PENGARUH PEMBEBANAN TIGA FASA SEIMBANG DAN TIDAK SEIMBANG TERHADAP TEGANGAN KELUARAN PADA TRANSFORMATOR HUBUNGAN DELTA TERBUKA (V-V)

SKRIPSI

KONSENTRASI TEKNIK ENERGI ELEKTRIK

Diajukan untuk memenuhi persyaratan

memperoleh gelar Sarjana Teknik

Disusun oleh:

ALI RIDHO

NIM. 125060300111058

UNIVERSITAS BRAWIJAYA

FAKULTAS TEKNIK

MALANG

2018

repository.ub.ac.id

repository.ub.ac.id

KATA PENGANTAR

Puji syukur kehadirat Allah SWT dengan rahmat dan hidayah-Nya skripsi berjudul "Pengaruh Pembebanan Tiga Fasa Seimbang dan Tidak Seimbang Terhadap Tegangan Keluaran Pada Transformator Hubungan Delta Terbuka (V-V)" dapat terselesaikan. Dalam kesempatan ini diucapkan terima kasih kepada yang telah berkenan memberikan bantuan secara langsung maupun tidak langsung kepada:

1. Bapak Hadi Suyono, S.T., M.T., Ph.D. dan Ibu Ir. Nurussa'adah, M.T. selaku Ketua dan Sekretaris Jurusan Teknik Elektro.
2. Ibu Dr. Rini Nur Hasanah, S.T., M.Sc. dan Bapak Ali Mustofa S.T., M.T. selaku Ketua Kelompok Dosen Keahlian Teknik Energi Elektrik dan Ketua Program Studi Jurusan Teknik Elektro.
3. Bapak Ir. Hery Purnomo, M.T. dan Bapak Ir. Unggul Wibawa, M.Sc. atas segala bimbingan, kritik, dan saran yang telah diberikan.
4. Bapak Eka Maulana, S.T., M.T., M.Eng. selaku dosen pembimbing akademik beserta seluruh dosen dan karyawan Jurusan Teknik Elektro yang selalu membantu penulis selama perkuliahan.
5. Keluarga tercinta Bapak Parman, Ibu Sulastri , Adik Vina Dwi Kurniasari atas segala macam dukungan dan do'a yang telah diberikan kepada penulis hingga terselesaikannya skripsi ini.
6. Asisten Laboratorium Sistem Daya Elektrik dan Mesin Elektrik yang telah turut andil memberikan memberikan waktu, tenaga, pikiran, kebersamaan, semangat, dan saling mendukung dalam pengerjaan skripsi.
7. Seluruh teman-teman UNPAR atas bantuan, motivasi, dan kebersamaan dalam proses pengerjaan skripsi.
8. Seluruh teman-teman Voltage 2012, terutama teman-teman konsentrasi Teknik Energi Elektrik (POWER) yang telah berbagi suka dan duka dalam menjalani perkuliahan.
9. Semua pihak yang telah membantu dan tidak bisa penulis sebutkan satu persatu, terimakasih banyak atas semua bantuannya.

UNIVERSITAS BRAWIJAYA

Pada akhirnya, disadari bahwa skripsi ini masih belum sempurna. Oleh karena itu, sangat diharapkan kritik dan saran yang membangun. Dan diharapkan semoga skripsi ini dapat bermanfaat bagi pengembangan ilmu pengetahuan dan teknologi bagi masyarakat.

Malang, November 2018

Penulis

repository.ub.ac.id
UNIVERSITAS BRAWIJAYA

RINGKASAN

Ali Ridho, Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitaas Brawijaya, November 2018, **Pengaruh Pembebanan Tiga Fasa Seimbang dan Tidak Seimbang Terhadap Tegangan Keluaran Pada Transformator Hubungan Delta Terbuka (V-V)**. Dosen Pembimbing : Ir. Hery Purnomo, M.T. dan Ir. Unggul Wibawa, M.Sc.

Saat ini tenaga listrik merupakan kebutuhan yang utama, baik untuk kehidupan rumah tangga maupun untuk kebutuhan industri. Ketersediaan tenaga listrik yang stabil dan kontinyu merupakan syarat mutlak yang harus dipenuhi dalam memenuhi kebutuhan akan tenaga listrik. Dalam memenuhi kebutuhan tenaga listrik tersebut, terjadi pembagian beban yang awalnya merata, tetapi karena ketidakserempakan waktu penyalaan beban-beban tersebut maka menimbulkan ketidakseimbangan beban yang berdampak pada penyediaan tenaga listrik. Ketidakseimbangan beban antar tiap fasa (fasa R, fasa S, fasa T) inilah yang menyebabkan mengalirnya arus pada netral trafo. Transformator adalah salah satu instrumen yang paling penting dalam sistem daya yang harus beroperasi secara efisien dan andal.

Pada penelitian ini dikaji pengaruh beban seimbang dan tidak seimbang terhadap tegangan keluaran transformator tiga fasa yang terhubung delta terbuka. Transformator hubungan delta terbuka merupakan transformator hubungan khusus yang dapat digunakan ketika salah satu fasa mengalami kerusakan.

Dalam penelitian ini dilakukan dua kali pengujian. Pengujian pertama yaitu pengujian dengan beban seimbang dan pengujian yang kedua yaitu pengujian dengan beban tidak seimbang. Dari pengujian tersebut didapatkan bahwa semakin besar beban yang dilayani maka tegangan keluaran transformator hubungan delta terbuka akan semakin menurun sekalipun beban yang di layani seimbang serta akan mengakibatkan perbedaan besar tegangan keluaran antara fasa-fasanya sehingga mengakibatkan tegangan keluarannya tidak seimbang. Ketika transformator melayani beban yang tidak seimbang maka tegangan keluaran transformator akan tidak seimbang pula semakin besar rata-rata ketidakseimbangan beban maka perbedaan tegangan antara fasa R, S dan T akan semakin besar.

Kata kunci - Delta terbuka, Tegangan keluaran, Beban seimbang, Beban tidak seimbang

repository.ub.ac.id
UNIVERSITAS BRAWIJAYA

repository.ub.ac.id

SUMMARY

Ali Ridho, Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, University of Brawijaya. November 2018. **The Effect of Balanced and Unbalanced Three-Phase Load on Output Voltage in Open Delta Connection Transformers (V-V).** Academic Supervisor : Ir. Hery Purnomo, M.T. dan Ir. Unggul Wibawa, M.Sc.

