekolah Dasar di SDN 2

Sukabumi Bandar Lampung pada tahun 1999, Sekolah Menengah Pertama di Mts AL-Fattah Natar Lampung Selatan pada tahun 2002, dan Sekolah Menengah Atas di SMA Utama 2 Bandar Lampung pada tahun 2005.

Tahun 2006 penulis terdaftar sebagai mahasiswa Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Lampung melalui jalur penerimaan mahasiswa baru Non-Reguler. Penulis aktif dalam organisasi Himpunan Mahasiswa Elektro (Himatro). Penulis pernah melaksanakan Kerja Praktik (KP) di PT Pusri Palembang dari 1 Juli – 31 Juli 2010.

"Belajar akan memberikan kita pengetahuan dan pemahaman baru, sehingga kita mampu menghadapi tantangan baru yang membentang di depan kita"

"Waktu dan tenaga yang telah kita habiskan untuk belajar, pasti akan selalu melahirkan sesuatu yang berguna untuk kehidupan kita".

"Pendidikan merupakan perlengkapan paling baik untuk hari tua".

PERSEMBAHAN

Skripsi ini kupersembahkan un tuk:

Papa dan Mamaku tercinta. Yang telah merawat dan membesarkanku dengan kasih sayang yang tak terbatas, memberikan dorongan semangat nasehat serta doa.

Kakak dan Adik- adik yang kusayangi. Yang selalu memberikan dukungan, motivasi dan semangat.

Untuk keluarga besarku. Yang telah memberikan masukan, motivasi.

Serta Teman – teman seperjuangan di kampus. Yang memberikan Semangat, rasa kebersamaan, dan persahabatan.

Terima Kasih Buat Kalian Semua.....!!!

SANWACANA

Puji syukur kehadirat Allah SWT yang telah melimpahkan rahmat dan hidayat-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan penyusunan skripsi / tugas akhir ini dengan judul "ANALISA KETIDAKSEIMBANGAN BEBAN TERHADAP RUGI-RUGI DAYA PADA SALURAN DAN TRANSFORMATOR DISTRIBUSI 20KV (STUDI KASUS PADA PENYULANG BADAI DI GARDU INDUK TELUK BETUNG)". Dalam penyusunan laporan tugas akhir ini, penulis telah banyak mendapat bantuan baik ilmu, materil, petunjuk, bimbingan, dan saran dari berbagai pihak. Untuk itu penulis ingin mengucapkan terima kasih dan rasa syukur yang sebesar – besarnya, baik langsung maupun tidak langsung kepada:

- 1. Allah SWT dan Rasullah Muhammad SAW.
- 2. Kepada Ayahku tercinta, Piping Setia Priangga dan Ibu tercinta, Fadillah Hakim. Terima kasih atas kasih sayang, perhatian, perjuangan yang tak kenal lelah dan tanpa henti, serta pengorbanan harta, jiwa raga, doa dan semangatnya yang telah memberikan kekuatan dalam hidup ini.
- 3. Bapak Dr.Ing. Ardian Ulvan, S.T.,M.Sc., selaku Ketua Jurusan Teknik Elektro Universitas Lampung.
- 4. Bapak Osea Zebua, S.T., M.T., selaku pembimbing utama, dan Pak Ir. Noer sudjarwanto, M.T., selaku pembimbing pendamping, yang tanpa lelah dan bosan

- mencurahkan waktunya yang sedemikian banyak dalam menyelesaikan tugas akhir ini.
- 5. Bapak Heri Gusmedi, S.T., M.T., yang telah bersedia menjadi penguji dalam tugas akhir ini.
- 6. Bapak dan Ibu dosen Jurusan Teknik Elektro atas didikan, bimbingan, serta ilmu pengetahuan yang telah diberikan.
- 7. Teman-temanku Jemi, Dedi, Angga, Afandi, Didit, Joko, Wawan, Nanda, Rahman, Indra, Gery, Ivan dan masih banyak lagi yang tidak bisa disebutkan satu persatu. terima kasih atas dukungannya.
- 8. Rekan-rekan mahasiswa di Jurusan Teknik Elektro Universitas Lampung angkatan 2006, 2007.
- 9. Teruntuk Almamaterku (Teknik), terima kasih telah menjadi bagian dari kalian. Pengalaman, kebersamaan, persaudaraan, dan rasa solidaritas.
- 10. Semua pihak yang tidak dapat penulis sebutkan satu persatu yang telah turut membantu penulis dalam menyelesaikan laporan Skripsi ini.

Penulis menyadari masih adanya kekurangan dalam penulisan laporan ini, sehingga kritik dan saran sangat diharapkan demi kebaikan dan kemajuan di masa yang akan datang. Harapan penulis semoga Allah SWT membalas semua kebaikan semua pihak yang telah membantu penulis dan semoga laporan tugas akhir ini dapat bermanfaat serta menambah ilmu pengetahuan bagi yang membacanya.

Bandar Lampung, 11 Oktober 2016

Penulis
INSAN HAKIM MALIKI PRIANGGA

DAFTAR ISI

		Halaman
TA	R IS	SIi
TA]	R T	ABELiii
TA.	R G	AMBARiv
PE	ND	AHULUAN
A.	La	tarbelakang1
B.	Tu	juan penelitian
C.	Ma	anfaat penelitian
D.	Per	rumusan masalah
E.	Ba	tasan masalah
F.	Hi	potesis3
G.	Sis	tematika Penulisan4
TII	NJA	UAN PUSTAKA
A.	Ke	tidakseimbangan beban5
B.	An	alisis ketidakseimbangan beban; metode yang digunakan 6
	1.	Arus dan Tegangan Pada Komponen Simetris 8
	2.	Daya dengan Komponen Simetris sebagai sukunya 10
	3.	Penyaluran dan Susut Daya pada Keadaan Arus Seimbang 11
	4.	Penyaluran dan Susut Daya pada Keadaan Arus Tidak Seimbang 12
	5.	Faktor Daya
	PE A. B. C. D. E. G. TII	TAR T TAR G PEND A. La B. Tu C. Ma D. Per E. Ba F. Hij G. Sis TINJA A. Ke B. An 1. 2. 3. 4.

	6. Arus Netral Karena Beban Tidak Seimbang	15
	CAnalisis aliran daya	16
	1. aliran daya 3 phasa	16
	2. Rugi-rugi daya pada saluran dan trafo distribusi	21
III.	METODE PENELITIAN	
	A. Waktu dan Tempat penelitian	25
	B. Alat dan Bahan	25
	C. Metode yang digunakan	25
	1. Studi Literatur	26
	2. Pengambilan Data	26
	3. Pemodelan Saluran Distribusi	26
	4. Penyelesaian Aliran Daya 3 Fasa	27
	5. Perhitungan Ketidakseimbangan Beban	28
	D. Diagram Alir Penelitian	30
	E. Diagram Alir Program	31
IV.	ANALISIS DAN PEMBAHASAN	
	A. Simulasi Pengujian Aliran Daya 3 Fasa Menggunakan Etap	32
	1. Single Line Diagram Penyulang Badai	
	Data Simulasi Pengujian Data Simulasi Pengujian	
	B. Hasil Simulasi Pegujian	
	Perhitungan Ketidakseimbangan Beban	
V.	KESIMPULAN DAN SARAN	
	A. KESIMPULAN	50
	B. SARAN	51

DAFTAR PUSTAKA

LAMPIRAN

DAFTAR GAMBAR

Gambar	Halaman
2.1 Vektor diagram arus keadaan seimbang	5
2.2 Vektor diagram arus keadaan tidak seimbang	6
2.3 Representasi komponen simetris	7
2.4 Penjumlahan secara grafis komponen-komponen	8
2.5 Diagram fasor tegangan saluran daya model fasa tunggal	11
2.6 Segitiga daya	14
3.1 Tampilan program ETAP 7.5.0	27
3.2 Diagram alir penelitian	30
3.3 Diagram alir program	31
4.1 Single line diagram penyulang badai G.I teluk betung	32

DAFTAR TABEL

Tabel		Halaman
1.	Data beban	34
2.	Data saluran	36
3.	Data transformator Distribusi	38
4.	Rugi-rugi di penghantar	40
5.	Rugi-rugi transformator	43
6.	Persentasi ketidakseimbangan beban	46

BAB I PENDAHULUAN

A. Latar Belakang

Saat ini tenaga listrik merupakan kebutuhan yang utama, baik untuk kehidupan sehari-hari maupun untuk kebutuhan industri. Hal ini disebabkan karena tenaga listrik mudah untuk ditransportasikan dan dikonversikan ke dalam bentuk tenaga yang lain. Penyediaan tenaga listrik yang stabil dan kontinyu merupakan syarat mutlak yang harus dipenuhi dalam memenuhi kebutuhan tenaga listrik dan salah satu komponen utama dalam sistem pembangkitan energi listrik adalah jaringan distribusi.

