

**TUGAS AKHIR****“ANALISIS KETIDAKSEIMBANGAN BEBAN TERHADAP KERJA  
RELE  
GANGGUAN TANAH PADA GARDU INDUK NAMURAMBE”**

*Diajukan Untuk Memenuhi Persyaratan Memperoleh Gelar Sarjana Teknik  
(ST)*

*Pada Program Studi Teknik Elektro Fakultas Teknik  
Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara*

**Diajukan Oleh :**

**AMRUL HAMID**  
**NPM : 1307220031**



**PROGRAM STUDI TEKNIK ELEKTRO  
FAKULTAS TEKNIK  
UNIVERSITAS MUHAMMADIYAH SUMATERA UTARA  
MEDAN  
2017**

**LEMBAR PENGESAHAN  
TUGAS AKHIR**

**“ANALISIS KETIDAKSEIMBANGAN BEBAN TERHADAP KERJA RELE  
GANGGUAN TANAH PADA GARDU INDUK NAMURAMBE”**

*Diajukan Untuk Memenuhi Persyaratan Memperoleh Gelar Sarjana Teknik (ST)  
Pada Program Studi Teknik Elektro Fakultas Teknik  
Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara*

**Disusun Oleh :**

**AMRUL HAMID**  
**NPM : 1307220031**

Telah Diuji dan Disahkan Pada Tanggal  
11 Oktober 2017

Pembimbing I

**(Ir. Yusniati, M.T.)**

Pembanding I

**(Rohana, S.T., M.T.)**

Pembimbing II

**(Faisal Irsan Pasaribu, S.T., M.T.)**

Pembanding II

**(Elvy Sahnur Nst, S.T., M.Pd.)**

**Diketahui dan Disahkan  
Program Studi Teknik Elektro  
Ketua,**

**(Faisal Irsan Pasaribu, S.T., M.T.)**

**PROGRAM STUDI TEKNIK ELEKTRO  
FAKULTAS TEKNIK  
UNIVERSITAS MUHAMMADIYAH SUMATERA UTARA  
MEDAN**

2017

**PERNYATAAN KEASLIAN**

**TUGAS AKHIR**

Saya menyatakan dengan sesungguhnya bahwa Tugas Akhir ini dengan judul **“ANALISA KETIDAKSEIMBANGAN BEBAN TERHADAP KERJA RELE GANGGUAN TANAH PADA GARDU INDUK NAMURAMBE”** yang di buat untuk memenuhi persyaratan kelulusan Strata Satu (S1) pada Jurusan Teknik Elektro, Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara, sesungguhnya karya ini merupakan hasil observasi, wawancara, pemikiran dan pemaparan asli dari saya.

Jika terdapat referensi terhadap hasil karya atau pihak lain, penulis menyertakannya dengan menyebutkan sumber secara jelas.

Demikian pernyataan ini penulis buat secara sadar dan sungguh-sungguh, semoga Tugas Akhir ini dapat dipergunakan untuk mengembangkan ilmu bagi yang membutuhkan.

Atas perhatian dan kerjasamanya penulis ucapkan terimakasih

Penulis

Amrul Hamid

NPM. 1307220031

## **ABSTRAK**

*Ketidakseimbangan beban ditandai dengan tidak seimbangya aliran arus pada masing-masing fasa dalam sistem tiga fasa, hal ini disebabkan oleh mengalirnya arus urutan nol (arus residu) pada sistem yang ditanahkan (ground), dalam hal ini arus urutan nol (arus residu) disebut juga sebagai arus gangguan tanah. Analisa sistem tidak seimbang dapat dilakukan dengan menggunakan metode komponen simetris, didalam komponen simetris ini terdapat tegangan, arus dan impedansi. Dari komponen tersebut diuraikan menjadi urutan positif, negatif, dan urutan nol. Arus urutan nol yang terjadi pada sistem daya listrik merupakan indikator untuk mendeteksi suatu gangguan tanah. Deteksi ini dapat dilakukan dengan menggunakan Ground Fault Relay (GFR). Dari hasil analisa diperoleh faktor ketidakseimbangan beban 137,21% dalam keadaan pembebanan dimana phasa A =  $180,88 \angle 51,76^\circ$  Amp, phasa B =  $186,85 \angle 289,05^\circ$  Amp dan phasa C =  $440,79 \angle 181,63^\circ$  Amp. Rele gangguan tanah bekerja berdasarkan setting arus dan waktu kerja yang telah disesuaikan dimana penentuan arus setting berdasarkan nilai Neutral Ground Resistance (NGR) 1000 A selama 10 detik, berdasarkan hasil perhitungan diperoleh arus gangguan hubung singkat satu fasa ke tanah  $143,59 \angle 80,54^\circ$  Amp. Nilai ini membuat Ground Fault Relay (GFR) bekerja karena telah mencapai nilai setting arus pada rele tersebut.*

**Kata Kunci : Ketidakseimbangan beban, Rele, GFR, Gardu Induk.**

## KATA PENGANTAR



Puji syukur penulis panjatkan ke hadirat Allah SWT yang telah melimpahkan rahmat dan karunia-Nya, sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi dengan sebatas ilmu dan kemampuan yang penulis miliki, sebagai tahap akhir dalam menyelesaikan studi pada Program Studi Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara. Dengan segenap perjuangan dan tindakan akhirnya penulis dapat menyelesaikan skripsi ini dengan judul **“ANALISA KETIDAKSEIMBANGAN BEBAN TERHADAP KERJA RELE GANGGUAN TANAH PADA GARDU INDUK NAMURAMBE”**

Dalam penyusunan skripsi, penulis telah banyak menerima bantuan dan bimbingan dari berbagai pihak. Untuk itu dalam kesempatan ini penulis dengan setulus hati berkeinginan untuk mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada :

1. Teristimewa buat Ayahanda Abdul Leman, Ibunda Jumiah, Adik saya Putri Maulya, yang telah banyak memberikan doa, nasehat, dorongan baik moril maupun materil sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi ini.
2. Bapak Rahmatullah,S.T.,M.Sc., selaku Dekan Fakultas Teknik Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara.
3. Bapak Faisal Irsan Pasaribu,S.T.,M.T., sebagai Ketua Program Studi Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara.
4. Ibu Ir. Yusniati,M.T., sebagai Dosen Pembimbing I.
5. Bapak Faisal Irsan Pasaribu,S.T.,M.T., sebagai Dosen Pembimbing II.

6. Seluruh teman-teman, dosen-dosen dan segenap aktifitas akademika Program Studi Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara.

Penulis menyadari bahwa dalam penulisan skripsi ini masih banyak terdapat kekurangan. Untuk itu, penulis sangat mengharapkan kritik dan saran yang sifatnya membangun demi kesempurnaan skripsi ini dimasa yang akan datang.

Akhirnya kepada Allah SWT penulis berserah diri semoga kita selalu dalam lindungan serta limpahan rahmat-Nya dengan kerendahan hati penulis berharap semoga penulisan skripsi ini dapat bermanfaat bagi pembaca pada umumnya dan penulis khususnya.

Medan, .. ..... 2017

Penulis

Amrul Hamid  
1307220031

# DAFTAR ISI

Halaman

## LEMBAR PENGESAHAN

## PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR

<b>ABSTRAK</b> .....	<b>i</b>
<b>KATA PENGANTAR</b> .....	<b>ii</b>
<b>DAFTAR ISI</b> .....	<b>iv</b>
<b>DAFTAR GAMBAR</b> .....	<b>vii</b>
<b>DAFTAR TABEL</b> .....	<b>viii</b>
<b>DAFTAR LAMPIRAN</b> .....	<b>ix</b>

<b>BAB I PENDAHULUAN</b> .....	<b>1</b>
1.1. Latar Belakang .....	1
1.2. Rumusan Masalah .....	3
1.4. Tujuan Penelitian .....	3
1.3. Batasan Masalah .....	4
1.5. Manfaat Penelitian .....	4

<b>BAB II TINJAUAN PUSTAKA</b> .....	<b>5</b>
2.1. Tinjauan Pustaka Relevan .....	5
2.2. Sistem Komponen Simetris .....	6
2.2.1. Operator a .....	7
2.2.2. Komponen simetris fasor tak simetris .....	8
2.2.3. Impedansi urutan .....	11
2.3. Sistem Tak Seimbang Dengan metode Komponen Simetris .....	13
2.4. Pengertian Beban Tak Seimbang .....	15
2.5. Beban Tak Seimbang Pada Sistem Yang Memuat Bagian yang Tak Seimbang .....	17
2.6. Pemutus Tenaga (PMT) .....	19
2.7. Rele Gangguan Tanah (Ground Fault Relay) .....	21
2.7.1. Prinsip Kerja Rele Gangguan Tanah .....	23

2.7.2. Rele Arah Gangguan Tanah ( <i>Directional earth fault relay</i> ).....	25
2.7.3. Proteksi Gangguan Tanah Pada Sistem Yang Diketanahkan Langsung .....	28
2.7.4. Proteksi Terhadap Gangguan Tanah Pada Sistem yang Netralnya Tidak Diketanahkan .....	30
2.7.5. Penunjukan Atas Adanya Gangguan Tanah .....	30
2.7.6. Proteksi Untuk Melokalisir Titik Gangguan Tanah .....	32
2.7.7. Hal-Hal Yang Menyebabkan Ketidakbenaran Operasi Dari Rele Gangguan Tanah .....	34
<b>BAB III METODE PENELITIAN .....</b>	<b>35</b>
3.1. Jenis Penelitian .....	35
3.2. Tempat Dan Waktu Penelitian .....	35
3.2.1. Tempat Penelitian .....	35
3.2.2. Waktu Penelitian .....	35
3.3. Metode Pengumpulan Data Penelitian .....	36
3.4. Diagram alir (Flowchart) .....	37
3.5. Analisa data Penelitian .....	38
3.5.1. Data Peralatan .....	39
3.5.2. Data Teknis .....	40
3.5.3. Data Trafo GI Namorambe .....	41
<b>BAB IV ANALISA DAN HASIL PEMBAHASAN .....</b>	<b>42</b>
4.1. Pengaruh Ketidak Seimbangan Beban Terhadap Kerja Rele Gangguan Tanah .....	42
4.2. Kondisi Beban Dan Sistem Yang Ditanahkan .....	42
4.3. Hubungan Arus Residu Dengan Rele Gangguan Tanah .....	43
4.4. Batasan Ketidak Seimbangan Beban Yang Dapat Mempengaruhi Kerja Rele Gangguan Tanah .....	45
4.5. Rele Gangguan Tanah Pada Gardu Induk.....	46
4.5.1. Rangkaian Rele Pada Gardu Induk .....	46

4.5.2. Setting Arus dan Waktu Kerja Rele Gangguan Tanah.....	47
4.5.2.1. Perhitungan Setting Arus dan Waktu Kerja Rele Gangguan Tanah .....	49
4.5.2.2. Rele Arah Gangguan Tanah ( <i>Directional Earth Fault             Relay</i> ) .....	53
4.5.2.3. Perhitungan Ketidakseimbangan Beban Fasa Pada Gardu Induk Namurambe.....	54
4.5.2.4. Perhitungan Arus Gangguan Hubung Singkat 1 Fasa ke Tanah.....	56
<b>BAB V PENUTUP</b> .....	<b>58</b>
5.1. Kesimpulan .....	58
5.1. Saran .....	59

## **DAFTAR PUSTAKA**

## **LAMPIRAN**

## DAFTAR GAMBAR

	Halaman
Gambar 2.1. Tiga himpunan fasor seimbang yang merupakan komponen simetris dari fasor tak seimbang .....	7
Gambar 2.2. Diagram fasor berbagai pangkat dari operator $a$ . .....	8
Gambar 2.3. Diagram satu garis sistem yang tidak simetris .....	13
Gambar 2.4. Hubungan bintang dan hubungan delta .....	16
Gambar 2.5. Diagram sistem beban tidak seimbang .....	17
Gambar 2.6. Rele Gangguan Tanah (GFR) .....	23
Gambar 2.7. Transformator arus hubungan residu .....	24
Gambar 2.8. Transformator Arus netral pada sistem yang diketanahkan .....	25
Gambar 2.9. Beberapa metode untuk memperoleh tegangan residu atau tegangan netral ke tanah .....	26
Gambar 2.10. Diagram vektor dari tegangan dan arus dalam rele arah gangguan tanah .....	27
Gambar 2.11. Untuk melayani arus urutan nol dari gangguan tanah itu. ....	29
Gambar 2.12. Koordinasi Rele .....	32
Gambar 2.13. Sistem yang terdiri dari dua buah saluran dengan panjang yang sangat berbeda .....	34
Gambar 3.1. Diagram Alir Proses Penelitian .....	37
Gambar 3.2. Alat Kordinasi Proteksi GI Namorambe .....	39
Gambar 3.3. Gambar Data Beban Tidak Seimbang .....	40
Gambar 3.4. Data Trafo TD 1 Gardu Induk Namorambe .....	41
Gambar 4.1. Rangkaian Rele .....	46
Gambar 4.2. GFR Pada 3 Fasa GI , GFR ( <i>Ground Fault Relay</i> ) .....	47
Gambar 4.3. Diagram satu garis rangkaian Rele Gangguan Tanah.....	47

## DAFTAR TABEL

	Halaman
Tabel 3.1 Jadwal Penelitian .....	36

## **DAFTAR LAMPIRAN**

Lampiran 1. Surat Izin Pengambilan Data

Lampiran 2. Data Peralatan Koordinasi Proteksi GI Namurambe

Lampiran 3. Data Trafo TD 1 GI Namurambe

Lampiran 4. Data Setting Relay Trafo Daya

Lampiran 5. Data Dalam Keadaan Gangguan

Lampiran 6. Penulisan Dalam Bentuk Jurnal

# BAB I

## PENDAHULUAN

### 1.1. Latar Belakang

Ketidakseimbangan beban merupakan suatu hal yang terjadi pada distribusi tenaga listrik terutama pada sisi jaringan tegangan rendah, semakin tingginya ketidakseimbangan beban maka akan semakin tinggi pula arus yang timbul pada penghantar netral. Arus yang mengalir pada penghantar netral membawa dampak negatif (rugi-rugi) bagi perusahaan.

Penyeimbangan beban merupakan suatu rutinitas yang harus dilakukan oleh Petugas operator PLN dalam jaringan distribusi, selama penyeimbangan beban dilakukan pada Waktu Beban Puncak (WBP) saja. Sehingga kegiatan penyeimbangan beban pada jaringan distribusi belum menjamin tercapainya keseimbangan beban di titik Luar Waktu Beban Puncak (LWBP). Penyeimbangan juga dilakukan dengan *trial and error*. Tentunya hal ini tidak efektif dan efisien baik dari segi hasil yang diinginkan dan waktu yang digunakan. Berkaca dari hal tersebut, perlu dilakukan penyeimbangan beban WBP dan LWBP disertai besaran beban terukur sebagai dasar penyeimbangan. Penyeimbangan dilakukan dengan metode SBS (seimbang beban seharian). Sistem distribusi tiga fasa sangat mempengaruhi keseimbangan sistem distribusi, apabila terjadi ketidakseimbangan beban maka akan berdampak negatif, baik beban maupun lingkungan disekitar sistem. Ketidakseimbangan sistem dapat disebabkan oleh impedansi fasa yang tidak seimbang. Hantaran udara formasi dari tiga hantaran pada tiga fasa akan mempengaruhi impedansi masing-masing fasanya.