Nowadays electricity is the main needs, both for domestic life and for industrial needs. The availability of stable and continuous electricity is an absolute requirement that must be met in meeting the demand for electricity. In providing the electricity needs, the initial load distribution is evenly distributed, but due to the uneven timing of the load, it creates a load imbalance which impacts on the supply of electricity. The imbalance of the load between each phase (phase R, phase S, phase T) is what causes the current to flow to the neutral of the transformer. The transformer is one of the most important instruments in the power system that must operate efficiently and reliably.

In this study, the effect of balanced and unbalanced load on the output voltage of the three phase transformer connected to the open delta is examined. The open delta connection transformer is a particular connection transformer that can be used when one phase is damaged.

In this study two tests were carried out. The first test is testing with a balanced load and the second test is testing with an unbalanced load. From the test it was found that the greater the load served, the transformer output voltage of the open delta connection will decrease even though the load served is balanced and will cause a difference in the output voltage between the phases resulting in unbalanced output voltage. When the transformer serves an unbalanced load, the output voltage of the transformer will be unbalanced as well as the greater the average load imbalance, the greater the difference between the R, S and T phases.

Keywords – Open Delta, Output Voltage, Balanced Load, Unbalanced Load

UNIVERSITAS BRAWIJAYA

DAFTAR ISI

KATA PENGANTAR i
DAFTAR ISI iii
DAFTAR GAMBAR v
DAFTAR TABEL vii
DAFTAR LAMPIRAN viii
BAB I PENDAHULUAN 1
1.1 Latar Belakang 1
1.2 Rumusan Masalah 2
1.3 Batasan Masalah 3
1.4 Tujuan 3
1.5 Manfaat 3
1.6 Sistematika Penulisan 3
BAB II TINJAUAN PUSTAKA 5
2.1 Transformator 5
2.1.1 Prinsip Kerja Transformator 6
2.2 Transformator Tiga Fasa 7
2.3 Hubungan Tiga Fasa dalam Transformator 8
2.3.1 Hubungan Bintang (Y) 8
2.3.2 Hubungan Delta (Δ) 9
2.4 Jenis-jenis Hubungan Belitan Transformator Tiga Fasa 9
2.4.1 Hubungan Bintang-Bintang (Y-Y) 10
2.4.2 Hubungan Bintang-Delta (Y-Δ) 11
2.4.3 Hubungan Delta-Bintang (Δ-Y) 12
2.4.4 Hubungan Delta-Delta (Δ-Δ) 13
2.5 Hubungan Transformator Tiga Fasa Menggunakan Dua Transformator 14
2.5.1 Transformator Tiga Fasa Hubungan Delta Terbuka 14
2.5.2 Pemakaian Transformator tiga Fasa Hubungan Delta Terbuka 16
2.5.3 Daya Pada Transformator Tiga Fasa Hubungan Delta Terbuka 17
2.6 Rangkaian Beban Tiga Fasa Seimbang 20
2.7 Rangkaian Beban Tiga Fasa Tidak Seimbang 23

repository.ub.ac.id
UNIVERSITAS BRAWIJAYA

BAB III METODE PENELITIAN 25
3.1 Studi Literatur 26
3.2 Pengujian transformator 26
3.2.1 Pengujian Berbeban 26
3.3 Peralatan Yang Digunakan 27
3.4 Rangkaian Pengujian 28
3.5 Prosedur Pengujian 29
3.6 Pengambilan Data dan Analisis 30
3.7 Kesimpulan dan Saran 30
BAB IV ANALISIS DAN PEMBAHASAN 31
4.1 Data Transformator 31
4.2 Pengujian Beban Seimbang 32
4.3 Pengujian Beban Tidak Seimbang 35
4.3.1 Pengujian dengan 2 fasa dibebani sama sedangkan 1 fasa dibebani berbeda 35
4.3.2 Pengujian Dengan Masing-masing Fasa Dibebani Berbeda 40
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN 49
5.1 Kesimpulan 49
5.2 Saran 50
LAMPIRAN 52

repository.ub.ac.id
UNIVERSITAS BRAWIJAYA

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Transformator tanpa beban. 6
Gambar 2.2 Hubungan bintang. 8
Gambar 2.3 Hubungan delta. 9
Gambar 2.4 Hubungan bintang-bintang (Y-Y). 10
Gambar 2.5 Hubungan bintang-delta (Y-Δ). 11
Gambar 2.6 Hubungan delta-bintang (Δ-Y). 12
Gambar 2.7 Hubungan delta-delta (Δ-Δ). 13
Gambar 2.8 Transformator hubungan delta terbuka. 15
Gambar 2.9 (a) Tegangan dan arus pada transformator hubungan delta-delta (Δ-Δ). (b) tegangan dan arus pada transformator hubungan delta terbuka (V-V). 17
Gambar 2.10 Diagram fasor tegangan dan arus pada transformator delta terbuka. 19
Gambar 2.11 Vektor tegangan dan arus transformator delta terbuka pada keadaan tidak seimbang. 20
Gambar 2.12 Sistem beban tiga fasa seimbang hubungan bintang (Y). 20
Gambar 2.13 Fasor tegangan dan arus beban terhubung bintang (Y). 21
Gambar 2.14 Beban tiga fasa seimbang hubungan delta (Δ). 22
Gambar 2.15 Fasor tegangan dan arus beban terhubung delta. 22
Gambar 2.16 Beban tidak seimbang terhubung bintang (Y) empat kawat dan tiga kawat. 23
Gambar 3.1 Diagram alir penelitian. 29
Gambar 3.2 Rangkaian pengujian transformator hubungan delta terbuka berbeban. 29
Gambar 3.3 Diagram pengujian beban seimbang dan tidak seimbang. 29
Gambar 4.1 Grafik hubungan antara tegangan keluaran fasa R terhadap arus beban..... 33
Gambar 4.2 Grafik hubungan antara tegangan keluaran fasa S terhadap arus beban. 33
Gambar 4.3 Grafik hubungan antara tegangan keluaran fasa T terhadap arus beban. 34
Gambar 4.4 Grafik hubungan antara tegangan keluaran terhadap arus beban tiga fasa seimbang pada transformator tiga fasa hubungan delta terbuka. 34
Gambar 4.5 Perbedaan tegangan keluaran fasa R, S, T pada rata-rata ketidakseimbangan 42%. 37