Sistem distribusi merupakan bagian dari sistem tenaga listrik yang berfungsi untuk menyalurkan dan mendistribusikan daya listrik yang berasal dari gardu induk ke pusat beban. Pertumbuhan beban yang terus meningkat, mengharuskan sistem distribusi mampu memberikan penyaluran daya listrik yang cukup dan sesuai dengan permintaan daya listrik yang dibutuhkan oleh konsumen, dan dalam pendistribusian tenaga listrik harus diusahakan sebaik mungkin, untuk itu gangguan yang terjadi pada sistem distribusi harus di selesaikan secara tepat dan cepat. Karena gangguan tersebut dapat menyebabkan pemadaman, sehingga dapat mengurangi kontinuitas dan kualitas pendistribusian tenaga listrik bagi konsumen.

Pada proses pendistribusian listrik biasanya sering kali terjadi beban tidak seimbang pada fasa-fasanya (sistem distribusi merupakan sisem 3 fasa) atau terjadi kelebihan beban karena pemakaian alat-alat listrik dari konsumen energi listrik. Keseimbangan beban antar fasa diperlukan untuk pemerataan beban

sehingga meminimalkan perubahan yang diakibatkan oleh beban penuh. Hal ini juga penting karena bermanfaat pada teknik optimasi untuk menghasilkan system yang handal dan efisien. Sebuah konfigurasi 1 fase dengan 3 kabel dapat dikatakan tidak seimbang jika arus netral tidak bernilai nol. Ketidakseimbangan beban juga mempengaruhi *losses* yang terjadi di penghantar maupun di *transformator*.

Hal itulah salah satu yang menyebabkan terjadinya gangguan dan ketidakmaksimalan pendistribusian tenaga listrik ke konsumen. Oleh karena itu diperlukan suatu pengkajian terkait aliran daya tiga fasa, akibat dari ketidakseimbangan beban dan pengaruhnya terhadap transformator distribusi ,sebagai obyek dari penelitian ini pada penyulang badai di Gardu Induk teluk betung Bandar Lampung.

B. Tujuan Penelitian

Adapun tujuan dari Tugas Akhir ini adalah:

- Untuk menganalisis ketidakseimbangan beban pada sistem distribusi dan pengaruhnya terhadap rugi-rugi daya pada saluran dan transformator distribusi.
- 2. Untuk mensimulasikan aliran daya tiga fasa dan membandingkannya menggunakan beban yang seimbang dan tidak seimbang.

C. Manfaat Penelitian

Adapun manfaat dari penelitian tugas akhir ini adalah:

- 1. Memberikan hasil analisis dari ketidakseimbangan beban pada sistem distribusi dan pengaruhnya terhadap rugi-rugi daya pada saluran dan transformator distribusi yang timbul sebagai bahan pertimbangan untuk membangun sistem di masa yang akan datang.
- 2. Memberikan hasil analisis perbandingan dari aliran daya tiga fasa dengan beban yang seimbang dan tidak seimbang.

D. Perumusan Masalah

Dalam menganalisis ketidakseimbangan beban dibutuhkan aliran daya tiga fasa dengan bentuk beban tidak seimbang dan perhitungan rugirugi di penghantar dan transformator distribusi agar mendapatkan persentasi ketidakseimbangan untuk menjaga sistem tetap stabil, pada analisis aliran daya tiga fasa di simulasikan menggunakan *software* etap.

E. Batasan Masalah

Pada penelitian ini terdapat beberapa batasan masalah, antara lain:

- Penelitian ini hanya membahas aliran daya pada sistem distribusi di satu penyulang yaitu penyulang Badai Gardu Induk Teluk Betung Bandar Lampung.
- 2. Tidak membahas jenis gangguan yang terjadi pada sistem distribusi
- 3. Penilitian ini dilakukan pada kondisi aman (*stady state*)
- Penelitian ini hanya membahas ketidakseimbangan beban dan pengaruhnya pada rugi-rugi daya pada saluran dan transformator distribusi
- 5. Tidak membahas analisis harmonisa pada sistem distribusi

F. Hipotesis

Ketidakseimbangan beban pada sistem distribusi akan mengakibatkan adanya rugi-rugi pada saluran dan *transformator* apabila ketidakseimbangan ini dibiarkan terus menerus akan mengakibatkan kerusakan pada peralatan dalam hal ini *transformator* distribusi dan penghantar, apabila *transformator* diberi beban yang tidakseimbang akan timbul arus netral pada *transformator* yang akan mengakibatkan panas yang berlebih yang nantinya akan merusak *transformator*, begitu juga pada penghantar apabila salah satu fasanya diberikan beban lebih akan

mengakibatkan panas yang nantinya akan menyebabkan penghantar rusak, oleh karena itu dibutuhkan analisis aliran daya tiga fasa dan perhitungan rugi-rugi agar mendapatkan persentasi ketidakseimbangan sebagai acuan untuk mendapatkan keseimbangan pada sistem.

G. Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan yang digunakan dalam penulisan tugas akhir ini adalah:

I. PENDAHULUAN

Bab ini menjelaskan latar belakang, pokok permasalahan, tujuan, manfaat penelitian, batasan masalah, dan sistematika penulisan dari tugas akhir ini.

II. TINJAUAN PUSTAKA

Bab ini membahas mengenai analisis ketidakseimbangan beban, metode yang digunakan, analisis aliran daya tiga fasa

III. METODE PENELITIAN

Bab ini membahas mengenai bagai mana metode pengerjaan tugas akhir ini dilakukan dan langkah-langkah pengerjaan yang dilakukan.

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

Bab ini akan menampilkan hasil dari analisis ketidakseimbangan beban dan hasil simulasi aliran daya tiga fasa

V. SIMPULAN DAN SARAN

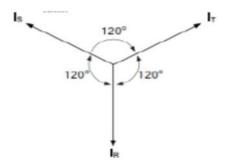
Bab ini berisi kesimpulan dan saran

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

A. Ketidakseimbangan Beban¹

Dewasa ini kebutuhan pasokan listrik sangat vital bagi penduduk di perumahan maupun industri dan pertumbuhan penduduknya tidak merata pada tiap lokasi sehingga menyebabkan pada proses pendistribusian listrik tidak merata pada setiap penghantar fasa dikarnakan lokasi pada pusat beban memiliki kerapatan beban yang berbeda-beda. Yang dimaksud dengan keadaan seimbang adalah suatu keadaan dimana:

- 1. Ketiga vektor arus / tegangan adalah sama besar
- 2. Ketiga vektor saling membentuk sudut 120° satu sama lain, seperti yang terlihat pada Gambar di bawah ini :

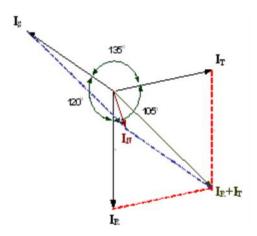


Gambar 2.1 Vektor Diagram Arus Keadaan Seimbang 1

Dari gambar di atas menunjukan vektor diagram arus dalam keadaan seimbang. Di sini terlihat bahwa penjumlahan ketiga vektor arusnya (Ia Ib Ic) adalah sama dengan nol. Sehingga tidak muncul arus netral.