Dalam menganalisa ketidakseimbangan sistem, keandalan sistem dan beban diperlukan. Analisa sistem tidak seimbang dilakukan dengan menggunakan metode komponen simetris, dari komponen simetris ini terdapat tegangan, arus dan impedansi. Dari komponen tersebut diuraikan menjadi urutan positif, negatif, dan nol. Arus tegangan urutan nol yang terjadi pada sistem daya listrik merupakan indikator untuk mendeteksi suatu gangguan tanah. Deteksi ini dapat dilakukan dengan menggunakan rele yaitu rele gangguan tanah.

Rele gangguan tanah akan bekerja bila terjadi aliran arus urutan nol (residu) pada rele gangguan tanah. Untuk mendapatkan arus yang meresidu ini ada beberapa metode yang harus dipergunakan dan salah satu ada yang ketidakseimbangan arus satu fasa yang terjadi akibat gangguan fasa ke tanah.

Ketidakseimbangan beban ditandai dengan tidak seimbangny aliran arus masing-masing fasa dalam sistem tiga fasa. Dari keterkaitan ini tampak bahwa ketidakseimbangan beban dapat menyebabkan terjadinya aliran arus residu pada rele gangguan tanah (*"Johannes Rimson Turnip : 2016"*). Pada tugas akhir ini juga akan membahas ketidakseimbangan beban terhadap kerja rele gangguan tanah di fokuskan menganalisa permasalahan yang ada di gardu induk Namurambe. Arus yang mengalir pada penghantar netral terdeteksi oleh rele akan menjadi rugi daya listrik pada jaringan distribusi, oleh karena itu dalam pendistribusian tenaga listrik ketidakseimbangan beban harus di minimalisir demi mencapai efisiensi penyaluran yang optimal.

## **1.2. Rumusan Masalah**

1. Menentukan setting arus pada rele gangguan tanah (GFR) pada Gardu Induk Namurambe. PT. PLN (Persero) Penyaluran dan Pusat Pengatur Beban Sumatera Unit Pelayanan Transmisi Medan.
2. Menentukan waktu kerja rele gangguan tanah (GFR) pada Gardu Induk Namurambe.
3. Menentukan arus yang tidak seimbang pada pada sistem yang dipasang rele gangguan tanah pada Gardu Induk Namurambe.
4. Menentukan arus gangguan hubung singkat (satu fasa ke tanah) pada Gardu Induk Namurambe.

## **1.3. Tujuan Penelitian**

Tujuan penelitian Tugas Akhir ini adalah :

1. Menganalisa setting arus pada rele gangguan tanah (GFR) pada Gardu Induk Namurambe.
2. Menganalisa waktu kerja rele gangguan tanah (GFR) pada Gardu Induk Namurambe.
3. Menganalisa arus gangguan hubung singkat (satu fasa ke tanah) pada Gardu Induk Namurambe.
4. Menganalisa beban yang tidak seimbang pada sistem yang dipasang rele gangguan tanah pada Gardu Induk Namurambe.

#### **1.4. Batasan Masalah**

1. Perhitungan setting arus pada rele gangguan tanah (GFR) pada Gardu Induk Namurambe.
2. Perhitungan waktu kerja rele gangguan tanah (GFR) pada Gardu Induk Namurambe.
3. Menganalisa arus yang tidak seimbang pada sistem yang dipasang rele gangguan tanah pada Gardu Induk Namurambe.
4. Menganalisa arus gangguan hubung singkat (satu fasa ke tanah) pada Gardu Induk Namurambe.

#### **1.5. Manfaat Penelitian**

Manfaat dari Tugas Akhir ini adalah sebagai acuan dalam perencanaan untuk mengatasi ketidakseimbangan beban terhadap kerja rele gangguan tanah pada Gardu Induk Namurambe. PT. PLN (Persero) Penyaluran dan Pusat Pengatur Beban Sumatera Unit Pelayanan Transmisi Medan.

## **BAB II**

### **TINJAUAN PUSTAKA**

#### **2.1. Tinjauan Pustaka Relevan**

Sistem daya listrik menyalurkan daya dari generator tiga fasa ke beban tiga fasa yang umumnya seimbang dengan impedansi sama pada setiap fasanya. Akan tetapi sistem akan berubah tak seimbang apabila tegangan, arus dan impedansi setiap fasanya tak sama (tak seimbang). Penyebab tak seimbangnya tegangan, arus dan impedansi ini dapat seimbang oleh adanya beban yang tidak seimbang penyebab hubung singkat dan penyambungan-penyambungan yang tak merata pada beban di setiap fasanya. Jadi suatu sistem dikatakan tidak seimbang apabila tegangan, arus dan impedansi tidak seimbang pada kondisi kerja normal.

Beban seimbang sistem distribusi listrik adalah suatu keadaan dimana memenuhi dua kriteria yaitu :

- a. Ketiga vektor/tegangan sama besar
- b. Ketiga vektor saling membentuk sudut  $120^\circ$  satu sama lain.

Beban tidak seimbang sistem distribusi listrik adalah keadaan dimana salah satu atau kedua syarat keadaan seimbang tidak terpenuhi. Kemungkinan keadaan tidak seimbang ada 3 macam, yaitu :

- a. Ketiga vektor sama besar tetapi tidak membentuk sudut  $120^\circ$  satu sama lain.
- b. Ketiga vektor tidak sama besar tetapi membentuk sudut  $120^\circ$  satu sama lain.
- c. Ketiga vektor tidak sama besar dan tidak membentuk sudut  $120^\circ$  satu sama lain.

## 2.2. Sistem Komponen Simetris

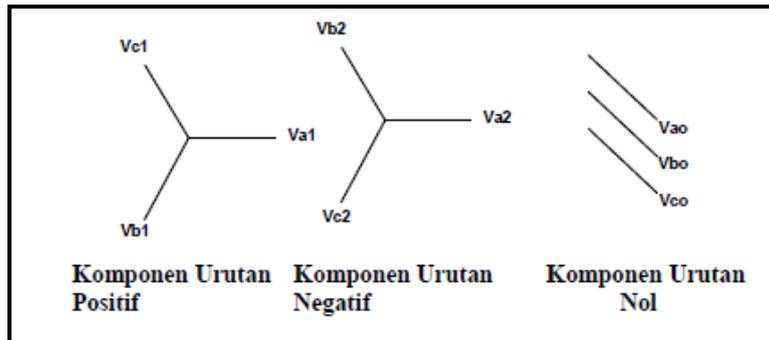
Suatu sistem tak seimbang yang terdiri dari  $n$  fasa dapat diuraikan menjadi faktor-faktor seimbang yang disebut komponen simetris. Sistem tiga fasa yang tidak seimbang dapat diuraikan menjadi tiga komponen simetris yaitu :

1. Komponen-komponen urutan positif terdiri dari tiga fasor yang sama besarnya, terpisah antara yang satu dengan yang lain dalam fasa sebesar  $120^0$  dan mempunyai urutan fasa yang sama seperti pada fasor-fasor aslinya.
2. Komponen-komponen urutan negatif terdiri dari tiga fasor-fasor yang sama besarnya, terpisah antara satu dengan yang lain dalam fasa sebesar  $120^0$  dan mempunyai urutan fasa dengan yang berlawanan dengan pada fasor-fasor aslinya.
3. Komponen-komponen urutan nol terdiri dari tiga fasor yang sama besarnya dan dengan pergeseran fasa nol antara fasor yang satu dengan yang lainnya.

Telah menjadi kebiasaan umum, ketika memecahkan permasalahan dengan menggunakan komponen simetris bahwa ketiga fasa dari sistem dinyatakan sebagai a, b dan c dengan cara demikian sehingga urutan fasa tegangan dan arus dalam sistem adalah abc. Jadi, urutan 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 dengan  $V_a$ ,  $V_b$  dan  $V_c$  .

Ketiga himpunan komponen simetris dinyatakan dengan subkrip tambahan 1 untuk komponen urutan positif, 2 untuk komponen urutan negatif, dan 0 untuk

komponen urutan nol. Komponen urutan positif dari  $V_a$ ,  $V_b$  dan  $V_c$  adalah  $V_{a1}$ ,  $V_{b1}$  dan  $V_{c1}$ . Demikian pula, komponen urutan negatif ialah  $V_{a2}$ ,  $V_{b2}$  dan  $V_{c2}$ , sedangkan komponen urutan nol adalah  $V_{a0}$ ,  $V_{b0}$  dan  $V_{c0}$ .



Gambar 2.1. Tiga himpunan fasor seimbang yang merupakan komponen simetris dari fasor tak seimbang.

$$V_a = V_{a1} + V_{a2} + V_{a0} \quad (2.1)$$

$$V_b = V_{b1} + V_{b2} + V_{b0} \quad (2.2)$$

$$V_c = V_{c1} + V_{c2} + V_{c0} \quad (2.3)$$

### 2.2.1. Operator $a$

Operator  $a$  biasanya digunakan untuk menunjukkan operator yang menyebabkan perputaran sebesar  $120^\circ$  dalam arah yang berlawanan dengan arah jarum jam. Operator semacam ini adalah bilangan kompleks yang besarnya satu dan sudutnya  $120^\circ$  dan didefinisikan sebagai :

$$a = 1/120^\circ = 1 \angle j2\pi/3 = -0,5 + j0,866$$

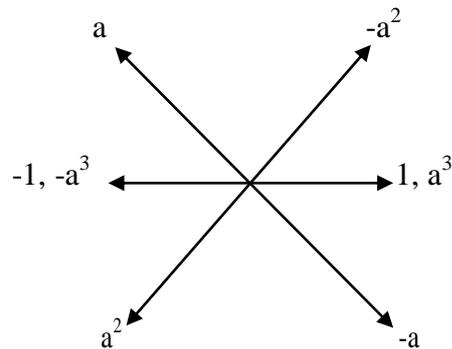
Jika operator  $a$  dikenakan pada fasor dua kali berturut-turut, maka fasor itu akan diputar dengan sudut sebesar  $240^\circ$ .

Untuk pengenaaan tiga kali berturut-turut fasor akan diputar dengan  $360^\circ$ .

Jadi :

$$a^2 = 1/240^\circ = -0,5 - j0,866$$

$$a^3 = 1/360^\circ = 1/0^\circ = 1$$



Gambar 2.2. Diagram fasor berbagai pangkat dari operator  $a$ .

### 2.2.2. Komponen simetris fasor tak simetris

Telah kita lihat pada Gambar 2.1 sintesis tiga fasor tak simetris dari tiga himpunan fasor simetris. Sintesis itu telah dilakukan sesuai dengan Persamaan (2.1) sampai dengan (2.3). sekarang marilah kita periksa persamaan tersebut untuk menentukam bagaimana menguraikan ketiga fasor tak simetris itu menjadi komponen simetrisnya.

Mula-mula, kita perhatikan bahwa banyaknya kuantitas yang diketahui dapat dikurangi dengan menyatakan masing-masing komponen  $V_b$  dan  $V_c$  sebagai hasil kali fungsi operator  $a$  dan komponen  $V_a$ . Dengan berpedoman pada Gambar 2.2. diperoleh hubungan berikut :

$$\begin{aligned} V_{b1} &= a^2 V_{a1} & V_{c1} &= a V_{a1} \\ V_{b2} &= a V_{a2} & V_{c2} &= a^2 V_{a2} \\ V_{b0} &= V_{a0} & V_{c0} &= V_{a0} \end{aligned} \quad (2.4)$$

Dengan mengulangi Persamaan (2.1) dan memasukkan Persamaan (2.4) ke dalam Persamaan (2.2) dan (2.3) dihasilkan :

$$V_a = V_{a1} + V_{a2} + V_{a0} \quad (2.5)$$

$$V_b = a^2V_{a1} + aV_{a2} + V_{a0} \quad (2.6)$$

$$V_c = aV_{a1} + a^2V_{a2} + V_{a0} \quad (2.7)$$

Atau dalam bentuk matriks

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{a0} \\ V_{a1} \\ V_{a2} \end{bmatrix} \quad (2.8)$$

Untuk memudahkan kita misalkan :

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \quad (2.9)$$

Maka, seperti dapat dibuktikan dengan mudah,

$$A^{-1} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \quad (2.10)$$

Dan dengan mengalikan kedua sisi Persamaan (2.8) dengan  $A^{-1}$  diperoleh :

$$\begin{bmatrix} V_{a0} \\ V_{a1} \\ V_{a2} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} \quad (2.11)$$

Yang menunjukkan pada kita komponen-komponen simetris dinyatakan terhadap fasor aslinya. Hubungan ini demikian pentingnya sehingga kita dapat menulis masing-masing persamaan itu dalam bentuk yang biasa.

Dari Persamaan (2.11), kita peroleh :

$$V_{a0} = \frac{1}{3}(V_a + V_b + V_c) \quad (2.12)$$

$$V_{a1} = \frac{1}{3}(V_a + aV_b + a^2V_c) \quad (2.13)$$

$$V_{a2} = \frac{1}{3}(V_a + a^2V_b + aV_c) \quad (2.14)$$

Persamaan (2.12) menunjukkan bahwa tidak akan ada komponen urutan nol jika jumlah fasor tak seimbang itu sama dengan nol. Karena jumlah fasor tegangan antar saluran pada sistem tiga fasa selalu nol, maka komponen urutan nol tidak pernah terdapat dalam tegangan saluran itu, tanpa memandang besarnya ketidakseimbangannya. Jumlah ketiga fasor tegangan saluran ke netral tidak selalu harus sama dengan nol, dan tegangan ke netral dapat mengandung komponen urutan nol.

Persamaan yang terdahulu sebenarnya dapat pula ditulis untuk setiap himpunan fasor yang berhubungan, dan kita dapat pula menuliskannya untuk arus sebagai ganti tegangan. Persamaan tersebut dapat diselesaikan baik secara analitis maupun secara grafis. Karena beberapa persamaan yang terdahulu sangat mendasar. Marilah kita tuliskan ringkasannya untuk arus-arus :

$$I_a = I_{a1} + I_{a2} + I_{a0} \quad (2.15)$$

$$I_b = a^2 I_{a1} + a I_{a2} + I_{a0} \quad (2.16)$$

$$I_c = a I_{a1} + a^2 I_{a2} + I_{a0} \quad (2.17)$$

$$I_{a0} = \frac{1}{3}(I_a + I_b + I_c) \quad (2.18)$$

$$I_{a1} = \frac{1}{3}(I_a + a I_b + a^2 I_c) \quad (2.19)$$

$$I_{a2} = \frac{1}{3} (I_a + a^2 I_b + a I_c) \quad (2.20)$$

Dalam bentuk matrik sebagai berikut :

$$\begin{bmatrix} I_{a0} \\ I_{a1} \\ I_{a2} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} \quad (2.21)$$

Dengan membandingkan Persamaan (2.18) dan (2.21) maka diperoleh :

$$I_n = 3I_{a0} \quad (2.22)$$

### 2.2.3. Impedansi urutan

Dalam setiap bagian rangkaian, jatuh tegangan yang disebabkan oleh arus dengan urutan tertentu tergantung pada impedansi bagian rangkaian itu terhadap arus dengan urutan tersebut.