repository.ub.ac.id
UNIVERSITAS BRAWIJAYA

Gambar 4.6 Perbedaan tegangan keluaran fasa R, S, T pada rata-rata ketidakseimbangan 28%. 38
Gambar 4.7 Perbedaan tegangan keluaran fasa R, S, T pada rata-rata ketidakseimbangan 24%. 40
Gambar 4.8 Perbedaan tegangan keluaran fasa R, S, T pada rata-rata ketidakseimbangan 30%. 42
Gambar 4.9 Perbedaan tegangan keluaran fasa R, S, T pada rata-rata ketidakseimbangan 22%. 43
Gambar 4.10 Perbedaan tegangan keluaran fasa R, S, T pada rata-rata ketidakseimbangan 40%. 45
Gambar 4.11 Grafik hubungan tegangan keluaran fasa R terhadap rata-rata ketidakseimbangan beban. 46
Gambar 4.12 Grafik hubungan tegangan keluaran fasa S terhadap rata-rata ketidakseimbangan beban. 47
Gambar 4.13 Grafik hubungan tegangan keluaran fasa S terhadap rata-rata ketidakseimbangan beban. 47
Gambar 4.14 Grafik Hubungan Antara Rata-rata Ketidakseimbangan Dengan Tegangan Keluaran.....48

repository.ub.ac.id
UNIVERSITAS BRAWIJAYA

DAFTAR TABEL

Tabel 3.1 Peralatan Yang Digunakan Untuk Pengujian 27
Tabel 4.1 Data Hasil Pengujian Beban Seimbang. 32
Tabel 4.2 Data Hasil Pengujian Dengan 2 Fasa Dibebani Sama Sedangkan 1 Fasa Dibebani Berbeda. 35
Tabel 4.3 Data Hasil Pengujian Dengan Masing-masing Fasa Dibebani Berbeda. 40
Tabel 4.4 Data Rata-rata Ketidakseimbangan Beban. 45
Tabel 4.5 Data Arus Fasa Beban, Rata-rata Ketidakseimbangan Beban dan Tegangan Keluaran. 46

repository.ub.ac.id
UNIVERSITAS BRAWIJAYA

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1 PMAC770 Manual book 53
Lampiran 2 Dokumentasi. 68

repository.ub.ac.id
UNIVERSITAS BRAWIJAYA

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Dewasa ini Indonesia sedang melaksanakan pembangunan di segala bidang. Seiring dengan laju pertumbuhan maka dituntut adanya sarana dan prasarana yang mendukungnya seperti ketersediaan tenaga listrik. Saat ini tenaga listrik merupakan kebutuhan yang utama, baik untuk kehidupan rumah tangga maupun untuk kebutuhan industri. Hal ini disebabkan karena tenaga listrik mudah untuk di konversikan dalam bentuk tenaga yang lain. Ketersediaan tenaga listrik yang stabil dan kontinyu merupakan syarat mutlak yang harus dipenuhi dalam memenuhi kebutuhan akan tenaga listrik.

Dalam memenuhi kebutuhan tenaga listrik tersebut, terjadi pembagian beban yang awalnya merata, tetapi karena ketidakserempakan waktu penyalaan beban-beban tersebut maka menimbulkan ketidakseimbangan beban yang berdampak pada penyediaan tenaga listrik. Ketidakseimbangan beban antar tiap fasa (fasa R, fasa S, fasa T) inilah yang menyebabkan mengalirnya arus pada netral trafo. (Setiadji et al, 2006:68-73)

Transformator adalah suatu alat yang dapat memindahkan dan mengubah besar energi listrik dari satu atau lebih rangkaian listrik ke rangkaian yang lain dengan frekuensi yang sama. Transformator adalah salah satu instrumen yang paling penting dalam sistem daya yang harus beroperasi secara efisien dan andal. Energi yang dipindahkan dan diubah tersebut adalah tegangan dan arus bolak-balik (AC). Sedangkan tegangan dan arus searah (DC) tidak dapat dikonversikan oleh transformator.

Jenis-jenis transformator sangat banyak, tetapi secara umum dapat diklasifikasikan atas tiga jenis, yaitu Transformator Daya Transformator Distribusi dan Transformator Pengukuran. Dalam aplikasinya di lapangan transformator yang paling banyak dipergunakan adalah Transformator Daya dan Transformator Distribusi. Pada umumnya jenis transformator yang dipergunakan sebagai Transformator Daya dan Transformator adalah transformator tiga fasa, karena suplai tegangan dan arus yang masuk dari pembangkit tenaga listrik adalah

repository.ub.ac.id
UNIVERSITAS BRAWIJAYA

tegangan dan arus tiga fasa. Dan juga karena pertimbangan ekonomis dan efisiensinya. Pada transformator tiga fasa terdapat dua hubungan belitan utama yaitu hubungan delta dan bintang. Dan ada empat kemungkinan lain hubungan transformator tiga fasa yaitu Hubungan Bintang-De1ta (Y-Δ), Hubungan Delta-Bintang (Δ-Y), Hubungan Bintang-Bintang (Y-Y), Hubungan Delta-Delta (Δ-Δ). (Chapman, 2005)

Hubungan delta-delta (Δ-Δ) adalah hubungan yang paling ekonomis digunakan untuk tegangan rendah dengan arus atau beban yang besar dan juga untuk beban yang tidak seimbang. Hubungan belitan ini juga merupakan hubungan belitan yang paling fleksibel jika dibandingkan dengan berbagai macam hubungan belitan lainnya. Salah satu keuntungan dari hubungan belitan ini adalah jika salah satu belitannya mengalami kerusakan atau tidak dapat melayani beban, sisa dua belitan lainnya dapat dioperasikan untuk menyalurkan daya dengan menggunakan hubungan belitan delta terbuka (V-V) dimana belitan yang rusak dibuka atau dilepas. Pembukaan salah satu belitan juga dilakukan jika beban yang dilayani terlalu kecil untuk masa sekarang tetapi perlu diantisipasi pertumbuhan beban dimasa yang akan datang yaitu dengan penutupan atau pemasangan kembali belitan yang dibuka. (Chen, 1992:227)