Sedangkan yang dimaksud dengan keadaan tidak seimbang adalah keadaan dimana salah satu atau kedua syarat keadaan setimbang tidak terpenuhi. Kemungkinan keadaan tidak seimbang ada tiga yaitu:

- 1. Ketiga vektor sama besar tetapi tidak membentuk sudut 120° satu sama lain
- 2. Ketiga vektor tidak sama besar tetapi memebentuk sudut 120° satu sama lain
- 3. Ketiga vektor tidak sama besar dan tidak membentuk sudut 120° satu sama lain. Seperti yang terlihat pada di bawah ini :



Gambar 2.2 Vektor Diagram Arus Keadaan Tidak Seimbang¹

Dari gambar di atas menunjukkan vektor diagram arus dalam keadaan tidak seimbang. Di sini terlihat bahwa penjumlahan ketiga vektor arusnya (Ia Ib Ic) adalah tidak sama dengan nol sehingga muncul suatu besaran yaitu arus netral (IN) yang besarnya bergantung pada seberapa besar faktor ketidakseimbangannya.

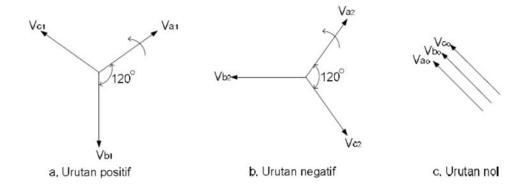
B. Analisis Ketidakseimbangan Beban; Metode Yang Digunakan^{2,3}

Pada kondisi system distribusi tegangan rendah akibat dari kondisi beban yang tidak seimbang akan mengalir arus pada kawat netral pada Transformator Arus yang mengalir pada kawat netral yang merupakan arus bolak-balik untuk sistem distribusi tiga fasa empat kawat adalah penjumlahan vektor dari ketiga arus fasa dalam komponen simetris. Menurut Fortescue yang menyatakan tiga fasor tegangan tak seimbang dari system tiga fasa dapat diuraikan menjadi tiga fasa

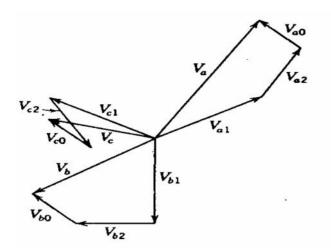
yang seimbang dengan menggunakan komponen simetris (Stevenson, 1993). Komponen simetris tersebut yaitu urutan positif, negatif dan urutan nol. Himpunan komponen seimbang tersebut antara lain:

- Komponen urutan positif yang terdiri dari tiga fasor yang sama besar, terpisah satu dengan yang lain dalam fasa sebesar 120°, dan mempunyai urutan fasa yang sama seperti fasor aslinya.
- Komponen urutan negatif yang terdiri dari tiga fasor yang sama besar, terpisah satu dengan yang lain dalam fasa sebesar 120°, dan mempunyai urutan fasa yang berlawanan dengan fasor aslinya.
- 3. Komponen urutan nol yang terdiri dari tiga fasor yang sama besar dan dengan pergeseran nol antara fasor yang satu dengan yang lain.

Pemecahan masalah dengan menggunakan komponen simetris bahwa ketiga fasa dari sistem dinyatakan sebagai *a, b,* dan *c* dengan cara yang demikian sehinggga urutan fasa tegangan dan arus dalam sistem adalah *abc*, sehingga fasa komponen urutan positif dari fasor tak seimbang itu adalah *abc*, sedangkan urutan fasa dari komponen urutan negatif adalah *acb*. Jika fasor aslinya adalah tegangan, maka tegangan tersebut dapat dinyatakan *Va, Vb*, dan *Vc*. Komponen urutan positif untuk *Va, Vb*, dan *Vc* adalah *Va1,Vb1*, dan *Vc1* .Deimikian pula komponen urutan negative adalah *Va2, Vb2*, dan *Vc2*, sedangkan komponen urutan nol adalah *Va0, Vb0*, dan *Vc0*. Gambar (2.3) menunjukkan tiga himpunan komponen simetris.



Gambar 2.3 Representasi komponen simetris^{2,3}



Gambar 2.4. Penjumlahan secara grafis komponen-komponen^{2,3}

Tegangan tak seimbang setiap fasanya merupakan penjumlahan masingmasing komponen simetris yaitu:

Tegangan fasa a,
$$Va = Va1+Va2+Va0$$
 (2.1)

Tegangan fasa b,
$$Vb = Vb1+Vb2+Vb0$$
 (2.2)

Tegangan fasa c,
$$Vc = Vc1+Vc2+Vc0$$
 (2.3)

1. Arus Dan Tegangan Pada Komponen Simetris^{2,3}

a. Arus pada komponen simetris^{2,3}

Di bawah ini merupakan bentuk arus dalam komponen fasa

$$I_{abc} = [T] I_a^{012}$$
 (2.4)

Sehingga dalam bentuk matrix untuk arus dituliskan sebagai berikut:

$$\begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a^0 \\ I_a^1 \\ I_a^2 \end{bmatrix}$$
(2.5)

Dimana [T] diketahui sebagai transformasi komponen simetris yang ditansformasikan dari arus fasor I_{abc} ke dalam komponen arus I_a^{012} yang di tulis sebagai berikut:

$$\begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix}$$
 (2.6)

Dari persamaan diatas terbentuklah persamaan arus dalam komponen simetris, yaitu:

$$I_a^{012} = [T]^{-1} I_{abc} (2.7)$$

Bentuk matrix invers [T] diberikan sebagai berikut:

$$[T]^{-1} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix}$$
 (2.8)

Sehingga dapat disimpulkan bahwa:

$$[T]^{-1} = \frac{1}{3} [T]^*$$
 (2.9)

Jadi arus komponen dalam bentuk matrix dituliskan sebagai berikut:

$$\begin{bmatrix}
I_{a}^{0} \\
I_{a}^{1} \\
I_{a}^{2}
\end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix}
1 & 1 & 1 \\
1 & a^{2} & a \\
1 & a & a^{2}
\end{bmatrix} \begin{bmatrix}
I_{a} \\
I_{b} \\
I_{c}
\end{bmatrix} \text{ atau } \begin{bmatrix}
I_{0} \\
I_{1} \\
I_{2}
\end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix}
1 & 1 & 1 \\
1 & a^{2} & a \\
1 & a & a^{2}
\end{bmatrix} \begin{bmatrix}
I_{a} \\
I_{b} \\
I_{c}
\end{bmatrix}$$
(2.10)

b. Tegangan pada komponen simetris^{2,3}

Tegangan dalam bentuk komponen fasa adalah:

$$V_{abc} = [T] V_a^{012} (2.11)$$

Sedangkan bentuk tegangan dalam komponen simetris yang merupakan kebalikan dari komponen fasa adalah sebagai berikut:

$$V_a^{012} = [T]^{-1} V_{abc} (2.12)$$

2. Daya dengan Komponen Simetris sebagai Sukunya^{2,3}

Arus yang diinjeksi dalam sistem daya tiga fasa adalah:

$$S_{3\emptyset} = V_{abc} \cdot I_{abc}^* \tag{2.13}$$

$$I_{abc} = \left(\frac{s_{3\emptyset}}{v_{abc}}\right)^*$$

(2.14)