Impedansi setiap bagian suatu jaringan yang seimbang terhadap arus salah satu urutan dapat berbeda dengan impedansi terhadap arus dari urutan yang lain. Impedansi suatu rangkaian yang hanya mengalir arus urutan-positif disebut impedansi terhadap arus urutan-positif. Demikian pula, bila hanya ada arus urutan negatif, impedansinya dinamakan impedansi terhadap arus urutan negatif. Jika hanya ada arus urutan nol, impedansinya dinamakan impedansi terhadap arus urutan-nol. Dalam sistem tiga fasa masing-masing fasa ditandai dengan persamaan 2.23, 2.24, dan 2.25 impedansi urutan dapat didefinisikan sebagai berikut :

1. Impedansi urutan positif : adalah impedansi yang ditemui oleh arus urutan positif

Bila :

$$I_{a2} = I_{a0} = 0 ; I_{a1} \neq 0$$

Maka :

$$Z_{a1} = \frac{V_a}{I_{a1}} ; Z_{b1} = \frac{V_b}{I_{b1}} ; Z_{c1} = \frac{V_c}{I_{c1}} \quad (2.23)$$

2. Impedansi urutan negatif : adalah impedansi yang ditemui oleh arus urutan negatif

Bila :

$$I_{a1} = I_{a0} = 0 ; I_{a2} \neq 0$$

Maka :

$$Z_{a2} = \frac{V_a}{I_{a2}} ; Z_{b2} = \frac{V_b}{I_{b2}} ; Z_{c2} = \frac{V_c}{I_{c2}} \quad (2.24)$$

3. Impedansi urutan nol : adalah impedansi yang ditemui oleh arus urutan nol

Bila :

$$I_{a1} = I_{a2} = 0 ; I_{a0} \neq 0$$

Maka :

$$Z_{a0} = \frac{V_a}{I_{a0}} ; Z_{b0} = \frac{V_b}{I_{b0}} ; Z_{c0} = \frac{V_c}{I_{c0}} \quad (2.25)$$

Analisis gangguan tak simetris pada sistem yang simetris terdiri dari penentuan komponen simetris dari arus tak seimbang yang mengalir. Rangkaian ekuivalen fasa tunggal yang hanya terdiri dari impedansi terhadap arus salah satu urutan saja dinamakan jaringan urutan. Jaringan urutan ini meliputi setiap emf yang dibangkitkan pada urutan yang sama. Jaringan urutan yang mengalirkan arus  $I_{a1}$ ,  $I_{a2}$ , dan  $I_{a0}$  diantar hubungkan untuk melukiskan berbagai keadaan gangguan tak seimbang. Oleh karena itu, untuk menghitung pengaruh gangguan dengan metode komponen simetris.

### 2.3. Sistem Tak Seimbang Dengan metode Komponen Simetris

Pada sistem yang simetris, bila ada gangguan komponen-komponen simetris arus yang mengalir akan menimbulkan tegangan jatuh dalam urutan yang sama

$I_{a1}$  akan menimbulkan  $I_{a1} Z_{a1}$  saja

$I_{a2}$  akan menimbulkan  $I_{a2} Z_{a2}$  saja

$I_{a0}$  akan menimbulkan  $I_{a0} Z_{a0}$  saja

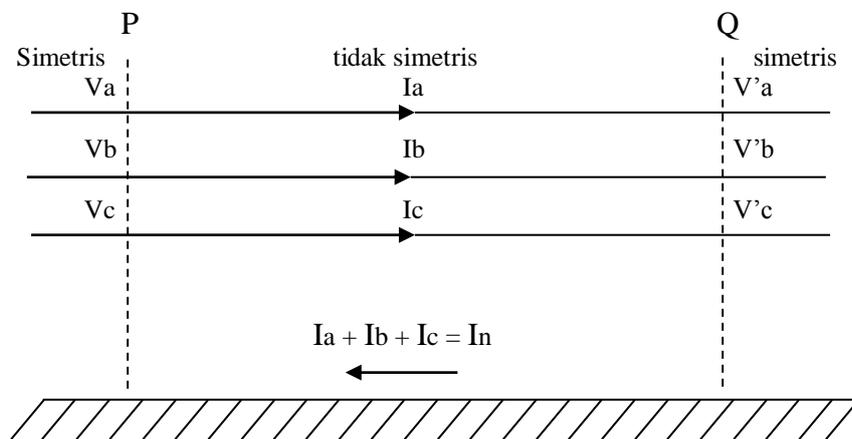
Pada sistem-sistem yang tidak simetris, suatu komponen arus urutan akan menimbulkan tegangan jatuh untuk semua urutan bersama-sama.

$I_{a1}$  akan menimbulkan  $I_{a1} Z_{11}$ ;  $I_{a1} Z_{21}$ ;  $I_{a1} Z_{01}$ ;

$I_{a2}$  akan menimbulkan  $I_{a2} Z_{12}$ ;  $I_{a2} Z_{22}$ ;  $I_{a2} Z_{02}$ ;

$I_{a0}$  akan menimbulkan  $I_{a0} Z_{10}$ ;  $I_{a0} Z_{20}$ ;  $I_{a0} Z_{00}$ ;

Perhatikan pada sistem dibawah ini :



Gambar 2.3. Diagram satu garis sistem yang tidak simetris.

Pada umumnya :

$$V_a = I_{a1}Z_{a1} + I_{a2} Z_{a2} + I_{a0} Z_{a0} \quad (2.26)$$

$$V_b = a I_{a1}Z_{b1} + a^2 I_{a2} Z_{b2} + I_{a0} Z_{b0} \quad (2.27)$$

$$V_c = a I_{a1} Z_{c1} + a^2 I_{a2} Z_{c2} + I_{a0} Z_{c0} \quad (2.28)$$

Jadi :

$$V_0 = \frac{1}{3}(V_a + V_b + V_c) = I_{a1} \frac{Z_{a1} + a^2 Z_{b1} + a Z_{c1}}{3} + \frac{Z_{a2} + a Z_{b2} + a^2 Z_{c2}}{3} + I_{a0} \frac{Z_{a0} + Z_{b0} + Z_{c0}}{3} \quad (2.29)$$

$$V_{a1} = \frac{1}{3}(V_a + V_b + a^2 V_c) = I_{a1} \frac{Z_{a1} + Z_{b1} + Z_{c1}}{3} + I_{a2} \frac{Z_{a2} + a Z_{b2} + a^2 Z_{c2}}{3} + I_{a0} \frac{Z_{a0} + a Z_{b0} + a^2 Z_{c0}}{3} \quad (2.30)$$

$$V_{a2} = \frac{1}{3}(a V_a + a^2 V_b + a V_c) = I_{a1} \frac{Z_{a1} + a V_{b1} + a^2 Z_{c1}}{3} + I_{a2} \frac{Z_{a2} + Z_{b2} + Z_{c2}}{3} + I_{a0} \frac{Z_{a0} + a^2 Z_{b0} + a Z_{c0}}{3} \quad (2.31)$$

Bila hanya ada  $I_{a1}$  jadi  $I_{a2} = I_{a0} = 0$  maka persamaan (2.29), (2.30) dan (2.31) akan menjadi sebagai berikut :

$$V_0 = I_{a1} \frac{Z_{a1} + a^2 Z_{b1} + a Z_{c1}}{3} \quad (2.32)$$

$$V_{a1} = I_{a1} \frac{Z_{a0} + Z_{b1} + Z_{c1}}{3} \quad (2.33)$$

$$V_{a2} = I_{a1} \frac{Z_{a1} + a Z_{b1} + a^2 Z_{c1}}{3} \quad (2.34)$$

Jadi terlihat bahwa hanya dengan arus  $I_{a1}$  akan menimbulkan jatuh tegangan  $V_{a0}$ ,  $V_{a1}$  dan  $V_{a2}$  bersama-sama tetapi bila sistem itu simetris.

$$Z_{a1} = Z_{b1} = Z_{c1}$$

$$V_{a1} = I_{b1} \cdot Z_{c1}$$

$$V_{a2} = Z_{a0} = 0$$

Persamaan (2.26), (2.27) dan (2.28) didapat secara umum ditulis sebagai berikut :

$$V_{a1} = I_{a1}Z_{11} + I_{a2} Z_{12} + I_{a0} Z_{10}$$

$$V_{a2} = I_{a1}Z_{21} + I_{a2} Z_{22} + I_{a0} Z_{20}$$

$$V_{a0} = I_{a1}Z_{01} + I_{a2} Z_{02} + I_{a0} Z_{00}$$

Dalam bentuk matrik sebagai berikut :

$$\begin{bmatrix} V_{a1} \\ V_{a2} \\ V_{a0} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} & Z_{10} \\ Z_{21} & Z_{22} & Z_{20} \\ Z_{01} & Z_{02} & Z_{00} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{a1} \\ I_{a2} \\ I_{a0} \end{bmatrix} \quad (2.35)$$

#### 2.4. Pengertian Beban Tak Seimbang

Suatu beban tiga fasa seimbang apabila arus yang dihasilkan seimbang, bilamana beban tersebut dihubungkan dengan tegangan sistem yang seimbang, beban yang tak seimbang dapat ditandai dengan tidak seimbangnya arus yang mengalir pada sistem, kondisi ini dipengaruhi oleh tegangan yang dibangkitkan sistem tidak seimbang, impedansi fasanya tidak sama dan impedansi beban tidak sama. Perencanaan daya listrik, sistem direncanakan seimbang. Keseimbangan dimaksud disini adalah tegangan yang dibangkitkan seimbang dan impedansi perfasanya sama (impedansi penyalur). Munculnya ketidakseimbangan arus umumnya disebabkan oleh impedansi beban yang tidak sama perfasanya.

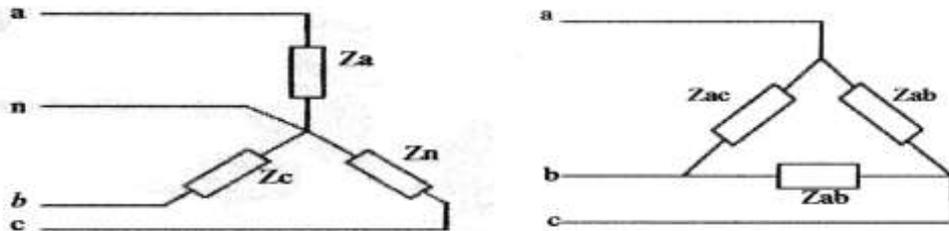
Pemasangan beban yang dihubungkan ke sistem dipasang seimbang, beberapa peralatan menyebabkan gelombang arus dalam beban menjadi tidak seimbang. Sebagai contoh di daerah perumahan tiap-tiap rumah biasanya dipasang dengan satu fasa dari sistem tiga fasa yang mengakibatkan beban tidak seimbang.

Seperti diketahui di rumah-rumah bermacam-macam alat rumah tangga yang dihidup matikan secara tidak teratur oleh konsumen. Kemudian di daerah industri banyak peralatan yang bersifat tidak seimbang, misalnya : pemanasan dengan termostat, mesin bubut, tungku listrik, motor-motor pemutar dan sebagainya.

Penyebab lain dengan pemasangan transformator distribusi satu fasa serta pemasangan beban yang tidak terkontrol, seperti pencurian energi listrik. Suatu beban hubungan tegangan urutan dengan patokan arus, tegangan dan impedansi pada fasa dapat dibagi dalam dua hubungan sebagai berikut :

1. Hubungan Bintang
2. Hubungan Delta

Pola hubungan bintang dan hubungan delta dapat kita lihat pada Gambar 2.4.



a. Hubungan Bintang

b. Hubungan Delta

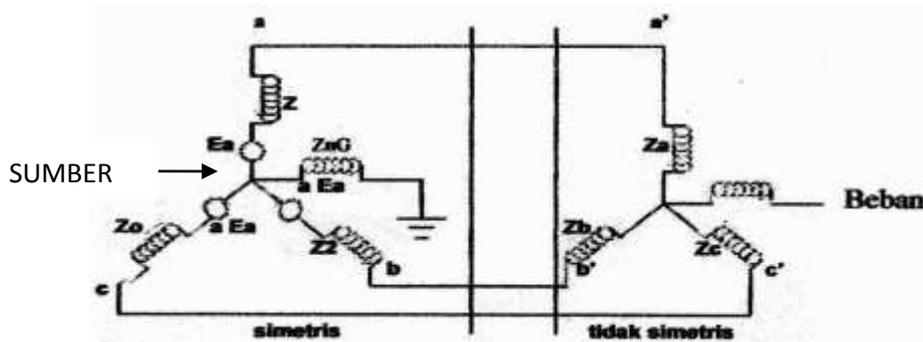
Gambar 2.4. Hubungan bintang dan hubungan delta.

Sistem distribusi tiga fasa yang masing-masing fasanya ditandai dengan fasa a,b dan c seperti pada Gambar 2.5 suatu beban dikatakan tidak seimbang bila mana :

$$Z_a \neq Z_b \neq Z_c \text{ atau } Z_{ab} \neq Z_{ac} \neq Z_{bc}$$

## 2.5. Beban Tak Seimbang Pada Sistem Yang Memuat Bagian yang Tak Seimbang

### 2.5.1. Kondisi beban tidak seimbang



Gambar 2.5. Diagram sistem beban tidak seimbang.