Pada umumnya beban yang dilayani suatu transformator diusahakan seimbang, tetapi dalam kenyataanya sering sekali beban yang dilayani oleh suatu transformator tidak seimbang. Beban yang tidak seimbang menyebabkan arus beban berubah-ubah, karena arus beban yang berubah-ubah maka rugi-rugi tembaga juga berubah bergantung pada beban. Sehingga beban yang tidak seimbang akan mempengaruhi tegangan keluaran dari transformator. Sebelum dioperasikan maka perlu dilakukan pengujian terlebih dahulu pada transformator. Salah satu pengujian yang dimaksud adalah pengujian untuk mengetahui pengaruh pembebanan tiga fasa seimbang dan tidak seimbang terhadap tegangan keluaran pada transformator hubungan delta terbuka.

1.2 Rumusan Masalah

Masalah yang akan dikaji dalam penelitian ini disusun dalam rumusan masalah sebagai berikut:

1. Berapa besar tegangan keluaran pada transformator hubungan delta terbuka.
2. Bagaimana pengaruh beban tiga fasa seimbang terhadap tegangan keluaran transformator hubungan delta terbuka.

repository.ub.ac.id
UNIVERSITAS BRAWIJAYA

3. Bagaimana pengaruh beban tiga fasa tidak seimbang terhadap tegangan keluaran transformator hubungan delta terbuka.

1.3 Batasan Masalah

1. Beban yang digunakan adalah beban resistif tiga fasa.
2. Transformator yang digunakan 2 transformator 1 fasa 350 W, 110/220 V, 5/10 A, 50 Hz hubungan delta terbuka di laboratorium Mesin Elektrik Universitas Brawijaya.
3. Tidak membahas kerugian secara ekonomis.

1.4 Tujuan

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengetahui pengaruh beban tiga fasa seimbang dan tidak seimbang terhadap tegangan keluaran transformator hubungan delta terbuka.

1.5 Manfaat

Penelitian ini diharapkan bermanfaat untuk :

1. Mahasiswa jurusan teknik elektro yang ingin memperdalam pengetahuan tentang transformator.
2. Penulis sendiri untuk memberikan pemahaman tentang cara pemakaian transformator tiga fasa dengan dua belitan (hubungan delta terbuka) untuk melayani penyaluran daya.
3. Mengetahui tentang pengaruh beban tiga fasa seimbang dan tidak seimbang terhadap tegangan keluaran transformator hubungan delta terbuka.

1.6 Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan pada penelitian ini terdiri dari lima bab, yaitu:

BAB I : PENDAHULUAN

Berisi latar belakang, rumusan masalah, ruang lingkup, tujuan, dan sistematika pembahasan.

BAB II : TINJAUAN PUSTAKA

Berisi dasar teori yang digunakan untuk dasar penelitian dan untuk mendukung permasalahan yang diungkap

repository.ub.ac.id
UNIVERSITAS BRAWIJAYA

BAB III : METODE PENELITIAN

Berisi tahapan penyelesaian skripsi ini yang meliputi studi literatur, perancangan dan pengujian, pengambilan data, perhitungan dan analisis data.

BAB IV : PEMBAHASAN

Bab ini menjelaskan tentang pengaruh beban tiga fasa seimbang dan tidak seimbang terhadap tegangan keluaran pada transformator hubungan delta terbuka.

BAB V : PENUTUP

Bab ini berisi kesimpulan dan saran yang diperoleh dari hasil percoban.

repository.ub.ac.id
UNIVERSITAS BRAWIJAYA

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Transformator

Transformator adalah suatu alat listrik yang dapat memindahkan dan mengubah energi listrik dari satu atau lebih rangkaian listrik ke rangkaian listrik yang lain, melalui suatu gandengan magnet dan berdasarkan prinsip induksi-elektromagnet. Transformator digunakan secara luas, baik dalam bidang tenaga listrik maupun elektronika. Penggunaan transformator dalam sistem tenaga memungkinkan terpilihnya tegangan yang sesuai, dan ekonomis untuk tiap-tiap keperluan misalnya kebutuhan akan tegangan tinggi dalam pengiriman daya listrik jarak jauh.

Dalam bidang elektronika transformator digunakan antara lain sebagai gandengan impedansi antara sumber dan beban untuk memisahkan satu rangkaian dari rangkaian yang lain dan untuk menghambat arus searah sambil tetap melakukan atau mengalirkan arus bolak-balik antara rangkaian. Berdasarkan frekuensi transformator dapat dikelompokkan sebagai berikut :

1. Frekuensi daya, 50-60 Hz.
2. Frekuensi pendengaran, 50-20 kHz.
3. Frekuensi radio, diatas 30 kHz.

Dalam bidang tenaga listrik pemakaian transformator dikelompokkan menjadi :

1. Transformator Daya
2. Transformator Distribusi
3. Transformator Pengukuran

Kerja transformator yang berdasarkan induksi elektromagnet menghendaki adanya gandengan magnet antara rangkaian primer dan sekunder. Gandengan magnet ini berupa inti besi tempat melakukan fluks bersama. (Zuhal, 2000:43)

repository.ub.ac.id
UNIVERSITAS BRAWIJAYA

2.1.1 Prinsip Kerja Transformator

Transformator terdiri atas kumparan primer dan sekunder yang bersifat induktif. Kedua kumparan ini terpisah secara elektris namun berhubungan secara magnetis melalui jalur yang memiliki reluktansi rendah. Apabila kumparan primer dihubungkan dengan tegangan bolak-balik maka akan muncul fluks bolak-balik di dalam inti laminasi, karena kumparan tersebut membentuk rangkaian tertutup maka mengalirlah arus primer. Akibat adanya fluks di kumparan primer maka di kumparan primer terjadi induksi (*self induction*) dan terjadi pula induksi di kumparan sekunder karena pengaruh induksi dari kumparan primer atau disebut juga induksi bersama (*mutual induction*) yang menyebabkan timbulnya fluks magnet di kumparan sekunder, maka mengalirlah arus sekunder jika rangkaian sekunder di bebani, sehingga energi listrik dapat disalurkan keseluruhan (secara magnetisasi). (Wijaya, 2001:60-65)