Dimana persamaan awal yang terbentuk dari daya tiga fasa adalah:

$$S_{3\phi} = P_{abc} + jQ_{abc} \tag{2.15}$$

Sehingga terbentuk persamaan yang digunakan untuk menginjeksi arus ke dalam aliran daya tiga fasa yang di berikan sebagai berikut:

$$I_{abc} = \frac{P_{abc-jQ_{abc}}}{V_{abc}^*}$$
 (2.16)

Daya pada sistem tiga fasa adalah jumlah daya masing – masing fasa, berikut bentuk persamaan:

$$S_{3\emptyset} = \overline{V}_A \overline{I}_A^* + \overline{V}_B \overline{I}_B^* + \overline{V}_C \overline{I}_C^*$$
(2.17)

$$= \left[\overline{V}_{A} \ \overline{V}_{B} \ \overline{V}_{C} \right] \begin{bmatrix} \overline{I}_{A}^{*} \\ \overline{I}_{B}^{*} \\ \overline{I}_{C}^{*} \end{bmatrix}$$
(2.18)

$$- \overline{V}_{ABCT} \overline{I}_{ABC}^*$$
 (2.19)

$$\widetilde{V}_{ABC} = [T] \widetilde{V}_{012} \text{ maka } \widetilde{V}_{ABCT} = \widetilde{V}_{012T} [T]_T$$
(2.20)

$$\tilde{I}_{ABC} = [T] \tilde{I}_{012} \text{ maka } \tilde{I}_{ABCT}^* = [T]^* \tilde{I}_{012T}^*$$
(2.21)

$$S_{3\emptyset} = \widetilde{V}_{012T} [T]_T [T]^* \widetilde{I}^*_{012T}$$
 (2.22)

$$[T]_{T}[T]^{*} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^{2} & a \\ 1 & a & a^{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^{2} & a \\ 1 & a & a^{2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 3 & 0 & 0 \\ 0 & 3 & 0 \\ 0 & 0 & 3 \end{bmatrix} = 3 \begin{bmatrix} 3 & 0 & 0 \\ 0 & 3 & 0 \\ 0 & 0 & 3 \end{bmatrix}$$
(2.23)

Dengan demikian dapat dituliskan:

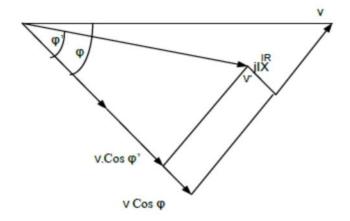
$$S_{3\emptyset} = 3 \ \widetilde{V}_{012} \ \widetilde{I}_{012}^* = 3(\overline{V}_0 \overline{I}_0^* + \overline{V}_1 \overline{I}_1^* + \overline{V}_2 \overline{I}_2^*)$$
 (2.24)

3. Penyaluran dan Susut Daya pada Keadaan Arus Seimbang¹

Misalkan daya sebesar P disalurkan melalui suatu saluran dengan penghantar netral. Apabila pada penyaluran daya ini arus-arus fasa dalam keadaan seimbang, maka besarnya daya dapat dinyatakan sebagai berikut :

$$P = 3 [V] [I] cos$$
 (2.25)

Daya yang sampai ujung terima akan lebih kecil dari P karena terjadi penyusutan dalam saluran. Penyusutan daya ini dapat diterangkan dengan menggunakan diagram fasor tegangan saluran model fasa tunggal seperti pada Gambar 2.5 di bawah ini :



Gambar 2.5 Diagram Fasor Tegangan Saluran Daya Model Fasa Tunggal¹

Model ini dibuat dengan asumsi arus pemusatan kapasitif pada saluran cukup kecil sehingga dapat diabaikan. Dengan demikian besarnya arus ujung kirim sama dengan arus di ujung terima. Apabila tegangan dan faktor faktor daya

pada ujung terima berturut-turut adalah V' dan ', maka besarnya daya pada ujung terima adalah :

$$P' = 3 [V'] [I] \cos '$$
 (2.26)

Selisih antara P pada persamaan (2.25) dan P' pada persamaan (2.26) memberikan susut daya saluran, yaitu :

$$Pl = P - P' = 3 [V] [I] \cos -3 [V'] [I] \cos ' = 3 [I] {[V] \cos -[V'] \cos '}$$
(2.27)

Sementara itu dari Gambar 2.5 memperlihatkan bahawa :

$$\{[V]\cos - [V']\cos '\} = [I]R$$
 (2.28)

Dengan R adalah tahanan kawat penghantar tiap fasa, oleh karena itu persamaan (2.27) berubah menjadi :

$$Pl = 3 [I^2] R$$
 (2.29)

4. Penyaluran dan Susut Daya pada Keadaan Arus Tidak Seimbang¹

Jika [I] adalah besaran arus fasa dalam penyaluran daya sebesar P pada keadaan seimbang, maka pada penyaluran daya yang sama tetapi tidak seimbang besarnya arus-arus fasa dapat dinyatakan dengan koefisien a, b, dan c adalah sebagai berikut :

$$[Ia] = a[I] \tag{2.30}$$

$$[Ib] = b[I] \tag{2.31}$$

$$[Ic] = c[I] \tag{2.32}$$

Dengan Ia, Ib, dan Ic berturut adalah arus fasa R, S dan T. Telah disebutkan di atas bahwa faktor daya ketiga fasa dianggap sama walaupun besarnya arus berbeda-beda. Dengan anggapan seperti ini besarnya daya yang disalurkan dapat dinyatakan sebagai :

$$P = (a+b+c) [V] [I] cos$$
 (2.33)

Apabila persamaan (2.27) dan persamaan (2.33) menyatakan daya yang besarnya sama, maka dari kedua persamaan tersebut dapat diperoleh persyaratan koefisien a,b dan c adalah :

$$a + b + c = 3$$
 . (2.34)

Dengan anggapan yang sama, arus yang mengalir di penghantar netral dapat dinyatakan sebagai :

$$IN = Ia + Ib + Ic (2.35)$$

$$= [I] \{a + b \cos(-120) + j.b.\sin(-120) + c.\cos(-120) + j.c.\sin(120)\}$$
 (2.36)

$$= [I] \{a - (b + c) / 2 + j. (c - b) \quad 3 / 2\}$$
(2.37)

Susut daya saluran adalah jumlah susut pada penghantar fasa dan penghantara netral adalah :

$$Pl' = \{ [Ia^2] + [Ib^2] + [Ic^2] \}.R + [IN^2].RN$$
 (2.38)

$$= (a^{2}+b^{2}+c^{2}) [I]2R + (a^{2}+b^{2}+c^{2}-ab-ac-bc) [IN]^{2}.RN$$
 (2.39)

Dengan RN adalah tahanan penghantar netral. Apabila persamaan (2.37) disubstitusikan ke persamaan (2.39) maka akan diperoleh :

$$Pl' = \{9-2(ab+ac+bc) [I]^2R + (9-3 (ab+ac+bc)) [IN]^2.RN$$
 (2.40)

Persamaan (2.28) ini adalah persamaan susut daya saluran untuk saluran dengan penghantar netral. Apabila tidak ada penghantar netral maka kedua ruas kanan akan hilang sehingga susut daya akan menjadi:

$$Pl' = \{9-2 (ab+ac+bc) [I]^2 R$$
 (2.41)

5. Faktor Daya¹

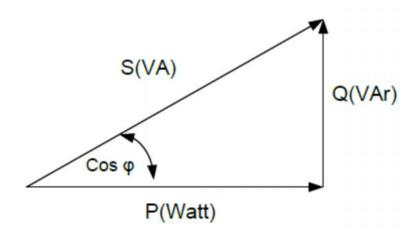
Pengertian faktor daya (cos) adalah perbandingan antara daya aktif (P) dan daya semu (S). Dari pengertian tersebut, faktor daya tersebut dapat dirumuskan sebagai berikut :