Keterangan gambar :

$E_a$  = Tegangan yang dibangkitkan

$Z_1, Z_2, Z_0$  = Impedansi urutan generator

$Z_a, Z_b, Z_c$  = Impedansi beban perfasa

$Z_{NI}$  = Impedansi pentanahan beban

$Z_{NG}$  = Impedansi pentanahan generator

Tegangan urutan fasa pada titik P untuk :

a. Bagian Simetris

$$V_{a1} = E_a - I_{a1}Z_1; V_{a2} = -I_{a2}Z_2; V_{a0} = -I_{a0}(Z_0 + 3Z_{NG}) \quad (2.36)$$

b. Bagian tidak simetris

$$V_{a1} = I_{a1}Z_{11} + I_{a2}Z_{12} + I_{a0}Z_{10}$$

$$V_{a2} = I_{a1}Z_{21} + I_{a2}Z_{22} + I_{a0}Z_{20}$$

$$V_{a0} = I_{a1}Z_{01} + I_{a2}Z_{02} + I_{a0}Z_{00} \quad (2.37)$$

Masukkan persamaan (2.36) ke persamaan (2.37) maka didapatkan :

$$E_a = I_{a1}(Z_{11} + Z_1) + I_{a2}Z_{12} + I_{a0}Z_{10}$$

$$0 = I_{a1}Z_{21} + I_{a2}(Z_{22} + Z_2) + I_{a0}Z_{20}$$

$$0 = I_{a1}Z_{01} + I_{a2}Z_{02} \quad (2.38)$$

Dalam bentuk matrik sebagai berikut :

$$\begin{bmatrix} Z_{11} + Z_1 & Z_{12} & Z_{10} \\ Z_{12} & Z_{22} + Z_2 & Z_{20} \\ Z_{01} & Z_{02} & Z_{00} + Z_0 + 3Z_{nG} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{a1} \\ I_{a2} \\ I_{a0} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E_a \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

Dengan metode matrik maka didapatkan sebagai berikut :

$$I_{a1} = (\Delta_{11} / \Delta)E_a + (\Delta_{12} / \Delta)0 + (\Delta_{13} / \Delta)0 = ((\Delta_{11} / \Delta)E_a$$

$$I_{a2} = (\Delta_{21} / \Delta)0 + (\Delta_{22} / \Delta)E_a + (\Delta_{23} / \Delta)0 = ((\Delta_{22} / \Delta)E_a$$

$$I_{a0} = (\Delta_{31} / \Delta)0 + (\Delta_{32} / \Delta)0 + (\Delta_{33} / \Delta)E_a = (\Delta_{33} / \Delta)E_a \quad (2.39)$$

Dimana :

$$\Delta_{11} = (Z_{22} + Z_2)(Z_{00} + Z_0 + 3Z_{nG}) - (Z_{02} + Z_{20})$$

$$\Delta_{22} = (Z_{11} + Z_1)(Z_{00} + Z_0 + 3Z_{nG}) - (Z_{01} + Z_{10})$$

$$\Delta_{33} = (Z_{11} + Z_1)(Z_{02} + Z_{20})$$

$$\Delta = (Z_{11} + Z_1)(Z_{22} + Z_2)(Z_{00} + Z_0 + 3Z_{nG}) + Z_{12}Z_{20}Z_{01} +$$

$$Z_{10}Z_{21}Z_{02} - Z_{01}(Z_{22} + Z_2)Z_{10} - Z_{02}Z_{20}(Z_{11} + Z_1) - (Z_{00} +$$

$$Z_0 + 3Z_{nG})Z_{21}Z_{12} \quad (2.40)$$

Jika beban merupakan beban statis dan tanpa bersama dimana :

$$Z_{11} = Z_{22} = 1/3 (Z_a + Z_b + Z_c)$$

$$Z_{00} = Z_{11} + Z_{nL}$$

$$Z_{12} = Z_{20} = Z_{01} = 1/3 (Z_a + a Z_b + a^2 Z_c)$$

$$Z_{21} = Z_{10} = Z_{02} = 1/3 Z_a + a Z_b + a^2 Z_c$$

Maka :

$$\Delta_{11} = (Z_{11} + Z_2) (Z_{11} + 3Z_{nL} + Z_0 + 3Z_{nG}) - (Z_{12} Z_{10})$$

$$\Delta_{22} = (Z_{11} + Z_1) (Z_{11} + 3Z_{nL} + Z_0 + 3Z_{nG}) - (Z_{12} Z_{10})$$

$$\Delta_{33} = (Z_{11} + Z_1) (Z_{11} + Z_2) - (Z_{12} Z_{10})$$

$$\Delta = (Z_{11} + Z_1) (Z_{22} + Z_2)(Z_{11} + 3Z_{nL} + Z_0 + 3Z_{nG}) + Z_{12} (Z_{11} + Z_2)Z_{10} -$$

$$Z_{10} Z_{12} (Z_{11} + Z_1) - (Z_{11} + 3Z_{nL} + Z_0 + 3Z_{nG})$$

$$\Delta = (Z_{11} + Z_1)[(Z_{11} + Z_2)(Z_{11} + 3Z_{nL} + 3Z_{nG}) - Z_{10} Z_{12}] + Z_{10} [(Z_{10})^2 - Z_1$$

$$(Z_{11} + Z_2) + Z_{12} [(Z_{12})^2 - (Z_{11} + 3Z_{nL} + Z_0 + 3Z_{nG})Z_{10}] \quad (2.41)$$

## 2.6. Pemutus Tenaga (PMT)

Pemutus tenaga (*circuit breaker*) merupakan suatu piranti saklar mekanik yang secara otomatis akan membuka atau memutuskan rangkaian listrik apabila terjadi ketidak normalan pada suatu sistem tanpa ada kerusakan. Pemutus tenaga merupakan salah satu piranti pengaman yang terpenting. Karena hampir semua sinyal keluaran dari rele-rele pengaman ditujukan pada pemutus tenaga.

Pemutus tenaga terdiri atas kontak-kontak yang dialiri arus listrik atau lebih dikenal dengan elektroda. Pada kondisi abnormal maka elektroda-elektroda akan terpisah dan memutuskan hubungan listrik dari satu sisi ke sisi lainnya. Pada saat pemutusan, pada pemutusan tenaga akan terjadi busur api yang mengakibatkan kerusakan, baik pada pemutus tenaga sendiri maupun pada sistem secara keseluruhan. Masalah terpenting dalam pemutus tenaga adalah bagaimana

menghilangkan busur api dengan segera sebelum busur api mencapai suatu harga yang membahayakan.

### **1. Syarat-syarat pemutus tenaga**

Ada beberapa syarat yang harus dipenuhi oleh pemutus tenaga agar bisa bekerja dengan baik, antara lain sebagai berikut :

a. Kemampuan Menutup dan Dialiri

Mampu menutup dan mampu dialiri arus beban penuh dalam waktu lama.

b. Bekerja Secara Otomatis

Membuka secara otomatis untuk memutuskan beban atau beban lebih.

c. Bekerja Cepat

dapat memutuskan rangkaian dengan cepat, jika terjadi hubung singkat.

d. Tahan pada Tegangan Rangkaian

Celah harus tahan terhadap tegangan rangkaian, bila kontak membuka.

e. Dapat dialiri Arus Hubung Singkat

Mampu dialiri arus hubung singkat sampai gangguan hilang.

f. Mampu Memutus Arus Magnetisasi Transformator

Mampu memutuskan arus magnetisasi transformator atau jaringan dan arus pemuatan.

g. Tahan terhadap Situasi dan Kondisi

Mampu menahan efek busur kontak, gaya elektromagnet, atau kondisi panas yang tinggi akibat hubung singkat.

### **2. Pemutus Tenaga (PMT) Yang Digunakan Pada Gardu Induk**

Dilihat dari media pemadamannya, pemutus tenaga dapat digolongkan menjadi tiga yaitu pemutus tenaga dengan media pemadaman minyak (oil CB),

dengan media pemadaman udara (air CB), dengan media pemadaman gas (SF<sub>6</sub>CB). Sedangkan PMT 150/20 KV yang digunakan pada Gardu Induk yaitu :

a. PMT dengan Media Gas

Media gas yang digunakan pada tipe PMT ini adalah gas SF<sub>6</sub> (*sulfur heksafluorid*). Sifat-sifat gas SF<sub>6</sub> murni ialah tidak berwarna, tidak berbau, tidak beracun, dan tidak mudah terbakar. Pada temperatur di atas 150° gas SF<sub>6</sub> mempunyai sifat tidak merusak metal, plastik dan bermacam-macam bahan yang umumnya digunakan dalam pemutus tenaga tegangan tinggi. Sebagai isolasi listrik, gas SF<sub>6</sub> mempunyai kekuatan dielektrik yang tinggi (2,35 kali udara) dan kekuatan dielektrik ini bertambah dengan pertambahan tekanan. Sifat lainnya ialah mampu mengembalikan kekuatan dielektrik dengan cepat, setelah arus bunga listrik melalui titik nol.

## **2.7. Rele Gangguan Tanah (Ground Fault Relay)**

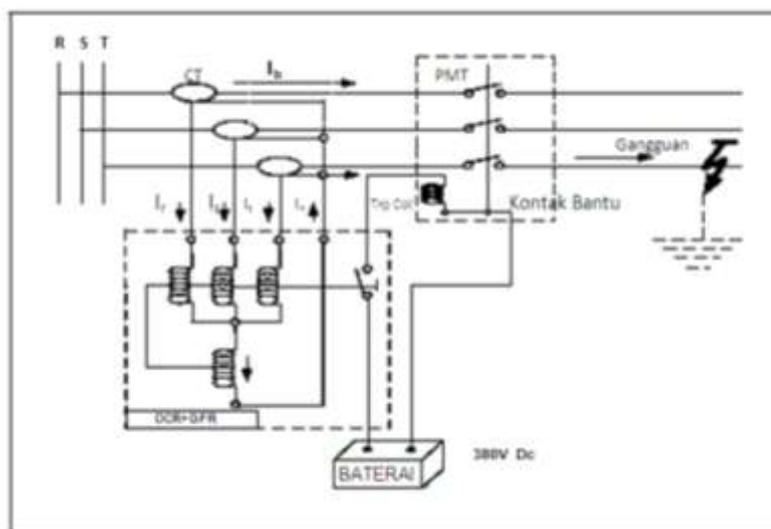
Suatu gangguan yang terjadi pada sistem daya listrik dapat mengakibatkan efek kerusakan pada peralatan, sistem dan keselamatan umum di daerah penyaluran daya, oleh karena itu gangguan perlu diamankan secepat mungkin. Pemutusan arus hanya terjadi pada daerah gangguan saja, karena itu kerja sistem pengaman harus mampu untuk merasakan gangguan yang sensitif, ketepatan kerja harus tepat dan dapat dipercaya keandalannya.

Gangguan tanah adalah terhubungnya konduktor fasa dengan beban atau tempat yang terhubung dengan tanah sehingga beban atau tempat tersebut bertegangan dan mengalirkan arus ke tanah. Gangguan ini merupakan gangguan terbesar dari semua jenis gangguan sistem daya listrik. Karena itu pengaman

terhadap gangguan tanah ini merupakan suatu hal yang terpenting.

Rele gangguan tanah (*Ground Fault Relay*) adalah pengaman terhadap gangguan tanah. Rele ini berfungsi untuk memproteksi Saluran Udara Tegangan Menengah (SUTM) terhadap gangguan antara fasa atau 3 fasa dan hanya bekerja pada satu arah saja. Karena rele ini dapat membedakan arah arus gangguan. Arus atau tegangan urutan nol (residu) merupakan penggerak rele ini. Sistem daya listrik pada umumnya titik netralnya ditanahkan, baik pentanahan langsung (*Solid Grounded*) maupun melalui impedansi, karena itu arus residu merupakan penggerak utama rele gangguan tanah. Tegangan residu dipergunakan biasanya pada sistem yang tidak ditanahkan. Rele gangguan tanah terarah (*Directional Ground Fault Rele*) mempergunakan arus dan tegangan residu.

Rele arus lebih untuk gangguan fasa ke tanah dapat digambarkan seperti Gambar 2.6 dan disebut Rele Gangguan Tanah (Ground Fault Relay). Rele arus lebih hanya efektif dipakai untuk pentanahan netral langsung (solid) atau dengan tahanan rendah



Gambar 2.6. Rele Gangguan Tanah (GFR).

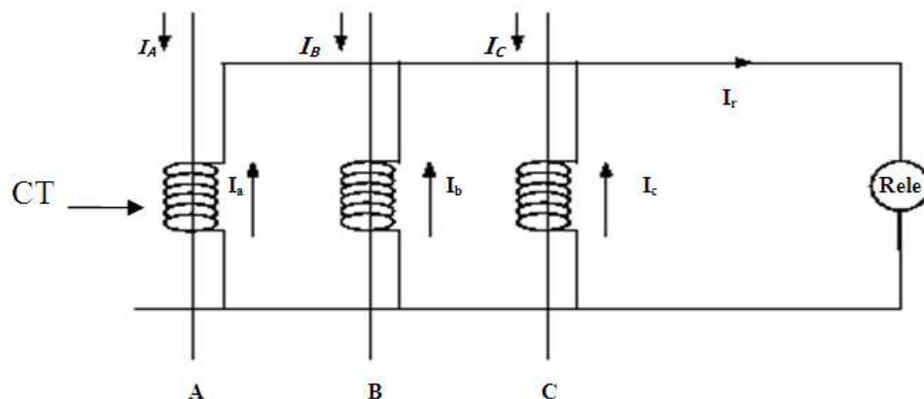
### 2.7.1. Prinsip Kerja Rele Gangguan Tanah

Rele ini bekerja dengan membaca input berupa besaran arus kemudian membandingkan dengan nilai setting, apabila nilai arus yang terbaca oleh rele melebihi nilai setting, maka rele akan mengirim perintah trip (lepas) kepada Pemutus Tenaga (PMT) atau Circuit Breaker (CB) setelah tunda waktu yang diterapkan pada setting. Rele ini juga berfungsi untuk memproteksi peralatan pada gardu induk terhadap gangguan antara fasa atau 3 fasa dan hanya bekerja pada satu arah saja. Karena rele ini dapat membedakan arah arus gangguan.

Suatu sistem tenaga listrik tiga fasa mengalami gangguan tanah. Gangguan tanah ini akan mengakibatkan terjadinya aliran arus ke tanah. Besarnya arus gangguan tanah ini bervariasi, mulai dari kecil sampai besar. Arus urutan nol (residu) yang merupakan sumber penggerak rele gangguan tanah, ada beberapa metode untuk mendapatkannya yaitu:

#### 1. Hubungan Residu (Residual Connection)

Metode hubungan residu seperti pada Gambar 2.7. Tiga transformator arus yang identik karakteristiknya, polaritas yang sama dihubungkan dan hubungan polaritas ini dihubungkan dengan rele gangguan tanah. Arus yang diterima oleh rele (arus residu) merupakan jumlah vektor dari arus pada sekunder transformator arus pada masing-masing fasa.

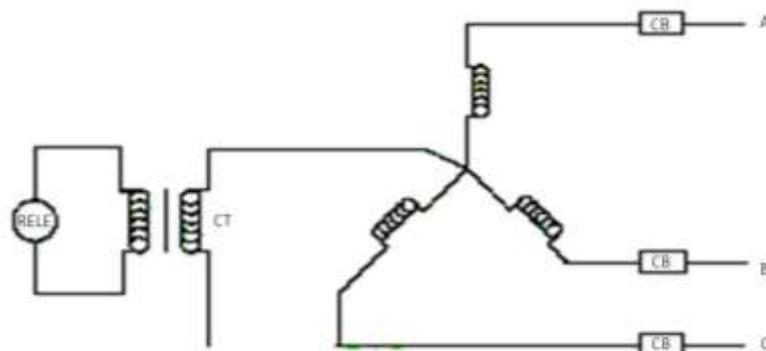


Gambar 2.7. Transformator arus hubungan residu.

Selama kondisi operasi normal rele tidak bekerja, begitu juga gangguan tiga fasa dan gangguan tiga fasa ke tanah, sejauh pengaturan setting rele tanah masih di atas arus residu yang terjadi pada ketidakseimbangan maksimum. Hanya pada gangguan satu fasa atau dua fasa ke tanah rele akan bekerja.

2. Transformator arus dipasang pada netral sistem yang diketanahkan

Arus gangguan tanah yang kembali netral ditransformasikan melalui transformator arus. Besarnya arus gangguan tanah tergantung dari tipe pentanahan dan lokasi dimana terjadinya gangguan.



Gambar 2.8. Transformator Arus netral pada sistem yang diketanahkan.

Untuk dapat bekerjanya rele gangguan tanah membutuhkan arus residu yang cukup besar. Kerja rele biasanya dihubungkan dengan keterlambatan waktu.