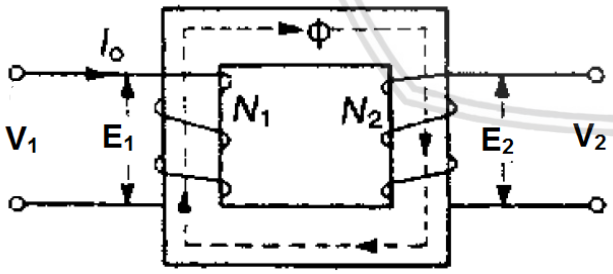
$$e = -N\frac{d\emptyset}{dt}\ Volt \qquad (2\text{-}1)$$

Dimana :

e = gaya gerak listrik (ggl)

N = jumlah lilitan

$\frac{d\emptyset}{dt}$ = perubahan fluks magnet



Gambar 2.1 Transformator tanpa beban.

Sumber : Zuhal (2000:44)

Dan pada transformator ideal yang di eksitasi dengan sumber sinusoidal berlaku persamaan :

$$E = 4{,}44\ \Phi_{max} N f \qquad (2\text{-}2)$$

Dimana :

E = tegangan (rms)

N = jumlah lilitan

f = frekuensi

Φ_{max} = fluks puncak

Atau :

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2} \tag{2-3}$$

Dengan mengabaikan rugi tahanan dan adanya fluks bocor didapatkan persamaan :

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{V_1}{V_2} = \frac{N_1}{N_2} = a \tag{2-4}$$

Dimana :

E_1 = GGL induksi di sisi primer (V)

E_2 = GGL induksi di sisi sekunder (V)

V_1 = Tegangan terminal sis primer (V)

V_2 = Tegangan terminal sis sekunder (V)

N_1 = Jumlah belitan sisi primer

N_2 = Jumlah belitan sisi sekunder

a = perbandingan transformasi

Apabila : a <1, maka transformator berfungsi untuk menaikkan tegangan (*step up transformer*).

a >1, maka transformator berfungsi sebagai untuk menurunkan tegangan (*step down transformer*).

2.2 Transformator Tiga Fasa

Pada prinsipnya transformator tiga fasa sama dengan transformator satu fasa, perbedaannya adalah seperti perbedaan sistem listrik satu fasa dengan listrik tiga fasa, yaitu mengenal sistem bintang (Y) dan segitiga (Δ), serta sistem *zig-zag* (Z), dan juga sistem angka jam yang sangat menentukan untuk kerja paralel transformator tiga fasa. Untuk menganalisa transformator daya tiga fasa dilakukan dengan memandang atau menganggap transformator tiga fasa sebagai transformator satu fasa, teknik perhitungannya pun sama, hanya untuk nilai akhir biasanya parameter tertentu (arus, tegangan dan daya) transformator tiga fasa dikaitkan dengan nilai $\sqrt{3}$. Transformator tiga fasa ini dikembangkan dengan alasan ekonomis, biaya lebih murah karena bahan yang digunakan lebih sedikit dibandingkan tiga buah transformator satu fasa

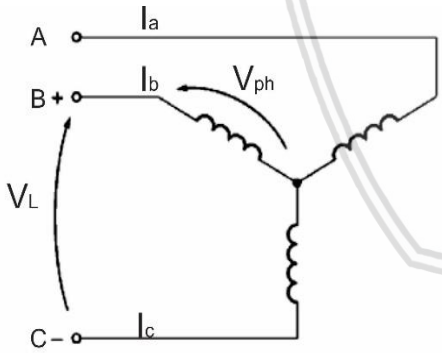
dengan jumlah daya yang sama dengan satu buah transformator daya tiga fasa, lebih ringan dan lebih kecil sehingga mempermudah pengangkutan (menekan biaya pengiriman), pengerjaannya lebih cepat, serta untuk menangani operasinya hanya satu buah transformator yang perlu mendapatkan perhatian (meringankan pekerjaan perawatan). Selain itu transformator tiga fasa juga lebih banyak digunakan di sistem tenaga listrik di dunia sehingga untuk pemesanannya lebih mudah, sedangkan transformator satu fasa lebih jarang digunakan. (Wijaya, 2001:105)

2.3 Hubungan Tiga Fasa dalam Transformator

Secara umum hubungan belitan tiga fasa terbagi atas dua jenis, yaitu hubungan bintang (Y) dan hubungan delta (Δ). Masing-masing hubungan ini memiliki karakteristik arus tegangan yang berbeda-beda. Baik sisi primer maupun sekunder masing-masing dapat dihubungkan bintang, delta maupun zig-zag. (Sumanto, 1991:41)

2.3.1 Hubungan Bintang (Y)

Hubungan bintang adalah hubungan transformator tiga fasa dimana ujung-ujung awal atau akhir lilitan disatukan. Titik dimana tempat penyatuan dari ujung-ujung lilitan merupakan titik netral. (Sumanto, 1991:41)



Gambar 2.2 Hubungan bintang.

Sumber : Lumbanraja (2008:31)

Dari gambar 2.2 dapat diketahui sebagai berikut,

$$I_a = I_b = I_c = I_L \text{ (A)}$$

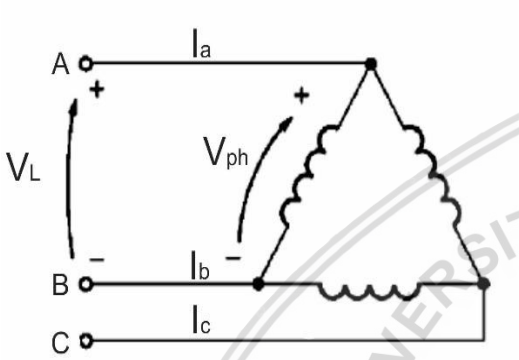
$$I_L = I_{Ph} \text{ (A)} \qquad (2\text{-}5)$$

$$V_{AB} = V_{BC} = V_{CA} = V_{L-L} \text{ (V)}$$

$$V_{L-L} = \sqrt{3}V_{Ph} \text{ (V)} \qquad (2\text{-}6)$$

2.3.2 Hubungan Delta (Δ)

Hubungan delta adalah suatu hubungan transformator tiga fasa dimana cara penyambungannya ialah ujung akhir lilitan fasa pertama disambung dengan ujung mula lilitan kedua, akhir fasa kedua dengan ujung mula fasa ketiga dan akhir fasa ketiga dengan ujung mula fasa pertama. (Sumanto, 1991:42)



Gambar 2.3 Hubungan delta.