Faktor daya = (Daya Aktif / Daya Semu)
$$(2.42)$$

$$= (P/S) \tag{2.43}$$

$$= (V.I. Cos / V.I)$$
 (2.44)

$$= Cos (2.45)$$



Gambar 2.6 Segitiga Daya

$$Daya Semu = V.I (VA)$$
 (2.46)

Daya Aktif =
$$V.I.Cos$$
 (Watt) (2.47)

Daya Reaktif = V.I Sin (VAr)
$$(2.48)$$

6. Arus Netral Karena Beban Tidak Seimbang^{1,2}

Untuk arus tiga fasa dari suatu sistem yang tidak seimbang dapat juga diselesaikan dengan menggunakan metode komponen simetris. Dengan menggunakan notasi-notasi yang sama seperti pada tegangan akan didapatkan persamaan-persamaan untuk arus-arus fasanya sebagai berikut :

$$Ia = I1 + I2 + I0$$
 (2.49)

$$Ib = a^2 I1 + a I2 + I0 (2.50)$$

$$Ic = aI1 + a^2I2 + I0 (2.51)$$

Dengan tiga langkah yang telah dijabarkan dalam menentukan tegangan urutan positif, urutan negative, dan urutan nol terdahulu, maka arus-arus urutan juga dapat ditentukan dengan cara yang sama, sehingga kita dapatkan juga :

$$I1 = 1/3(Ia + a Ib + a^2 Ic)$$
. (2.52)

$$I2 = 1/3(Ia + a^2 Ib + a Ic)$$
 (2.53)

$$I0 = 1/3(Ia + Ib + Ic)$$
 (2.54)

Di sini terlihat bahwa arus urutan nol (I0) adalah merupakan sepertiga dari arus netral atau sebaliknya akan menjadi nol jika dalam sistem tiga fasa empat kawat. Dalam sistem tiga fasa empat kawat ini jumlah arus saluran sama dengan arus netral yang kembali lewat kawat netral, menjadi :

$$IN = Ia + Ib + Ic \tag{2.55}$$

Dengan mensubstitusikan persamaan (2.54) ke (2.55) maka diperoleh :

$$IN = 3 I0$$
 (2.56)

Dalam sistem tiga fasa empat kawat ini jumlah arus dalam saluran sama dengan arus netral yang kembali lewat kawat netral. Jika arus-arus fasanya seimbang maka arus netralnya akan bernilai nol, tapi jika arus-arus fasanya tidak seimbang, maka akan ada arus yang mengalir di kawat netral sistem (arus netral akan mempunyai nilai dalam arti tidak nol)

C. Analisis Aliran Daya⁴

Pengkajian aliran daya sangat berguna untuk perencanaan dan perancangan ekspansi system tenaga dan juga digunakan untuk menentukan kondisi operasi sistem yang paling efisien. Hasil paling mendasar dari pengkajian aliran daya adalah besar dan sudut phasa dari tegangan masing-masing bus serta aliran daya aktif dan reaktif pada tiap saluran. Banyak program aplikasi real time dalam suatu area distribusi otomatis, seperti optimasi jaringan, perencanaan Var, serta switching membutuhkan metode aliran daya yang kokoh dan efisien. Metode aliran daya yang ada seperti Gauss Seidel, Newton Rapson serta Fast-Decouple pada umumnya merupakan metode yang digunakan pada sistem transmisi sedangkan karakteristik system distribusi berbeda dengan sistem transmisi. Sebagaimana diketahui karakteristik dari system distribusi adalah pada umumnya struktur jaringan radial, fasa tidak seimbang, serta banyaknya jumlah dari cabang dan node. Dengan perbedaan tersebut maka metode aliran daya yang ada pada system transmisi bisa menjadi gagal jika diterapkan pada sistem distribusi. Oleh karena itu diperlukan suatu metode untuk menganalisa aliran daya yang sesuai dengan karakteristik sistem distribusi.

1. Aliran Daya Tiga Fasa⁴

Metode tranposisi (pertukaran saluran fasa) tidak lagi dianggap solusi yang disukai untuk mempertahankan keseimbangan antar fasa, sebagai gantinya solusi baru muncul berdasarkan penggunaan daya elektronik .jika sebuah *Thyristor-controlled series compensator* (TCSC) sudah tersedia yang berfungsi mengkompensasi impedansi maka itu akan digunakan dalam kondisi ketidakseimbangan sehingga keseimbangan geometris akan dipulihkan pada titik sambungan. Penerapan dari *Static Var Compensator* (SVC) untuk memulihkan

keseimbangan tegangan , selain untuk memenuhi fungsi utamanya yaitu memberikan dukungan daya reaktif namun hal itu akan menimbulkan adanya arus harmonisa tiga pada sistem AC , solusi alternatif untuk menanggulanginya adalah dengan menggunakan *Static Compensator* (STATCOM) namum ini tidak terlalu signifikan berpengaruh oleh kondisi tegangan terminal AC. Untuk itulah harus dikembangkan suatu metode analisis aliran daya tiga fasa pada sistem yang tidak seimbang.

a. Aliran Daya Dengan Metode Injeksi Arus⁵

Metode injeksi arus adalah metode baru hasil pengembangan dari metode *Newton-Raphson* yang digunakan untuk menyelesaikan masalah aliran daya pada saluran distribusi. Metode injeksi arus bekerja dengan cara menginjeksi arus pada masing-masing *bus* dengan tujuan untuk memperkecil rugi-rugi daya pada saluran distribusi. Adapun proses injeksi arus adalah dengan menggunakan persamaan berikut (da Costa, 1999):

$$I = YE (2.57)$$

I = arus yang diinjeksi pada setiap bus

Y = matriks *Jacobian* dari metode injeksi arus

E = Tegangan pada setiap bus

Metode injeksi arus memiliki struktur matriks *Jacobian* yang identik dengan matriks admitansi *bus* dimana elemen diagonal matriks tersebut di-*update* pada setiap iterasi dan elemen matriks bukan diagonalnya konstan pada setiap iterasi. Matriks bukan diagonal yang konstan menyebabkan metode injeksi arus lebih cepat dibandingkan dengan metode *Newton-Raphson*. Berikut susunan matriks *Jacobian* pada metode injeksi arus (da Costa, 1999):

$$\begin{bmatrix} \Delta I_{m1} \\ \Delta I_{r1} \\ \Delta I_{m2} \\ \Delta I_{r2} \\ \vdots \\ \Delta I_{mn} \\ \Delta I_{rn} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (Y_{11}^*) & Y_{12} & \dots & Y_{1n} \\ Y_{21} & (Y_{22}^*) & \dots & Y_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ Y_{n1} & Y_{n2} & \dots & (Y_{nn}^*) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta V_{r1} \\ \Delta V_{m1} \\ \Delta V_{r2} \\ \Delta V_{m2} \\ \vdots \\ \Delta V_{rn} \\ \Delta V_{mn} \end{bmatrix}$$
(2.58)

Matriks *Jacobian* untuk metode injeksi arus terletak pada elemen matriks admitansi *bus*. Untuk elemen matriks bukan diagonal, susunan matriks *Jacobian*nya adalah (Garcia, 2000):

$$Y_{im} = \begin{bmatrix} B_{im} & G_{im} \\ G_{im} & -B_{im} \end{bmatrix} \tag{2.59}$$

Elemen matriks bukan diagonal tidak mengalami perubahan selama proses iterasi. Struktur matriks *Jacobian* untuk elemen diagonal matriks admitansi *bus* adalah (Garcia, 2000):

$$Y_{kk}^{*} = \begin{bmatrix} B_{kk}^{'} & G_{kk}^{'} \\ G_{kk}^{"} & B_{kk}^{"} \end{bmatrix}$$
 (2.60)