2.7.2. Rele Arah Gangguan Tanah (*Directional earth fault relay*)

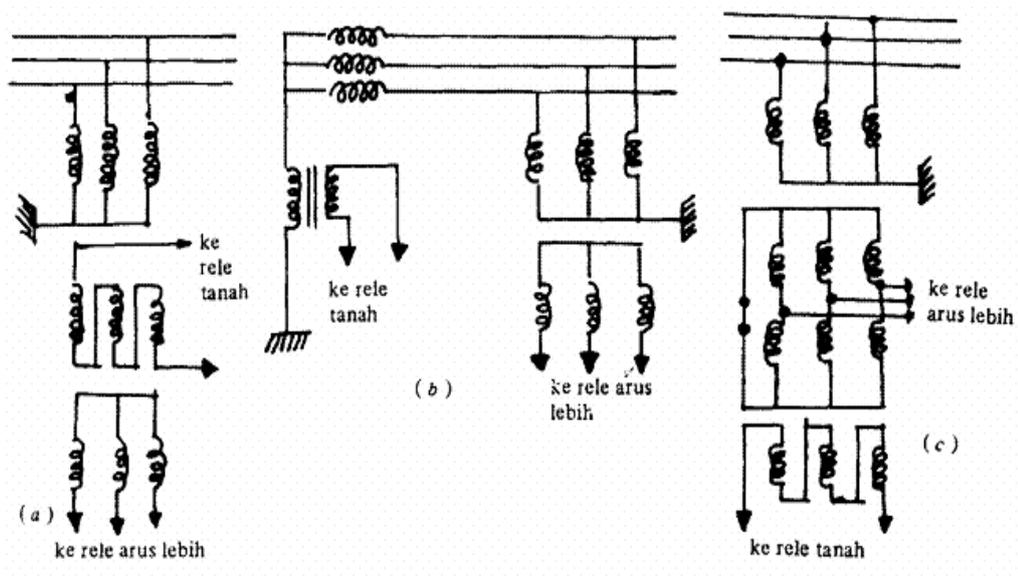
Rele arah (*directional relay*) digunakan apabila arus gangguan mengalir dari banyak jurusan ke titik gangguan melalui lokasi dari rele. Rele yang digunakan untuk rele arah gangguan tanah mempunyai jenis yang sama seperti

yang digunakan untuk proteksi pada arus lebih. Kumparan arusnya adalah dari elemen arah dihubungkan guna mendeteksi arus residu dari transformator arus, dan kumparan tegangan dihubungkan pada tegangan yang sesuai guna memberikan kopel yang sesuai pula. Jadi pada proteksi gangguan tanah, dengan arus residu  $I_r$  dan tegangan residu  $V_r$ .

Kopel pada rele ini akan sebanding dengan  $I_r \times V_r \cos(Q - \alpha)$  di mana  $Q$  adalah sudut kopel maksimum dari rele dan  $\alpha$  adalah sudut antara tegangan dan arus yang dipakai. Arus residu untuk proteksi saluran (feeder) didapat dari penjumlahan arus-arus fasa yang menggunakan transformator arus tiga fasa atau sebuah transformator arus jenis “*core balance current transformer*”. Bila arus-arus fasanya dinyatakan dengan  $I_A, I_B, I_C$  jumlah vektornya adalah :

$$I_A + I_B + I_C = 0 \text{ pada keadaan normal.} \quad (2.42)$$

$$I_A + I_B + I_C = I_r \text{ pada keadaan gangguan satu fasa ke tanah.} \quad (2.43)$$



Gambar 2.9. Beberapa metode untuk memperoleh tegangan residu atau tegangan netral ke tanah.

- Tiga buah transformator fasa tunggal, belitan tersier dihubungkan delta-terbuka.
- Transformator fasa tunggal dihubungkan pada netral transformator daya.
- Dengan tiga buah transformator fasa tunggal terhubung bintang dan transformator bantu terhubung delta-terbuka.

Tegangan residu  $V_r$  dapat diperoleh dengan beberapa cara seperti dalam Gambar 2.9 Bila tegangan fasa tanah dari ketiga kawat dinyatakan dengan  $V_A$ ,  $V_B$ ,  $V_C$ , maka jumlah ketiga vektor adalah :

$$V_A + V_B + V_C = 0 \text{ pada keadaan normal.} \quad (2.44)$$

$$V_A + V_B + V_C = V_r \text{ pada keadaan gangguan satu fasa ke tanah.} \quad (2.45)$$

Pada Gambar 2.9 memperlihatkan pengaruh dari metode pengetanahan dan impedansi gangguan terhadap besar tegangan residu. Dalam diagram vektor Gambar 2.10 itu terlihat bahwa pada sistem yang terisolir dan sistem yang diketanahkan dengan kumparan petersen proteksi gangguan tanah dengan elemen arah (*directional earth fault protection*) tidak dapat digunakan, sebab harga tegangan residunya tinggi, arus residunya kecil (mendekati harga nol), oleh karena itu kopel pada rele menjadi kecil sekali.

Pengetanahan Netral	Kumparan Petersen atau Terisolir	Tahanan	Langsung
Tegangan Normal			
Tegangan dengan fasa terhubung ke tanah			
Tegangan residu pada sisi delta trafo tegangan.			
Arus dan tegangan pada rele tanah			

Gambar 2.10. Diagram vektor dari tegangan dan arus dalam rele arah gangguan tanah.

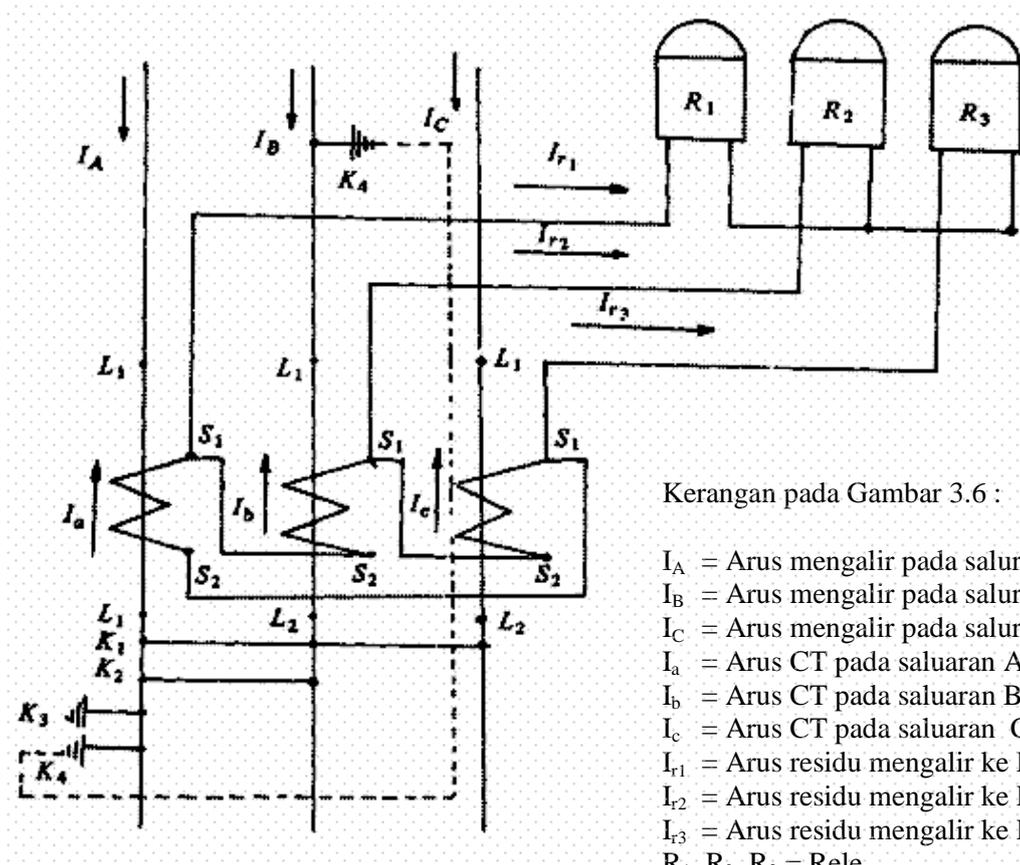
Pada sistem yang diketanahkan langsung, tegangan residu tak pernah dapat melebihi tegangan fasa netral yang normal. Tetapi bila gangguan tanah itu mempunyai tahanan yang lebih tinggi, tegangan residu yang disuplay di rele akan berkurang seperti terlihat pada Gambar 2.10 (c). Jadi bila tahanan gangguan tanah itu tinggi, arus residu juga rendah, sehingga kopel pada rele akan rendah pula, walaupun faktor daya dari gangguan harganya mendekati 1.

Apabila tahanan gangguan sama dengan nol arus akan membesar dan tegangan residu akan mendekati tegangan fasa netral (tergantung dari harga  $R$  dan  $X$ ), tetapi faktor daya mungkin bisa mempunyai harga rendah.

Sistem yang diketanahkan melalui tahanan akan memberikan keadaan yang memuaskan, sebab besar tegangan polarisasi untuk rele bisa dijaga, begitu juga arus gangguan dapat dibuat cukup memadai (kecuali bila tahanan gangguan terlampau tinggi), dan faktor dayanya hampir sama dengan satu pada Gambar 2.10 (b).

### 2.7.3. Proteksi Gangguan Tanah Pada Sistem Yang Diketanahkan Langsung

Pada sistem yang diketanahkan langsung, arus gangguan fasa ke tanah umumnya mempunyai nilai yang sangat besar, karena itu rele pengaman harus membuka (*trip*) dengan segera.



Kerangan pada Gambar 3.6 :

- $I_A$  = Arus mengalir pada saluran A
- $I_B$  = Arus mengalir pada saluran B
- $I_C$  = Arus mengalir pada saluran C
- $I_a$  = Arus CT pada saluran A
- $I_b$  = Arus CT pada saluran B
- $I_c$  = Arus CT pada saluran C
- $I_{r1}$  = Arus residu mengalir ke  $R_1$
- $I_{r2}$  = Arus residu mengalir ke  $R_2$
- $I_{r3}$  = Arus residu mengalir ke  $R_3$
- $R_1, R_2, R_3$  = Rele

- K1 = Hubung Singkat 3 fasa
- K2 = Hubung singkat 2 fasa
- K3 = Hubung singkat 1 fasa ketanah
- K4 = Hubung singkat 2 fasa ketanah

Gambar 2.11. Untuk melayani arus urutan nol dari gangguan tanah itu.

Skema proteksi pada Gambar 2.12 dapat dipakai untuk proteksi semua jenis gangguan hubung singkat, tetapi untuk proteksi gangguan satu fasa ke tanah, sensitivitasnya kurang tinggi. Untuk gangguan tiga fasa yang terjadi pada titik  $K_1$  semua rele bekerja. Apabila terjadi gangguan fasa-fasa di titik  $K_2$  menyebabkan rele  $R_1$  dan  $R_2$  bekerja. Sedangkan gangguan dua fasa ke tanah dari fasa A dan B di titik  $K_4$  arus gangguan mengalir melalui transformator arus dalam fasa A yang menyebabkan bekerjanya rele dari fasa ini.

Agar proteksi terhadap gangguan satu fasa ke tanah lebih baik dan lebih sensitif, maka perlu diberikan rele tanah  $R_0$ , yang ditambahkan pada skema proteksi dari Gambar 2.12 untuk melayani arus urutan nol dari gangguan tanah itu.

Tetapi bila khusus diinginkan proteksi terhadap gangguan satu fasa ke tanah saja, maka dapat digunakan filter arus urutan nol, dengan demikian rele akan mempunyai sensitivitas yang lebih tinggi terhadap gangguan itu.

#### 2.7.4. Proteksi Terhadap Gangguan Tanah Pada Sistem yang Netralnya Tidak Diketanahkan.

Pada sistem-sistem yang masih kecil biasanya sisi delta dan sisi bintang dari transformator dayanya tidak diketanahkan. Dalam hal ini gangguan satu fasa ke tanah pada sistem delta yang masih kecil tidak membahayakan, dan biasanya gangguan itu bisa hilang sendiri (*self clearing*), jadi sebenarnya tidak memerlukan pengamanan terhadap gangguan tanah. Atau bisa juga pada sistem interkoneksi yang diketanahkan, karena satu hal sebagian dari sistem itu terlepas (sengaja atau tak sengaja), dan mungkin bagian yang terlepas itu menjadi sistem dengan netral terapung. Proteksi dalam hal ini diperlukan untuk gangguan tanah yang menetap, yang mana dapat membahayakan terhadap fasa-fasa sehat dengan naiknya tegangan dari fasa-fasa itu menjadi tegangan fasa-fasa dan juga untuk menghindarkan terjadinya busur tanah.

#### 2.7.5. Penunjukan Atas Adanya Gangguan Tanah

Penunjukan atas adanya gangguan tanah dapat diketahui dengan bantuan penunjukan terhadap tegangan ke tanah dari ketiga fasa sistem.

Peralatan-peralatan yang dipergunakan untuk menunjukkan adanya gangguan tanah itu terdiri dari :

1. Sebuah transformator tegangan netral dengan disertai suatu voltmeter penunjuk /perekam dan kadang-kadang juga dengan suatu alat alarm. Belitan bantu dari kumparan petersen dapat dipakai untuk membantu mengukur tegangan netral.
2. Sebuah transformator arus pada sisi yang diketanahkan dari kumparan petersen dengan disertai suatu ammeter penunjuk/perekam.
3. Tiga buah transformator tegangan fasa tunggal yang dihubungkan antara fasa-fasa ke tanah, atau sebuah “*three phase five limb transformer*”, yang memberi tenaga pada tiga buah volt meter yang menunjukkan tegangan fasa ke tanah, dan dari belitan “*open delta*” dapat digunakan untuk mengoperasikan satu tanda alarm.

Bila suatu gangguan menetap tidak bisa padam sendiri ada dua cara untuk menghilangkan gangguan tersebut, yaitu :

1. Dengan memasang rele otomatis yang mengakibatkan terjadinya pembukaan pada pemutusan daya yang terdekat dengan titik gangguan itu.
2. Membiarkan gangguan tersebut untuk beberapa waktu, sementara mencari letak gangguan itu dan kemudian mengisolirnya untuk diperbaiki.

Tergantung dari pengenalan waktu dari kumparan petersen, pengisoliran gangguan dapat ditunggu sampai waktu yang baik agar tidak merugikan atau mengganggu penyaluran daya ke konsumen.

Filosofi pemasangan rele cadangan adalah untuk mengamankan transformator dari kerusakan akibat gangguan luar. Jika gangguan ini tidak segera diisolasi akan menyebabkan beban lebih (*overload*) pada transformator sehingga dapat menyebabkan pemanasan lebih (*overheating*) dan kegagalan (*failure*) fungsi



itu guna mengetahui adanya gangguan diperlukan suatu bentuk proteksi yang lebih sensitif, yang dapat bekerja pada arus gangguan tanah, meskipun hanya sebesar 5 – 10 ampere.