Sumber : Lumbanraja (2008:31)

Dari gambar 2.3 dapat diketahui sebagai berikut,

$$I_a = I_b = I_c = I_L \text{ (A)}$$

$$I_L = \sqrt{3} I_{Ph} \text{ (A)} \quad (2\text{-}7)$$

$$V_{AB} = V_{BC} = V_{CA} = V_{L-L} \text{ (V)}$$

$$V_{L-L} = V_{Ph} \text{ (V)} \quad (2\text{-}8)$$

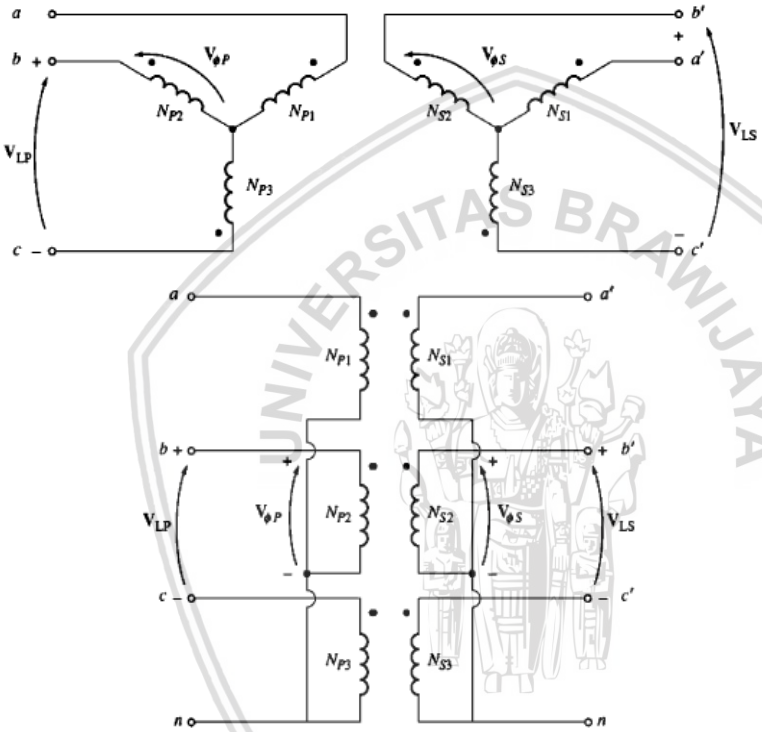
2.4 Jenis-jenis Hubungan Belitan Transformator Tiga Fasa

Pada transformator tiga fasa terdapat dua hubungan belitan utama yaitu hubungan delta dan hubungan bintang dengan konfigurasi Y – Y, Y - Δ, Δ - Y, Δ - Δ, bahkan untuk kasus tertentu belitan sekunder dapat dihubungkan secara berliku-liku (*zig-zag*), sehingga diperoleh kombinasi Δ - Z dan Y – Z. Hubungan *zig-zag* (Z) merupakan sambungan bintang "istimewa", hubungan ini dibuat dengan menambahkan kumparan yang dihubungkan secara segitiga pada kumparan sekunder yang dihubungkan secara bintang. Selain itu pada kondisi tertentu hubungan transformator tiga fasa dapat juga hanya dengan menggunakan dua buah transformator.

Beberapa hubungan tansformator tiga fasa yang menggunakan dua transformator yaitu, hubungan delta terbuka (V-V), open-Y-open-Δ, hubungan Scott-T. (Wijaya, 2001:106)

2.4.1 Hubungan Bintang-Bintang (Y-Y)

Hubungan ini ekonomis digunakan untuk melayani beban yang kecil dengan tegangan transformasi yang tinggi. Hubungan Y-Y pada transformator tiga fasa dapat dilihat pada Gambar 2.4.



Gambar 2.4 Hubungan bintang-bintang (Y-Y).

Sumber : Chapman (2005:119)

Pada hubungan Y-Y tegangan primer pada masing-masing fasa adalah :

$$V_{\emptyset P} = V_{LP}/\sqrt{3} \qquad (2\text{-}9)$$

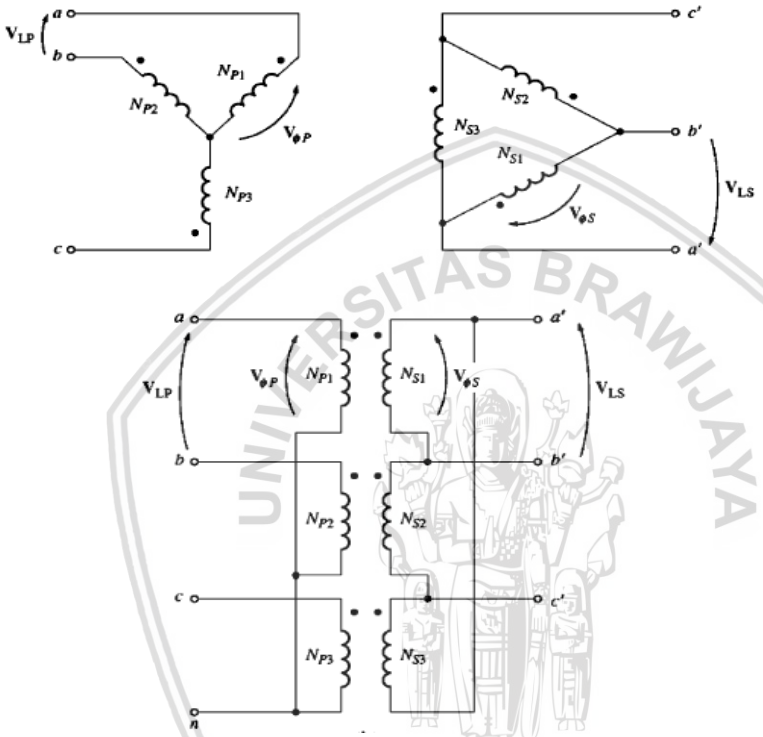
Tegangan fasa primer sebanding dengan tegangan fasa sekunder dan perbandingan belitan transformator. Maka diperoleh perbandingan tegangan pada transformator adalah :

$$\frac{V_{LP}}{V_{LS}} = \frac{\sqrt{3}V_{\emptyset P}}{\sqrt{3}V_{\emptyset S}} = a \qquad (2\text{-}10)$$

Pada hubungan Y-Y ini jika beban transformator tidak seimbang maka tegangan pada fasa transformator tidak seimbang.