Masing-masing elemen dari matriks *Jacobian* untuk elemen diagonal matriks admitansi *bus* mengalami perubahan selama proses iterasi. Adapun perubahan tersebut diperlihatkan dari persamaan berikut (Garcia, 2000) :

$$B_{kk}^{'}=B_{kk}-a_k \tag{2.61}$$

$$G_{kk}^{'}=G_{kk}-b_k \tag{2.62}$$

$$G_{kk}^{"}=G_{kk}-c_k \tag{2.63}$$

$$B_{kk}^{"}=B_{kk}-d_k$$
 (2.64)

Dengan nilai dari masing-masing a_k, b_k, c_k dan d_k didapat dari persamaan berikut:

$$a_{k} = \frac{Q_{k}^{'}(V_{rk}^{2} - V_{mk}^{2}) - 2V_{rk}V_{mk}P_{k}^{'}}{V_{k}^{4}}$$
(2.65)

$$b_{k} = \frac{P_{k}^{'}(V_{rk}^{2} - V_{mk}^{2}) + 2V_{\tau k}V_{mk}Q_{k}^{'}}{V_{k}^{4}}$$
(2.66)

$$c_k = -b_k \tag{2.67}$$

$$d_k = a_k \tag{2.68}$$

Matriks admitansi tersebut nantinya digunakan untuk menghitung besarnya injeksi arus yang harus diberikan pada masing-masing *bus* (Garcia, 2000).

b. Persamaan Untuk Pq Bus⁵

Matriks *Jacobian* pada metode injeksi arus digunakan untuk menghitung rugirugi arus pada setiap *bus*. Rugi-rugi arus pada *bus* k diperlihatkan pada persamaan berikut (Garcia, 2000):

$$\Delta I_k^2 = \frac{P_k^{sp} - jQ_k^{sp}}{(E_k)^*} - \sum_{i=1}^n Y_{ki} E_i = 0$$
 (2.69)

dengan:

$$E_k = V_{rk} + jV_{mk} \tag{2.70}$$

$$P_k^{sp} = P_{qk} + P_{lk} \tag{2.71}$$

$$Q_k^{sp} = Q_{qk} + Q_{lk} \tag{2.72}$$

dengan:

 $P_k^{sp},\,Q_k^{sp}$ - spesifikasi daya aktif dan reaktif pada bus k

 P_{gk} , Q_{gk} - daya aktif dan reaktif generator

 P_{lk} , Q_{lk} - daya aktif dan reaktif beban

 $Y_{ki} = G_{ki} + jB_{ki}$ - elemen matrik *admitansi bus*

disederhanakan menjadi:

$$\Delta I_{rk} = \left(I_{rk}^{sp}\right) - \left(I_{rk}^{calc}\right) \tag{2.73}$$

$$\Delta I_{mk} = \begin{pmatrix} I_{mk}^{sp} \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} I_{mk}^{calc} \end{pmatrix} \tag{2.74}$$

Sehingga besarnya rugi-rugi daya aktif dan reaktif pada setiap *bus* sesuai dengan persamaan berikut :

$$\Delta Q_k = \left(Q_k^{sp}\right) - \left(Q_k^{calc}\right) \tag{2.75}$$

$$\Delta P_k = \left(P_k^{sp}\right) - \left(P_k^{calc}\right) \tag{2.76}$$

Daya aktif dan reaktif yang dihitung Pcalc didapat dari persamaan berikut :

$$(P_k^{calc}) = V_{rk}(I_{rk}^{calc}) + V_{mk}(I_{mk}^{calc})$$
(2.77)

$$(Q_k^{calc}) = V_{rk}(I_{rk}^{calc}) - V_{mk}(I_{mk}^{calc})$$
(2.78)

Dari persamaan diatas, maka persamaan arus injeksi bisa dirumuskan sebagai berikut:

$$\Delta I_{rk} = \frac{V_{rk}\Delta P_k + V_{mk}\Delta Q_k}{(V_{rk})^2 + (V_{mk})^2} \tag{2.79}$$

$$\Delta I_{mk} = \frac{V_{mk} \Delta P_k + V_{rk} \Delta Q_k}{(V_{rk})^2 + (V_{mk})^2} \tag{2.80}$$

Dengan nilai tegangan
$$V_k^2 = V_{rk}^2 + V_{mk}^2$$
 (2.81)

c. Koreksi Tegangan Bus⁵

Koreksi tegangan bus pada koordinat kutub, dengan iterasi umum (h+1) adalah :

$$V_k^{h+1} = V_k^h + \Delta V_k^h \tag{2.82}$$

$$\theta_k^{h+1} = \theta_k^h + \Delta \theta_k^h \tag{2.83}$$

$$\Delta V_k = \frac{V_{rk}}{V_k} \Delta V_{rk} + \frac{V_{mk}}{V_k} \Delta V_{mk} \tag{2.84}$$

$$\Delta\theta_k = \frac{V_{rk}}{V_k^2} \Delta V_{mk} + \frac{V_{mk}}{V_k^2} \Delta V_{rk} \tag{2.85}$$

Persamaan di atas adalah linearisasi dari :

$$\theta_k = tan^{-1} \frac{V_{mk}}{V_{rk}} \tag{2.86}$$

Fitur penting pada formula Injeksi Arus adalah sebagian besar dari blok (2 x2) matriks *Jacobian* tanpa perubahan selama proses. Diagonal blok (2x2), mempunyai spesifik beban selain dari beban impedansi, harus di-*update* pada setiap iterasi (daCosta, 1999).

2. Rugi-rugi daya pada saluran dan trafo distribusi¹

Yang dimaksud rugi-rugi daya/ losses adalah perbedaan antara energi listrik yang disalurkan (PS) dengan energi listrik yang terpakai (PP)

$$Losses = (PS - PP) / PS$$
 (2.87)

Dimana:

PS = Energi yang disalurkan (watt)

PP = Energi yang dipakai (watt)

a. Losses Pada Penghantar Phasa¹

Jika suatu arus mengalir pada suatu penghantar, maka pada penghantar tersebut akan terjadi rugi-rugi energi menjadi panas karena pada penghantar tersebut terdapat resistansi. Rugi-rugi dengan beban terpusat di ujung dirumuskan sebagai berikut:

$$V = 3 I (R Cos + X Sin) l$$
 (2.88)

$$P = 3 I^2 R l$$
 (2.89)

Dengan:

I = Arus per phasa (Ampere)

R = Tahanan pada penghantar (Ohm / km)

X = Reaktansi pada penghantar (Ohm / km)

Cos = Faktor daya beban

l = Panjang penghantar (km)

b. Losses pada Transformator⁶

Transformator merupakan suatu alat listrik yang mengubah tegangan arus bolak-balik dari satu tingkat ke tingkat yang lain melalui suatu gandengan magnet dan berdasarkan prinsip-prinsip induksi-elektromagnet. Transformator terdiri atas sebuah inti, yang terbuat dari besi berlapis dan dua buah kumparan, yaitu kumparan primer dan kumparan sekunder. Penggunaan transformator yang sederhana dan handal memungkinkan dipilihnya tegangan yang sesuai dan ekonomis untuk tiap-tiap keperluan serta merupakan salah satu sebab penting bahwa arus bolak-balik sangat banyak dipergunakan untuk pembangkitan dan penyaluran tenaga listrik. Prinsip kerja transformator adalah berdasarkan hukum Ampere dan hukum Faraday, yaitu: arus listrik dapat menimbulkan medan magnet dan sebaliknya medan magnet dapat menimbulkan arus listrik. Jika pada salah satu kumparan pada transformator diberi arus bolakbalik maka jumlah garis gaya magnet berubah-ubah, sehingga pada sisi primer terjadi induksi dan sisi sekunder menerima garis gaya magnet dari sisi primer yang jumlahnya berubah-ubah pula. Maka di sisi sekunder juga timbul induksi, akibatnya antara dua ujung terdapat beda tegangan. Daya transformator bila ditinjau dari sisi tegangan tinggi (primer) dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$S = 3 . V . I$$
 (2.90)

dimana:

S = daya transformator (kVA)

23

V = tegangan sisi primer transformator (kV)

I = arus jala-jala (A)

Sehingga untuk menghitung arus beban penuh (*full load*) dapat menggunakan rumus:

$$IFL = S / 3V \tag{2.91}$$

dimana:

IFL = arus beban penuh (A)

S = daya transformator (kVA)

V = tegangan sisi sekunder transformator (kV)

Sebagai akibat dari ketidakseimbangan beban antara tiap-tiap fasa pada sisi sekunder trafo (fasa R, fasa S, fasa T) mengalirlah arus di netral trafo. Arus yang mengalir pada penghantar netral trafo ini menyebabkan *losses* (rugi-rugi).