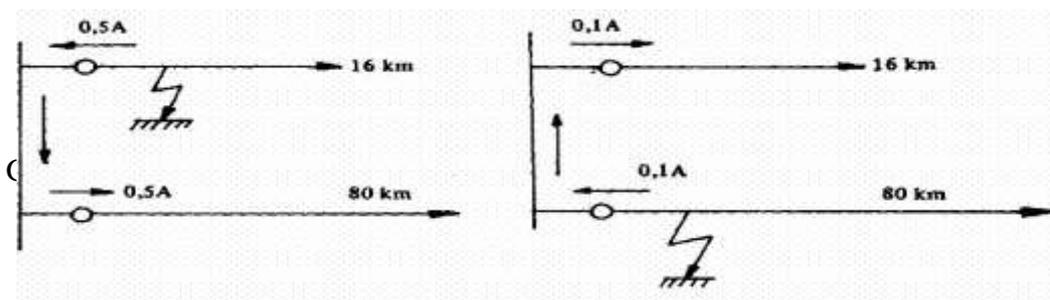
Di dalam sistem transmisi yang menggunakan kumparan Petersen, apabila kumparan ini ditala sempurna, maka arus gangguan ini hanya terdiri dari komponen rugi-rugi dan beberapa harmonis tinggi. Harmonis-harmonis ini dapat diabaikan sebab pengaruhnya pada rele gangguan tanah tidak begitu penting. Arus gangguan tanah ini menjadi tidak berbahaya lagi, sehingga sistem dapat beroperasi terus pada keadaan gangguan yang menetap. Tetapi keadaan ini tidak boleh dibiarkan terlalu lama karena dapat berkembang menjadi gangguan dua fasa ke tanah. Rele arus bocor (*earth leakage relay*) digunakan pada sistem radial untuk memberikan tanda bagi saluran yang terganggu atau untuk melepaskannya.

Penggunaan rele tanah tipe watt-meter sudah cukup baik untuk proteksi gangguan tanah. Rele ini akan memberikan suatu penunjukan bagi saluran yang terganggu. Rele tanah tipe watt-meter ini digerakan oleh tegangan netral ke tanah dan arus residu. Sensitivitasnya dipengaruhi oleh tahanan ke tanah pada titik gangguan.

#### 2.7.7. Hal-Hal Yang Menyebabkan Ketidakbenaran Operasi Dari Rele Gangguan Tanah.

Ada beberapa keadaan di mana rele arah gangguan tanah mungkin bisa gagal dalam operasinya, atau mungkin bisa memberikan penunjukan yang salah walaupun transformator arus atau transformator tegangan mempunyai kesalahan yang dapat diabaikan, seperti :

1. Panjang dari saluran yang dilindungi belum menjamin kebenaran operasi yang pasti. Gambar 2.13 memperlihatkan suatu sistem yang terdiri dari dua buah saluran dengan panjang yang sangat berbeda. Kumparan petersen berada pada ujung yang jauh berada dari saluran yang terpanjang. Apabila gangguan tanah yang terjadi pada saluran yang lebih pendek, kumparan petersen dianggap cukup menghasilkan kopel untuk mengerjakan rele. Tetapi bila gangguan itu terjadi pada saluran yang lebih panjang, mungkin tidak ada penunjukan pada kedua rele.
2. Rele arah gangguan tanah akan gagal memberikan penunjukan yang tepat dari letak gangguan dalam kejadian “*Cross Country Fault*”.



Gambar 2.13. Sistem yang terdiri dari dua buah saluran dengan panjang yang sangat berbeda.

## **BAB III**

### **METODE PENELITIAN**

#### **3.1. Jenis Penelitian**

Dalam penelitian ini penulis menggunakan jenis penelitian kuantitatif dan kualitatif. Kuantitatif adalah melakukan pengumpulan data berdasarkan pengukuran dalam yang dilakukan dalam penelitian ini yang hasil dari pengukuran itu diselesaikan dalam bentuk matematis, sedangkan jenis penelitian kualitatif adalah melakukan analisis penelitian berdasarkan data pengukuran kuantitatif.

#### **3.2. Tempat Dan Waktu Penelitian**

##### **3.2.1. Tempat Penelitian**

Tempat penelitian yang dilakukan penulis adalah di PT. PLN (Persero) Penyaluran dan Pusat Pengatur Beban Sumatera Unit Pelayanan Transmisi Medan sedangkan tempat penelitian di Gardu Induk Namurambe.

##### **3.2.2. Waktu Penelitian**

Waktu penelitian dan pencarian data di Instansi terkait penelitian dilaksanakan dari tanggal 02 Agustus 2017 sampai dengan selesai sekitar bulan 11 Agustus 2017, sedangkan jadwal penelitian yang direncanakan dari awal penelitian sampai selesai penelitian dapat dijabarkan oleh penulis sebagai berikut seperti tertera pada tabel 3.1. namun begitu jadwal ini dapat berubah-ubah jika rencana penelitian tidak sesuai dengan kenyataan dilapangan.

Tabel 3.1 Jadwal Tugas Akhir

No.	Kegiatan	Bulan Juni				Bulan Juli				Bulan Agustus				Bulan September			
		Minggu ke				Minggu ke				Minggu ke				Minggu ke			
		1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
1.	Pengajuan Judul	■	■														
2.	Pengajuan Proposal			■	■												
3.	Bimbingan Proposal					■	■										
4.	Riset lapangan							■	■	■	■						
5.	Penyusunan Skripsi											■	■	■	■		
6.	Bimbingan Skripsi											■	■	■	■	■	
7.	Seminar Skripsi													■	■	■	
8.	Sidang Meja Hijau																■

Sumber : Penulis, 2017

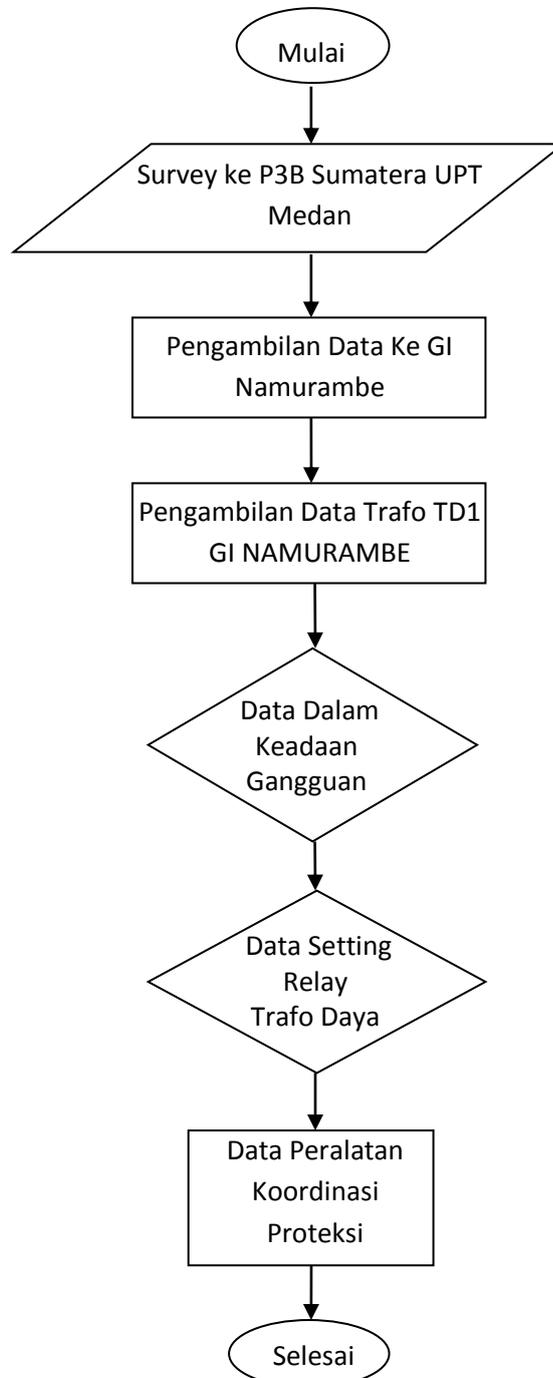
### 3.3. Metode Pengumpulan Data Penelitian

Dalam menyusun penelitian ini, kegiatan pengumpulan data dilakukan dengan beberapa cara antara, antara lain:

- 1) Daftar kepustakaan (*Library research*) : Sumber-sumber buku yang mempunyai data-data yang relevan dengan topik yang diambil peneliti.
- 2) Internet : Bahan-bahan yang tidak didapat pada perpustakaan dapat diperkuat dengan teori-teori yang didapat dari internet, karena informasi berdasarkan internet lebih bersifat *upto-date*.
- 3) *Interview* : Pada teknik ini penulis memperoleh data-data dari karyawan yang bekerja pada Gardu Induk Namurambe.
- 4) *Data Lapangan* : Pada teknik ini penulis memperoleh data-data peralatan dari output dari peralatan Gardu Induk Namurambe.

### 3.4. Diagram alir (Flowchart)

Langkah – langkah yang dilakukan pada penelitian ini dapat digambarkan pada sebuah diagram alir (Gambar 3.1)



Gambar 3.1 Diagram Alir Proses Penelitian

### 3.5. Analisa data Penelitian

Perencanaan Penelitian ini terdiri atas beberapa tahapan pelaksanaan, yaitu sebagai berikut :

#### 1. Studi Literatur

Tahapan ini mempelajari teori-teori dasar yang menunjang, yaitu tentang Gardu Induk Namurambe , transformator, analisis sistem tenaga, Sistem proteksi tenaga listrik, rele gangguan tanah dan analisis sistem tenaga listrik.

#### 2. Pengumpulan Data Materi

Pada tahapan pengumpulan data materi, penulis akan terjun langsung ke lokasi Gardu Induk PT. PLN (Persero) Penyaluran dan Pusat Pengatur Beban Sumatera Unit Pelayanan Transmisi Medan, untuk mengambil data-data yang dibutuhkan. Penulis melakukan pengukuran pada transformator, measurement display rele gangguan tanah serta mengumpulkan data-data pendukung dari pihak Gardu Induk Namurambe. Adapun data–data yang akan di kumpulkan melalui pengukuran dan pengamatan langsung di lokasi adalah:

- a) Data Peralatan
- b) Data Teknis

#### 3. Analisa dan Perhitungan Hasil Penelitian

Penulis akan melakukan perhitungan berdasarkan hasil pengukuran dan pengamatan mengenai materi-materi yang diangkat dalam Penelitian berikut:

- a) Perhitungan untuk mencari arus residu hanya disinggung pada penggunaan komponen simetris dan operator “a” serta menggunakan impedansi urutan sendiri.

- b) Perhitungan besar faktor ketidakseimbangan beban pada sistem yang dipasang rele gangguan tanah.
- c) Perhitungan besar setting arus pada rele gangguan tanah.
- d) Perhitungan waktu kerja rele gangguan tanah.

### 3.5.1. Data Peralatan

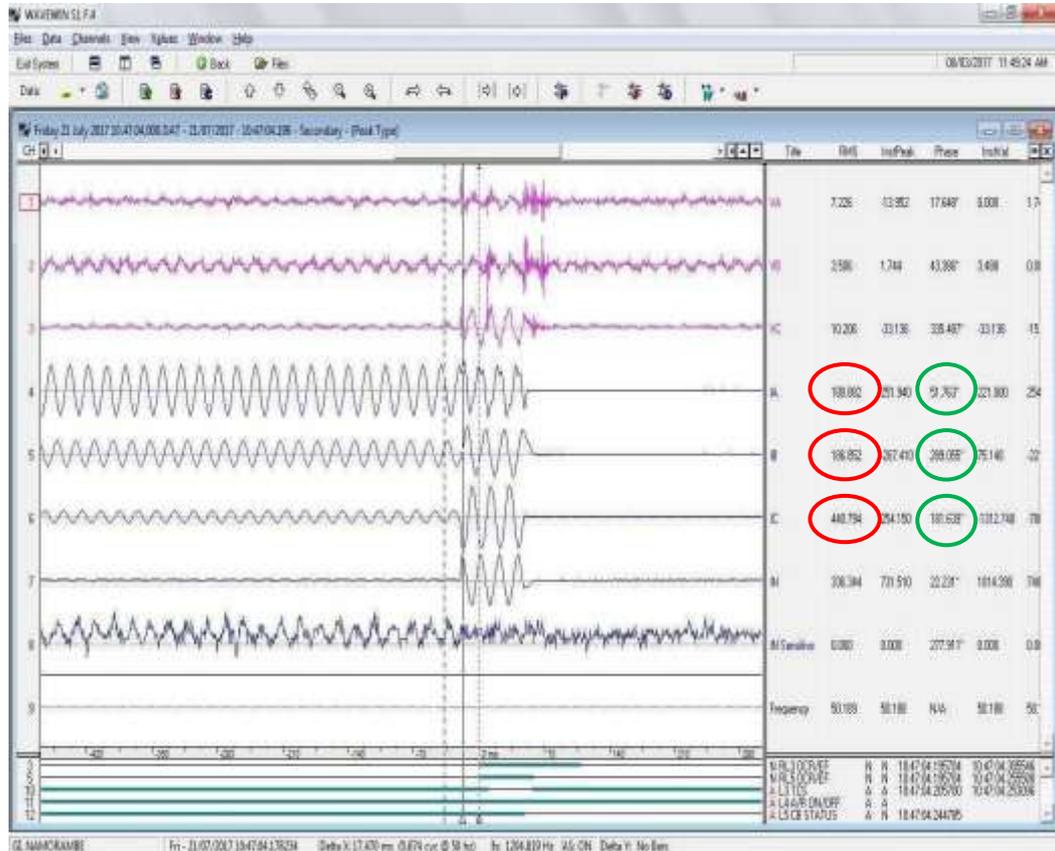
Data Peralatan Koordinasi Proteksi GI Namurambe.



Gambar : 3.2. Alat Kordinasi Proteksi GI Namurambe

### 3.5.2. Data Teknis

Data Beban Tidak Seimbang Pada Gardu Induk Namurambe.



Gambar : 3.3. Gambar Data Beban Tidak Seimbang

### 3.5.3. Data Trafo TD 1 GI Namurambe

PT PLN (PERSERO) P3B SUMATERA UPT MEDAN		
DATA TRAF0 TD 1 GI NAMURAMBE		
Kapasitas Trafo	60	MVA
Impedansi Teg	12.50	%
Belitan Trafo	YyD	
Tegangan HV	150	kV
Tegangan LV	20	kV
NGR HV	0	ohm
NGR LV	12	ohm
Data CT	Primer	Sekunder
CT sisi HV	300	1
CT sisi LV	2000	5
CT NGR/SBEF	1000	5
CT Kopel	2000	5
CT Penyulang	800	5
CCC Penyulang	800	
Arus Nominal		
- sisi HV	230.94	Ampere
- sisi LV	1,732.05	Ampere
Data Impedansi Sumber GI Dari <u>Digsilent</u>		
	R	+j X
Impedansi urutan Positif	0.00446	+j 0.02434 pu
Impedansi urutan Negatif	0.00661	+j 0.02384 pu
Impedansi Urutan Nol	0.00338	+j 0.01808 pu

Halaman	PROTEKSI TRAF0	DIBUAT OLEH	DIEVALUASI OLEH	DISETUJUI OLEH	Tanggal
1 / 4	TD 1 NAMURAM	IRVAN LEWI		JHON HENDRA	20/3/2017

Gambar : 3.4. Data Trafo TD 1 Gardu Induk Namurambe

## **BAB IV**

### **ANALISA DAN HASIL PEMBAHASAN**

#### **4.6. Pengaruh Ketidakseimbangan Beban Terhadap Kerja Rele Gangguan Tanah**

Gangguan tanah dapat di deteksi dan dibuka dengan bekerjanya pemutus daya dengan menggunakan rele pergeseran titik netral yang didisain untuk menangkap tegangan residu ke tanah. Arus urutan nol muncul bukan saja saat terjadinya suatu gangguan, namun terjadi juga pada faktor seperti beban yang tidak seimbang.