1. Losses Akibat Adanya Arus Netral Pada Penghantar Netral⁶

Akibat pembebanan di tiap phasa yang tidak seimbang, maka akan mengalir arus pada penghantar netral. Jika di hantaran pentanahan netral terdapat nila tahanan dan dialiri arus, maka kawar netral akan bertegangan yang menyebabkan tegangan pada trafo tidak seimbang. Arus yang mengalir di sepanjang kawat netral, akan menyebabkan rugi daya di sepanjang kawat netral sebesar:

$$PN = IN^2 RN (2.92)$$

Dimana:

PN = Losses yang timbul pada penghantar netral (watt)

IN = Arus yang mengalir melalui kawat netral (Ampere)

RN = Tahanan pada kawat netral (Ohm)

2. Losses Akibat Arus Netral yang Mengalir ke Tanah⁶

Losses ini terjadi karena adanya arus netral yang mengalir ke tanah., Besarnya dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$PG = IG^2 RG (2.93)$$

Dimana:

PG = *losses* akibat arus netral yang mengalir ke tanah (watt)

IG = Arus netral yang mengalir ke tanah (Ampere)

RG = Tahanan pembumian netral trafo (Ohm)

3. perhitungan ketidakseimbangan beban^{6,7}

$$I_{\text{rata-rata}} = \frac{I_a + I_b + I_c}{3} \tag{2.94}$$

Dimana besarnya arus fasa dalam keadaan seimbang (I) sama dengan besarnya arus rata-rata, maka koefisien a, b dan c diperoleh dengan :

$$a = \frac{I_a}{I} \tag{2.95}$$

$$b = \frac{\mathbf{I_b}}{I} \tag{2.96}$$

$$c = \frac{I_c}{I} \tag{2.97}$$

Pada keadaan seimbang, besarnya koefisien a, b dan c adalah 1. Dengan demikian rata-rata ketidakseimbangan beban (dalam %) adalah :

$$= \frac{\{|a-1|+|b-1|+|c-1|\}}{3} \times 100\%$$
 (2.98)

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

A. Waktu dan tempat penelitian

Pengerjaan tugas akhir ini bertempat di Rumah dan Laboraturium Konversi Energi Elektrik Jurusan Teknik Elekto Universitas Lampung pada April 2014 sampai dengan bulan september 2015.

B. Alat dan Bahan

Adapun peralatan dan bahan-bahan yang digunakanpada penelitian ini adalah sebagai berikut:

- 1. Satu unit laptop dengan spesifikasi intel Pentium dual core prosesor 1GHz dengan sistem operasi windows 7.
- 2. Perangkat lunak ETAP 7.5 sebagai alat bantu untuk analisis aliran daya 3 fasa pada sistem Distribusi radial dan ketidakseimbangan beban.
- 3. Data dari PT. PLN (persero)

C. Metode yang digunakan

Dalam menganalisa aliran daya tiga fasa dengan menggunakan sistim distribusi radial metode injeksi arus dengan beban yang tidak seimbang, dan pengaruhnya pada saluran dan transformator distribusi, dengan bantuan software ETAP 7.5 sebagai perangkat lunak untuk simulasi aliran daya tiga fasa.

1. Studi literatur

Studi literatur dimaksudkan untuk mempelajari berbagai sumber referensi atau teori (buku, paper, dan internet) yang berkaitan dengan aplikasi penelitian untuk menganalisis dan mensimulasikan aliran daya tiga fasa metode injeksi arus sistem distribusi tipe radial dan ketidakseimbangan beban terhadap rugi-rugi daya dan pengarunya pada *transformator* distribusi.

2. Pengambilan data

pada tahap ini dimaksudkan untuk mengambil data dimana data yang nantinya akan diolah untuk simulasi dan perhitungan aliran daya tiga fasa system distribusi tipe radial dan ketidakseimbangan beban terhadap rugi-rugi daya dan pengaruhnya pada penghantar maupun transformator dirtribusi adapun untuk data yang digunakan adalah:

- a. data saluran berupa resistansi (R), reaktansi (X)dengan impedansi urutan positif (+) dan urutan nol (0), jenis penhantar yang digunakan
- b. data dari PLN pada penyulang badai berupa arus, cos phi
- c. kapasitas masing masing transformator distribusi pada penyulang badai
- d. single line diagram penyulang badai Gardu induk teluk betung Bandar lampung

3. Pemodelan saluran distribusi

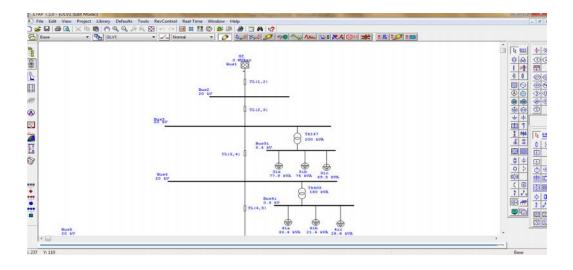
Pada pemodelan saluran distribusi menggunakan tipe radial merupakan jaringan sistem distribusi primer yang sederhana dan murah biaya investasinya. Pada jaringan ini arus yang paling besar adalah yang paling dekat dengan Gardu Induk. Tipe ini dalam penyaluran energi listrik kurang handal karena bila terjadi gangguan pada penyulang maka akan menyebabkab terjadinya pemadaman pada penyulang tersebut.

4. Penyelesaian aliran daya 3 phasa

Dalam sistem distribusi tenaga listrik sering terjadi gangguan baik dalam keadaan seimbang atau tidak seimbang. sebuah sistem distribusi tenaga yang seimbang harus memenuhi persaratan sebagai berikut sumber tegangan tiga fasa harus seimbang beban tiga fasa simetris saluran tiga fasa mempunyai impedansi sendiri yang sama jika salah satu sarat tidak terpenuhi maka sistem dikatakan tidak seimbang dalam kondisi ketidakseimbangan berdasarkan beban harus diberi perlakuan khusus diperlukan untuk memecahkan jaringan aliran daya tiga fasa yang tidak seimbang tersebut.

a. ETAP (Electrical Transient Analysis Program)

ETAP dapat melakukan penggambaran single line diagram secara grafis dan mengadakan beberapa analisis/studi yakni Load Flow (aliran daya), Short Circuit (hubung singkat), motor starting, harmonics power sistems, transient stability, dan protective device coordination.



Gambar 3.1 Tampilan program ETAP 7.5.0

Dalam pembahasan penelitian, penulis melakukan metoda untuk mendapatkan tujuan dari pembahasan ini. Dari data-data yang diperoleh, Penulis melakukan perhitungan dan analisa aliran daya menggunakan metoda injeksi arus dan dibantu dengan program ETAP 7.5.

b. Langkah-Langkah Simulasi Aliran Daya Tiga Fasa

Analisis aliran daya tiga fasa dengan menggunakan metode injeksi arus mengikuti langkah-langkah berikut:

- 1) Memodelkan single line diagram sistim distribusi dengan tipe radial
- 2) Membentuk parameter-parameter dari bus yaitu bus tipe ,nomor bus, magnitude tegangan, sudut fasanya dan daya aktif dan reaktif pada masing-masing bus beban
- 3) Memasukan data penyulang ke ETAP
- 4) Memulai simulasi aliran daya tiga fasa

a. perhitungan ketidakseimbangan beban

$$I_{\text{rata-rata}} = \frac{I_a + I_b + I_c}{3} \tag{3.1}$$

Dimana besarnya arus fasa dalam keadaan seimbang (I) sama dengan besarnya arus rata-rata, maka koefisien a, b dan c diperoleh dengan :

$$a = \frac{I_a}{I} \tag{3.2}$$

$$b = \frac{I_b}{I} \tag{3.3}$$

$$b = \frac{I_b}{I}$$

$$c = \frac{I_c}{I}$$
(3.3)

Pada keadaan seimbang, besarnya koefisien a, b dan c adalah 1. Dengan demikian rata-rata ketidakseimbangan beban (dalam %) adalah :

$$= \frac{\{|a-1|+|b-1|+|c-1|\}}{3} \times 100\%$$
 (3.5)

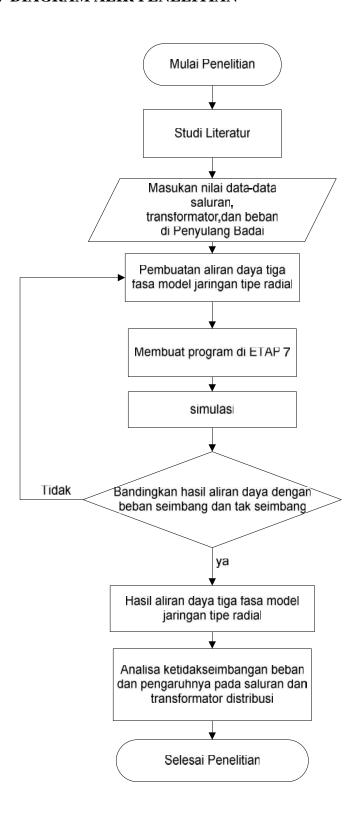
b. Perhitungan arus netral

$$IN = Ia + Ib + Ic (3.6)$$

$$= [I] \{a - (b + c) / 2 + j. (c - b) \quad 3 / 2\}$$
(3.7)

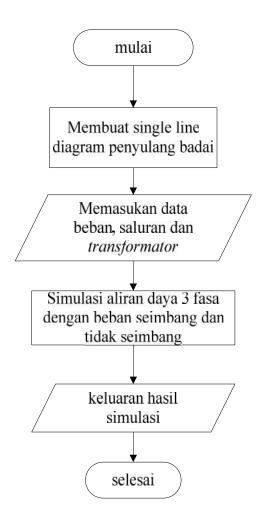
Dengan Ia,Ib,Ic merupakan arus di masing-masing fasa, sedangkan a,b,c merupakan koefisien ketidakseimbangan di masing masing fasa.

D. DIAGRAM ALIR PENELITIAN



Gambar 3.2 Diagram penelitian

E. DIAGRAM ALIR PROGRAM



Gambar 3.3 Diagram Alir Program

V. KESIMPULAN DAN SARAN

A. KESIMPULAN

Dari penelitian yang telah di lakukan dapat di ambil beberapa kesimpulan yaitu:

- 1. Dari hasil simulasi dan perhitungan terdapat beberapa bus yang melewati batas ketidakseimbangan yang diizinkan yaitu bus 6i 30.44%, bus 11i 70.11%, bus 25i 37.9% ,bus 26i 28.69%,bus 35i 33.55% dan bus 52i 76.91%
- 2. Arus netral yang timbul akibat ketidakseimbangan beban yang terbesar yaitu pada bus 14i yaitu 338.37 A tetapi memiliki % ketidakseimbangan yang masih di bawah standar yaitu 23.76% hal itu di sebabkan pada bus tersebut memiliki kapasitas beban yang cukup besar yaitu 595.6A fasa a, 758.9 A fasa b, dan 369.9 A fasa c.
- 3. Dari hasil simulasi aliran daya tiga fasa dengan beban yang seimbang dan tidak seimbang losses yang terjadi di penghantar yang terbesar pada TL(2.3) yaitu 40.22418Kw dan 31.18086Kvar pada beban seimbang dan 40.32266Kw dan 31.25691Kvar.
- 4. Ketidakseimbangan beban mempengaruhi losses yang terjadi baik di penghantar maupun trafo semakin besar ketidakseimbangan semakin besar juga losses yang dihasilkan.
- 5. Losses dan jatuh tegangan yang terjadi pada penghantar maupun transformator masih dalam batas standar yaitu dibawah 5%
- 6. Dampak yang timbul akibat ketidakseimbangan beban pada bus yang memiliki % ketidakseimbangan yang terbesar yaitu pada bus 52i sebesar 76.91 % adalah menghasilkan arus netral 60.87 A, losses pada pengahntar

yang menuju bus tersebut TL (51.52) adalah nol dan losses pada transformator TK663 adalah 0.2 KW + 0.4 Kvar .

B. Saran

- 1. Pengukuran data beban sebaiknya dilakukan di saat bersamaan dan dilakukan di sisi beban.
- 2. Penambahan atau pemasangan beban baru merupakan faktor penyebab terjadinya ketidakseimbangan beban, hal ini dapat mengakibatkan jatuh tegangan diatas toleransi (+5%) oleh sebab itu setiap penambahan beban perlu memperhatikan dan menghitung arus beban setiap fasa sebelum pemasangan.
- 3. Losses pada penghantar dan transformator dapat dikurangi dengan pemerataan beban pada masing-masing fasa.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Ali mas 'Adi. 2011. "Pengaruh Ketidakseimbangan Beban Terhadap Arus Netral Dan Losses Pada Trafo Distribusi Proyek Rusunami Gading Icon". Skripsi. Fakultas Teknik Industri, Teknik Elektro, Universitas Mercu Buana Jakarta.
- [2] Stevenson, William .D, Jr. Edisi Keempat. 1993. *Analisis Sistem Tenaga Listrik*. Erlangga , Jakarta
- [3] Grainger, John.J and William D. Stevenson, Jr .Electrical Enginering Series. 1994. *Power System Analysis*. McGRAW-Hill International. New York
- [4] Birt, Grafity, and McDonald, 1976; Chen et al., 1990; Laughton and Saleh, 1985; Smith and Arrillaga,1998
- [5] Manuaba, IBG dan Kadek Amerta Yasa. 2009. "Analisa Aliran Daya Dengan Metode Injeksi Arus Pada Sistem Distribusi 20 Kv". Jurnal Teknik Elektro. 8.1. hal. 1-6
- [6] Setiadji, Julius Sentosa dan Tabrani Machmudsyah dan Yanuar Isnanto. 2006. "Pengaruh Ketidakseimbangan Beban Terhadap Arus Netral dan Losses pada Trafo Distribusi". Jurnal Teknik Elektro. 6. 1. hal. 68-73
- [7] Sinaga, Rolly Elmondo dan Panusur S.M.L. Tobing. 2014. "Studi Tentang Pengukuran Parameter Trafo Distribusi Dengan Menggunakan Emt (Electrical Measurement & Data Transmit)". Jurnal Teknik Elektro. 8. 3. hal. 122-133
- [8] SPLN 64: 1995. "Impedansi Kawat Penghantar". Perusahaan Listrik Negara.
- [9] SPLN 72: 1987. "Spesifikasi Desain Untuk Jaringan Tegangan Menengah (JTM) dan Jaringan Tegangan Rendah (JTR)". Perusahaan Listrik Negara
- [10] SPLN 50: 1997. "Spesifikasi Trafo Distribusi". Perusahaan Listrik Negara