Ketidakseimbangan beban pada sistem daya listrik, belum tentu akan menghasilkan arus urutan nol pada rele gangguan tanah. Tetapi hal ini perlu diperhatikan kondisi sistem dan beban maupun metode deteksi arus urutan nol untuk rele gangguan tanah. Arus urutan nol dengan transformator hubungan residu. Terjadinya arus urutan nol pada rele gangguan tanah akan mempengaruhi kerja rele gangguan tanah. Pada uraian berikut akan diterangkan bagaimana pengaruh terjadi dan seberapa jauh ketidakseimbangan beban dapat mempengaruhi kerja rele gangguan tanah.

#### **4.7. Kondisi Beban Dan Sistem Yang Ditanahkan**

Beban yang tidak seimbang akan terjadi sirkulasi arus ketanah sistem antara sumber dan beban yang ditanahkan dan diteruskan oleh rele gangguan tanah ke netral sumber. Aliran arus ketanah ini akan dirasakan oleh rele gangguan tanah seolah-olah adanya gangguan tanah.

Ketidakeimbangan yang cukup besar membuat arus urutan nol yang cukup besar pula sehingga mampu untuk menggerakkan rele gangguan tanah, Besar arus urutan nol (*residu*) yang terjadi tergantung dari impedansi urutan sistem, impedansi pentanahan, tahanan tanah dan tegangan sistem, ini dapat dilihat pada Persamaan 4.1. dibawah ini.

$$I_0 = \frac{(Z_{11} + Z_1)(Z_{11} + Z_2) - Z_{12}Z_{10}}{\Delta} E_a \quad (4.1)$$

Persamaan 4.1 diperoleh dari Persamaan 3.16 pada Bab II uraian lebih jelas dapat dilihat pada Bab II. Persamaan 4.1 diatas diperoleh dengan mengabaikan unsur-unsur induktansi bersama dan kapasitansi saluran. Pada PLN (Perusahaan Listrik Milik Negara) sistem seperti ini diterapkan pada sistem distribusi 3 fasa 3 kawat tegangan 20 KV, pentanahan transformator dengan pentanahan langsung. Setting rele gangguan tanah terkecil harus diatas ketidakeimbangan beban maksimum. Sistem seperti ini sulit untuk membuat sensitifitas yang tinggi, karena sulit untuk membedakan arus residu yang diakibatkan oleh gangguan tanah atau beban yang tidak seimbang.

#### **4.8. Hubungan Arus Residu Dengan Rele Gangguan Tanah**

Pada waktu tidak ada gangguan tanah, penjumlahan vektor dari ketiga arus saluran nol (secara teoritis)

$$I_a + I_b + I_c = 0 \quad (4.2)$$

Sehingga vektor dari ketiga arus sekunder CT juga sama dengan nol.

$$I_{as} + I_{bs} + I_{cs} = 0 \quad (4.3)$$

Penjumlahan vektor dari ( $I_{as} + I_{bs} + I_{cs}$ ) disebut dengan arus residu (IR), apabila tidak terjadi gangguan tanah maka:

$$I_R = I_{as} + I_{bs} + I_{cs} = 0 \quad (4.4)$$

Karena rele arus gangguan tanah tidak bekerja, tetapi apabila terjadi gangguan tanah sistem menjadi terganggu dan  $(I_{as} + I_{bs} + I_{cs})$  memiliki nilai tertentu, oleh karena itu arus residu mengalir melalui rele arus gangguan tanah. Rele gangguan tanah bekerja akibat adanya gangguan tanah. Tetapi apabila terjadi gangguan cara kerja rele gangguan tanah sebagai berikut:

- a) Pada kondisi sistem seimbang jumlah arus fasa adalah nol sehingga tidak ada arus yang mengalir pada rele  $(I_{as} + I_{bs} + I_{cs}) = 0$ . Aliran arus terjadi akibat tidak seimbangnya aliran arus pada fasa-fasa sistem  $(I_{as} + I_{bs} + I_{cs})$ . Ketidakseimbangan fasa-fasa sistem diakibatkan oleh gangguan satu fasa atau dua fasa ketanah maupun beban yang tidak seimbang.
- b) Bila terjadi gangguan beban yang tidak seimbang maka  $(I_{as} + I_{bs} + I_{cs} \neq 0)$  yaitu akan memiliki nilai tertentu sehingga ada arus yang mengalir melalui rele. Apabila arus yang mengalir melalui rele lebih besar dari arus setting rele, maka rele akan bekerja. Ketidakseimbangan beban yang sudah melewati batas normal ini akan diakibatkan adanya fluktuasi beban.

#### **4.4. Batasan Ketidakseimbangan Beban Yang Dapat Mempengaruhi Kerja Rele Gangguan Tanah**

Arus residu yang mengalir pada rele gangguan tanah akibat beban yang tidak seimbang dalam sistem daya listrik tiga fasa, bergantung dari besar dan kecilnya beban yang terjadi dan faktor ketidakseimbangan beban. Beban yang berbeda dengan faktor ketidakseimbangan beban yang sama tidak akan memberikan arus residu yang sama. Beban yang besar akan memberikan arus residu yang besar pula.

Aliran residu pada rele gangguan tanah lebih dari setting rele gangguan tanah itu sendiri akan membuat rele gangguan tanah bekerja. Aliran arus residu pada rele gangguan tanah akibat beban yang tidak seimbang akan dipengaruhi oleh kenaikan beban dan faktor ketidakseimbangan beban.

Batas ketidakseimbangan beban yang dapat mempengaruhi kerja rele gangguan tanah, bila mana arus residu yang terjadi akibat beban tidak seimbang melewati setting rele gangguan tanah. Untuk memperbesar batasan ketidakseimbangan ini adalah dengan memperbesar setting rele gangguan tanah.

Ketidakseimbangan beban dapat mempengaruhi kerja rele gangguan tanah faktor terutama pada beban yang cukup besar. Dalam penentuan setting rele gangguan tanah faktor ketidakseimbangan beban perlu mendapatkan perhatian. Supaya rele gangguan tanah tidak berpengaruh terhadap beban yang tidak seimbang, setting rele gangguan tanah harus lebih besar dari arus residu yang terjadi akibat beban yang tidak seimbang pada beban maksimum dan faktor ketidakseimbangan.

Pengaturan arus beban diatur dengan anggapan faktor daya untuk ketiga fasa adalah sama, jadi arus fasanya mempunyai selisih sudut satu dengan yang lainnya  $120^\circ$ . Ketidakseimbangan arus diatur sehingga didapatkan arus residu sama dengan setting primer arus rele gangguan tanah.

Ketidakseimbangan arus ini dapat menentukan besar komponen arus simetrisnya, faktor ketidakseimbangan beban dan daya yang dihasilkan.

Dimana :

$$\text{Arus Urutan Nol (residu)} \quad : I_n = 3I_{a0} = I_a + I_b + I_c$$

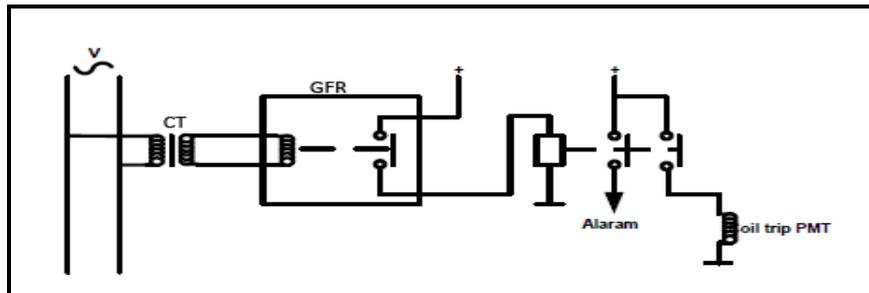
$$\text{Arus Urutan positif} \quad : I_{a1} = 1/3 (I_a + a \cdot I_b + a^2 \cdot I_c)$$

Arus Urutan Negatif :  $I_{a2} = 1/3 ( I_a + a^2 \cdot I_b + a \cdot I_c )$

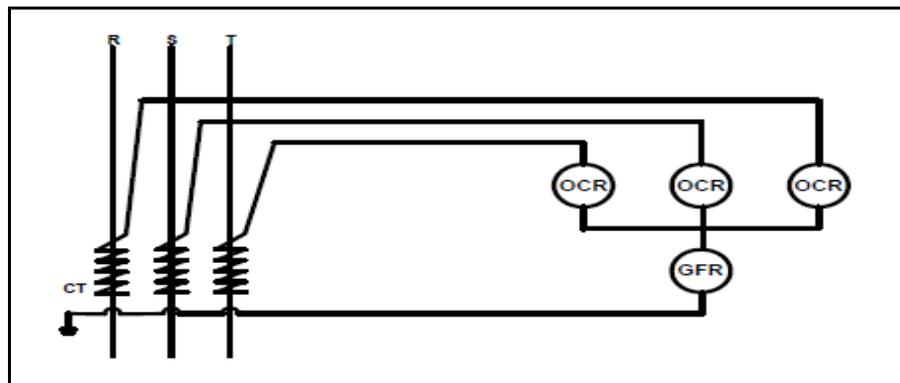
Faktor ketidakseimbangan beban :  $( I_{a2} / I_{a1} ) \times 100\%$

#### 4.5. Rele Gangguan Tanah Pada Gardu Induk Namurambe

##### 4.5.1. Rangkaian Rele Pada Gardu Induk

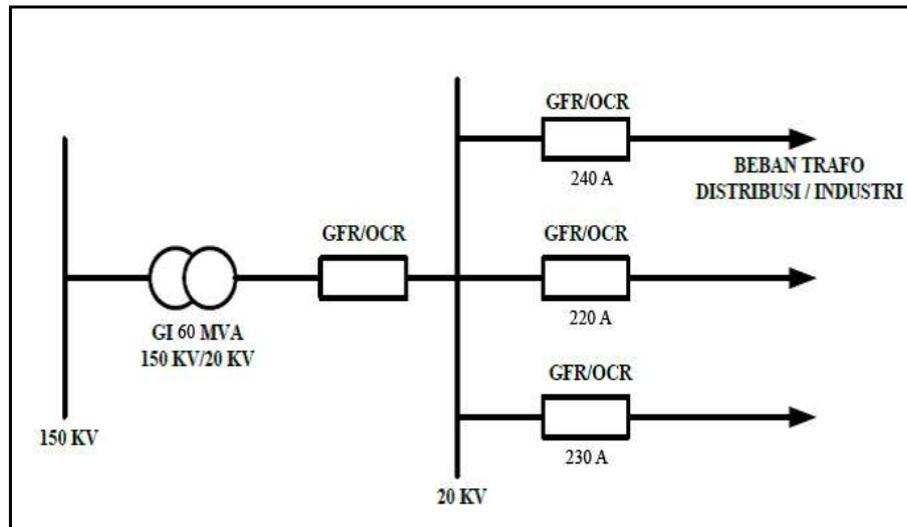


Gambar 4.1. Rangkaian Rele



Gambar 4.2. GFR Pada 3 Fasa GI , GFR (*Ground Fault Relay*)

Berfungsi sebagai pengaman fasa dan hubung tanah pada sistem yang ditanahkan.



Gambar 4.3. Diagram satu garis rangkaian Rele Gangguan Tanah

#### 4.5.2. Setting Arus dan Waktu Kerja Rele Gangguan Tanah

Pertimbangan utama dalam mendisain koordinasi proteksi gangguan tanah dengan *Neutral Ground Resistance* (NGR) 12 Ohm 1000 Amp adalah kemampuan thermis dari NGR tersebut. Setelan rele direkomendasikan tidak melebihi 1/2 kemampuan thermis NGR.

Mengingat bahwa pada sistem 20 kV dengan pentanahan NGR 12 Ohm, dimana level arus gangguan relatif sama (*flat*) dengan berubahnya lokasi gangguan, maka lebih baik digunakan karakteristik definite pada rele-rele disisi penyulang dan incoming trafo.

Untuk menghitung setelan arus rele gangguan tanah digunakan rumus sebagai berikut:

$$I_{set} \text{ (Primer)} = 20\% \times I_{n \text{ NGR}} \text{ Amp} \quad (4.5)$$

$$I_{set} \text{ (Sekunder)} = \frac{I_{set} \text{ (Primer)}}{RatioCT} \text{ Amp} \quad (4.6)$$

Sedangkan untuk waktu kerja GFR menggunakan rumus :

$$t = \frac{0.14 \times Tms}{\left(\frac{I_{fault}}{I_{set}}\right)^{0,02} - 1} \quad (4.7)$$

Dimana:

t = Waktu operasi rele (detik)

Tms = *Time multiple setting*

I<sub>fault</sub> = Arus gangguan hubung singkat satu fasa ketanah (Amp)

I<sub>set</sub> = Arus yang disetting pada rele (Amp)

#### **4.5.2.1. Perhitungan Setting Arus dan Waktu Kerja Rele Gangguan Tanah di Feeder (Penyulang) 20 kV dan Pada Incoming Trafo**

##### **1. Perhitungan Setting Arus dan Waktu Kerja Rele Gangguan Tanah di Feeder 20 kV**

Setting Arus dan Waktu Kerja GFR di Feeder 20 kV TD1 60 MVA

Data Transformator GI:

Kapasitas Trafo : 60 MVA

Tegangan : 150 / 20 kV

Rasio CT : 800 /5

NGR : 12 Ohm

##### **a. Setting Arus Ground Fault Relay (GFR)**

Untuk setting arus GFR pada Feeder lebih kecil dari setting arus pada incoming trafo yaitu 20 %. Maka dapat dirumuskan :

$$\begin{aligned} I_{set \text{ (Primer)}} &= 20 \% \times I_n \text{ NGR} \\ &= 0,2 \times 1000 \text{ Amp} \\ &= 200 \text{ Amp} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
I_{set \text{ (Sekunder)}} &= \frac{I_{set \text{ (primer)}}}{RatioCT} \\
&= \frac{200 \text{ Amp}}{800/5} \\
&= \frac{200 \text{ Amp}}{160} \\
&= 1,25 \text{ Amp}
\end{aligned}$$

**b. Waktu kerja Ground Fault Relay (GFR)**

$$\begin{aligned}
I_{fault} &= 440,794 \times I_{set \text{ sekunder}} \\
&= 440,794 \times 0,4 \text{ A} \\
&= 176,3176 \text{ Amp}
\end{aligned}$$

$$Tms = 0,1$$

Maka:

$$t = \frac{0,14}{\left(\frac{I_{fault}}{I_{set}}\right)^{0,02} - 1} \times Tms$$

$$t = \frac{0,14}{\left(\frac{176,3176}{0,4}\right)^{0,02} - 1} \times 0,1$$

$$t = \frac{0,14}{(440,794)^{0,02} - 1} \times 0,1$$

$$t = \frac{0,14}{0,129} \times 0,1$$

$$t = 0,10 \text{ dtk}$$

## 2. Setting Arus dan Waktu Kerja Rele Gangguan Tanah di Incoming Trafo 20 kV

Setting Arus dan Waktu Kerja GFR di Incoming Trafo 20 kV

Data Transformator GI:

Kapasitas Trafo: 60 MVA

Tegangan : 150 / 20 KV

Rasio CT : 2000 / 5

NGR : 12 Ohm

### a. Setting Arus Ground Fault Relay (GFR)

Untuk setting arus GFR pada incoming trafo di pilih dua kali lebih besar dari setting arus pada feeder nya yaitu 40 %. Maka dapat dirumuskan :

$$\begin{aligned} I_{set \text{ (Primer)}} &= 40 \% \times I_{n \text{ NGR}} \\ &= 0,4 \times 1000 \text{ Amp} \\ &= 400 \text{ Amp} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} I_{set \text{ (Sekunder)}} &= \frac{I_{set \text{ (primer)}}}{RatioCT} \\ &= \frac{400 \text{ Amp}}{2000 / 5} \\ &= \frac{400 \text{ Amp}}{400} \\ &= 1 \text{ Amp} \end{aligned}$$

**b. Waktu kerja Ground Foul Relay (GFR)**

$$\begin{aligned} I_{\text{fault}} &= 440,794 \times I_{\text{set,sekunder}} \\ &= 220,397 \times 0,5 \text{ A} \\ &= 220,397 \text{ Amp} \end{aligned}$$

$$T_{\text{ms}} = 0,23$$

Maka:

$$t = \frac{0,14}{\left(\frac{I_{\text{fault}}}{I_{\text{set}}}\right)^{0,02} - 1} \times T_{\text{ms}}$$

$$t = \frac{0,14}{\left(\frac{220,397}{0,5}\right)^{0,02} - 1} \times 0,23$$

$$t = \frac{0,14}{(440,794)^{0,02} - 1} \times 0,23$$

$$t = \frac{0,14}{0,129} \times 0,23$$

$$t = 0,24 \text{ dtk}$$

#### 4.5.2.2. Rele Arah Gangguan Tanah (*Directional earth fault relay*)

Rele arah (*directional relay*) digunakan apabila arus gangguan mengalir dari banyak jurusan ke titik gangguan melalui lokasi dari rele. Rele yang digunakan untuk rele arah gangguan tanah mempunyai jenis yang sama seperti yang digunakan untuk proteksi pada arus lebih. Kumparan arusnya adalah dari elemen arah dihubungkan guna mendeteksi arus residu dari transformator arus, dan kumparan tegangan dihubungkan pada tegangan yang sesuai guna memberikan kopel yang sesuai pula. Jadi pada proteksi gangguan tanah, dengan arus residu  $I_r$  dan tegangan residu  $V_r$ , kopel pada rele ini akan sebanding dengan  $I_r \times V_r \cos(Q - \alpha)$  di mana  $Q$  adalah sudut kopel maksimum dari rele dan  $\alpha$  adalah sudut antara tegangan dan arus yang dipakai.

Arus residu untuk proteksi saluran (feeder) didapat dari penjumlahan arus-arus fasa yang menggunakan transformator arus tiga fasa atau sebuah transformator arus jenis “*core balance current transformer*”. Bila arus-arus fasanya dinyatakan dengan  $I_A, I_B, I_C$  jumlah vektornya adalah :

$$I_A + I_B + I_C = 0 \text{ pada keadaan normal.}$$

### 4.5.2.3. Perhitungan Ketidakseimbangan Beban Phasa Pada Gardu Induk

#### Namurambe

Ketidakseimbangan arus ini dapat menentukan besar komponen arus simetrisnya, faktor ketidakseimbangan beban dan daya yang dihasilkan.

Dimana :

$$\text{Arus Urutan Nol (residu)} \quad : I_n = 3I_{a0} = I_a + I_b + I_c$$

$$\text{Arus Urutan positif} \quad : I_{a1} = 1/3 (I_a + a \cdot I_b + a^2 \cdot I_c)$$

$$\text{Arus Urutan Negatif} \quad : I_{a2} = 1/3 (I_a + a^2 \cdot I_b + a \cdot I_c)$$

$$\text{Faktor ketidakseimbangan beban} \quad : (I_{a2}/I_{a1}) \times 100\%$$

1) Perhitungan Arus ( $I_A$  ,  $I_B$  ,  $I_C$ ) dalam keadaan tidak seimbang adalah sebagai berikut:

$$I_A = 180,882 \angle 51,7636^\circ$$

$$I_B = 186,852 \angle 289,055^\circ$$

$$I_C = 440,794 \angle 181,639^\circ$$

Maka:

$$I_a = 180,882 \angle 51,763^\circ = 111,95 + j 142,1 \text{ Amp}$$

$$I_b = 186,852 \angle 289,055^\circ = 61,00 - j 176,6 \text{ Amp}$$

$$I_c = 440,794 \angle 181,639^\circ = -440,61 - j 12,6 \text{ Amp}$$

### A. Arus Urutan Nol

$$\begin{aligned}I_n &= 3 I_{a0} = I_a + I_b + I_c \\&= (111,95 + j 142,1) \text{ Amp} + (61,00 - j 176,6) \text{ Amp} + \\&\quad (-440,61 - j 12,6) \\&= (-267,66 - j 47,1) \\&= 271,7 \angle 9,98^\circ \text{ Amp}\end{aligned}$$

### B. Arus Urutan Positif

$$\begin{aligned}I_{a1} &= 1/3 ( I_a + a.I_b + a^2.I_c ) \\&= 1/3 (180,882 \angle 51,763^\circ) + (1 \angle 120^\circ \times 186,852 \angle 289,055^\circ) + \\&\quad (1 \angle 240^\circ \times 440,794 \angle 181,639^\circ) \\&= 1/3 (111,95 + j 142,1) + (-0,5 + j 0,86) \times (61,00 - j 176,6) + \\&\quad (-0,5 - j 0,86) \times (-440,61 - j 12,6) \\&= 1/3 (301,7 + j 1,06) \\&= 1/3 ( 301,7 \angle 0,20^\circ) \\&= 100,5 \angle 0,20^\circ \text{ Amp}\end{aligned}$$

### C. Arus Urutan Negatif

$$\begin{aligned}I_{a2} &= 1/3 ( I_a + a^2.I_b + a.I_c ) \\&= 1/3 (180,882 \angle 51,763^\circ) + (1 \angle 240^\circ \times 186,852 \angle 289,055^\circ) + (1 \\&\quad \angle 120^\circ \times 440,794 \angle 181,639^\circ) \\&= 1/3 (111,95 + j 142,1) + (-0,5 - j 0,86) \times (61,00 - j 176,6) + \\&\quad (-0,5 + j 0,86) \times (-440,61 - j 12,6) \\&= 1/3 (301,75 - j 283,14)\end{aligned}$$

$$= 1/3 ( 413,7 \angle 43,1^\circ )$$

$$= 137,9 \angle 43,1^\circ \text{ Amp}$$

D. Faktor Ketidakseimbangan Beban:

$$\begin{aligned} \text{FK} &= \frac{I_{a2}}{I_{a1}} \times 100\% \\ &= \frac{137,9 \angle 43,1^\circ}{100,5 \angle 0,20^\circ} \times 100\% \\ &= 137,21\% \end{aligned}$$

#### 4.5.2.4. Perhitungan Arus Gangguan Hubung Singkat 1 Fasa ke Tanah

Rumus yang digunakan untuk menghitung besarnya arus gangguan hubung singkat 1 fasa ke tanah:

$$I_{\text{Fault } 1\text{Fasa}} = \frac{3 \times V_{ph}}{Z1 + Z2 + Z0 + NGR}$$

Di mana:

I = Arus gangguan 1 Fasa ke tanah yang dihitung.

V = Tegangan fasa-netral sistem 20 kV adalah  $20.000/\sqrt{3} = V_{ph}$

Z1 = Impedansi urutan positif yang diperoleh dari perhitungan.

Z2 = Impedansi urutan negatif yang diperoleh dari perhitungan.

Z0 = Impedansi urutan nol yang diperoleh dari perhitungan.

Maka arus gangguan hubung singkat 1 Fasa ke Tanah pada Gardu Induk

Namurambe dapat dihitung:

$$\begin{aligned}
 I_{\text{Fault 1 Fasa}} &= \frac{3 \times V_{ph}}{Z_1 + Z_2 + Z_0 + NGR} \\
 &= \frac{3 \times 20.000 / \sqrt{3}}{(100,5 \angle 0,20^\circ) + (137,9 \angle 43,1^\circ) + (271,7 \angle 9,98^\circ) + 1000} = \\
 &= \frac{34641,016}{(100,49 + j 0,35) + (100,68 + j 94,22) + (267,58 + j 47,08) + 1000} \\
 &= \frac{34641,016}{(468,75 + j 141,65) \text{ Amp} + 1000} \\
 &= \frac{34641,016}{1468,75 + j 141,65} \\
 &= 23,58 + j 141,65 \\
 &= 143,59 \angle 80,54^\circ \text{ Amp}
 \end{aligned}$$

Dari perhitungan di atas, aliran arus gangguan lebih besar dari setting rele gangguan tanah, dan akan membuat Ground Fault Relay (GFR) bekerja.

## **BAB V**

### **PENUTUP**

#### **5.1. Kesimpulan**

Berdasarkan hasil pembahasan dan analisa yang telah di uraikan diatas, maka dapat diambil beberapa kesimpulan sebagai berikut :

1. Dari hasil perhitungan yang dilakukan, maka setting rele arus lebih untuk Ground Fault Relay (GFR) sebesar 200 Ampere untuk sisi primer dan 1,25 Ampere untuk sisi sekunder. Pada saat terjadi gangguan, nilai setting pada rele GFR ini langsung dapat merasakan arus gangguan yang lebih besar.
2. Dari hasil perhitungan yang di lakukan, maka waktu kerja Ground Fault Relay (GFR) sebesar 0,10 detik dengan Time Multiple Setting (TMS) sebesar 0,1.
3. Dari hasil perhitungan yang dilakukan, maka didapatkan arus gangguan hubung singkat satu fasa ke tanah sebesar 143,59 A. Nilai ini membuat rele gangguan tanah bekerja karena nilai arus gangguan telah mencapai nilai setting arus pada rele tersebut, maka rele akan mengirim perintah trip (lepas) kepada Pemutus Tenaga (PMT) atau Circuit Breaker (CB) setelah tunda waktu yang diterapkan pada setting rele.
4. Dari hasil perhitungan yang dilakukan, maka diperoleh faktor ketidakseimbangan bebannya ( $S_T$ ) adalah 137,21%

## **5.2. Saran**

Untuk mencegah agar tidak terjadinya ketidakseimbangan beban pada masing-masing fasa tetap diadakan pengecekan pada Ground Fault Relay (GFR) sebagai peralatan proteksi.

## DAFTAR PUSTAKA

Abdillah. "Penyeimbangan Beban Pada Gardu Distribusi Dengan Metode Seimbang Beban Sehari-hari di PT. PLN Area Bukittinggi" . *Jurnal*. Surabaya.

*Buku Petunjuk Batasan Operasi dan Pemeliharaan Peralatan Penyaluran Tenaga Listrik, Pemutus Tenaga*, PT.PLN (Persero) P3B SUMUT.

*Data Beban dan Penentuan Settingan Rele OCR dan GFR* PT.PLN (Persero) P3B SUMUT Gardu Induk Namurambe.

Hasbulah. "Analisa Pengaruh Beban Tidak Seimbang Terhadap Rugi Daya Listrik Pada Jaringan Distribusi Sekunder". *Jurnal*. Sriwijaya.

Hutauruk, T.S. 1986. *Pengetanahan Netral Sistem Tenaga dan Pengetanahan Peralatan*. Jakarta: Erlangga.

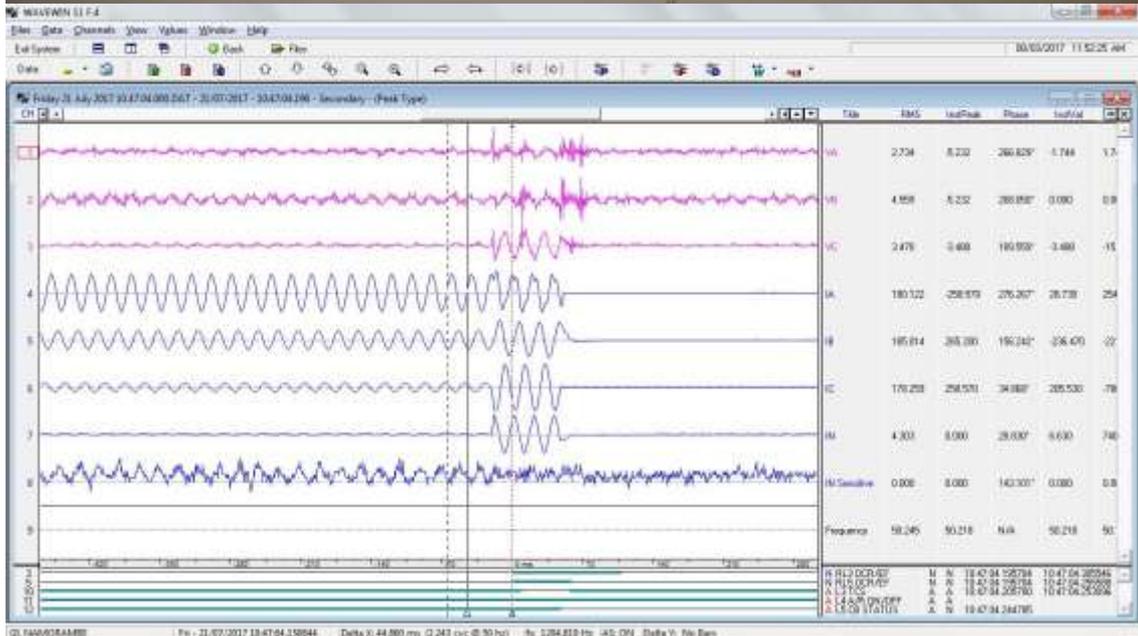
<http://konversi.wordpress.com/2011/04/15/ketidakseimbangan-tegangan-dan-pengaruhnya>.

<http://www.scribd.com/doc/83134260/Rele-Gangguan-Tanah.com/2012/04/23>

Turnip Rimson, Johannes. Zulkarnaen Pane. "Analisis Ketidakseimbangan Beban Terhadap Kerja Rele Gangguan Tanah di Gardu Induk Aplikasi Pada PT. PLN (persero) Gardu Induk Paya Pasir". *Jurnal*. Medan.

Lampiran:

- Data Peralatan Koordinasi Proteksi GI Namorambe



- Dalam Keadaan Gangguan