2.4.2 Hubungan Bintang-Delta (Y-Δ)

Digunakan sebagai penurun tegangan untuk sistem tegangan tinggi. Hubungan Y-Δ pada transformator tiga fasa dapat dilihat pada Gambar 2.5.



Gambar 2.5 Hubungan bintang-delta (Y-Δ).

Sumber : Chapman (2005:121)

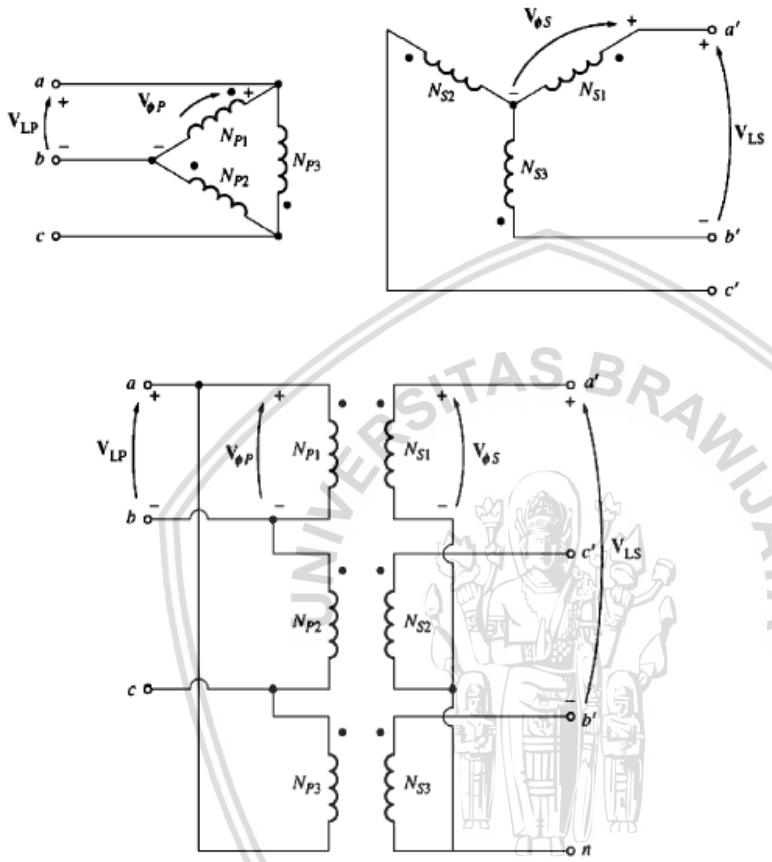
Pada hubungan ini, hubungan tegangan *line* primer dengan tegangan fasa primer $V_{LP} = \sqrt{3}V_{\emptyset P}$ dan hubungan tegangan *line* sekunder dan tegangan fasa sekunder $V_{LS} = V_{\emptyset S}$. Sehingga diperoleh perbandingan tegangan pada hubungan ini adalah :

$$\frac{V_{LP}}{V_{LS}} = \frac{\sqrt{3}V_{\emptyset P}}{V_{\emptyset S}} = \sqrt{3}a \qquad (2\text{-}11)$$

Hubungan ini lebih stabil dan tidak ada masalah dengan beban tidak seimbang dan harmonisa.

2.4.3 Hubungan Delta-Bintang (Δ-Y)

Umumnya hubungan ini digunakan untuk menaikkan tegangan dari tegangan pembangkitan ke tegangan transmisi. Hubungan Δ-Y pada transformator tiga fasa ditunjukkan pada Gambar 2.6.



Gambar 2.6 Hubungan delta-bintang (Δ-Y).

Sumber : Chapman (2005:122)

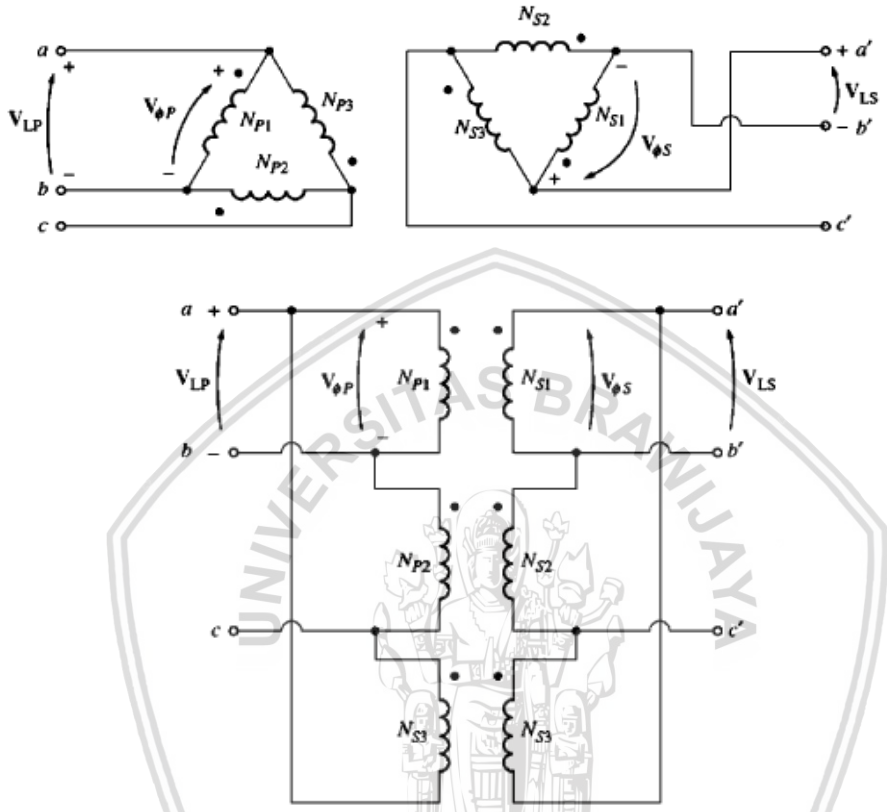
Pada hubungan ini, hubungan tegangan pada sisi primer $V_{LP} = V_{\emptyset S}$ dan hubungan tegangan pada sisi sekunder $V_{LS} = \sqrt{3}V_{\emptyset S}$. Maka perbandingan tegangan pada hubungan ini adalah:

$$\frac{V_{LP}}{V_{LS}} = \frac{V_{\emptyset P}}{\sqrt{3}V_{\emptyset S}} = \frac{\sqrt{3}}{a} \qquad (2\text{-}12)$$

Hubungan ini memberikan keuntungan yang sama dan beda fasa yang sama seperti pada hubungan Y-Δ.

2.4.4 Hubungan Delta-Delta (Δ-Δ)

Hubungan ini ekonomis digunakan untuk melayani beban yang besar dengan tegangan pelayanan yang rendah. Hubungan Δ-Δ pada transformator tiga fasa ditunjukkan pada Gambar 2.7.



Gambar 2.7 Hubungan delta-delta (Δ-Δ).

Sumber : Chapman (2005:123)

Pada hubungan ini tegangan *line* dan tegangan fasa sama untuk sisi primer dan sekunder

$$\frac{V_{LP}}{V_{LS}} = \frac{V_{\emptyset P}}{V_{\emptyset S}} = a \qquad (2\text{-}13)$$

Salah satu keuntungan pemakaian transformator tiga fasa hubungan Δ-Δ adalah perbedaan fasa pada hubungan ini tidak ada dan stabil terhadap beban tidak seimbang dan harmonisa. Selain itu keuntungan lain yang dapat diambil adalah apabila transformator ini mengalami gangguan pada salah satu belitannya maka transformator ini dapat terus bekerja

melayani beban walaupun hanya menggunakan dua buah belitan saja. Hubungan belitan yang dimaksud adalah hubungan Delta Terbuka. (Chapman, 2005:123)

2.5 Hubungan Transformator Tiga Fasa Menggunakan Dua Transformator

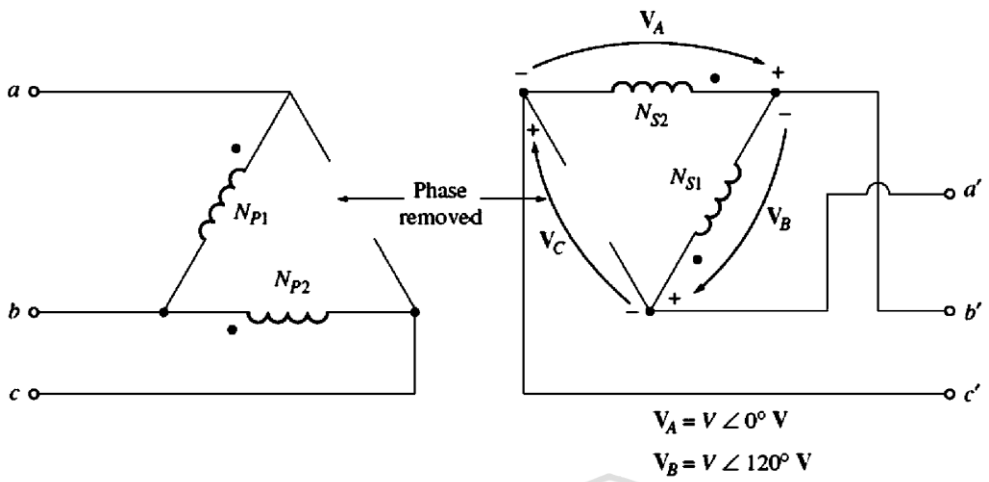
Pada transformator tiga fasa terdapat juga hubungan khusus untuk pengoperasian transformator tiga fasa hanya menggunakan dua buah transformator. Kemampuan hubungan transformator yang menggunakan dua buah belitan ini memang berkurang dan hanya digunakan pada saat kondisi tertentu saja. Berikut ini adalah hubungn transformator tiga fasa yang menggunakan dua buah belitan saja : (Chapman, 2005:126)

1. Hubungan Delta Terbuka (V-V)
2. Hubungan *Open*-Y-*Open*-Delta
3. Hubungan Scott-T
4. Hubungan T-Tiga Fasa

2.5.1 Transformator Tiga Fasa Hubungan Delta Terbuka

Trasformator tiga fasa hubungan delta terbuka adalah transformator tiga fasa dengan transformator yang terdiri dari dua buah transformator satu fasa. Hubungan belitan delta terbuka erat kaitannya dengan hubungan belitan delta karena hubungan belitan delta terbuka merupakan modifikasi dari hubungan delta yang dilakukan jika salah satu tansformator mengalami kerusakan atau tidak dapat melayani beban, maka sisa dua transformator lainnya dapat dioperasikan untuk menyalurkan daya, yang dikenal dengan nama Transformator delta terbuka. Beban tiga fasa masih dapat dilayani dengan menggunakan transformator terhubung delta terbuka pada sisi sekundernya dan untuk sisi primer bisa dengan hubungan *open*-Y maupun delta terbuka. (Neupauer, 1956:570)

repository.ub.ac.id
UNIVERSITAS BRAWIJAYA



Gambar 2.8 Transformator hubungan delta terbuka.

Sumber : Chapman (2005:127)

Sekalipun besar daya yang dapat dilayani harus dikurangi beberapa persen dari rating kVA transformator tiga fasa hubungan delta-nya, hubungan belitan ini mempunyai peranan yang sangat penting dalam pengiriman daya ke beban agar kontinuitas beban diperoleh dengan baik untuk sementara sehingga sistem bekerja terus menerus sampai ada perbaikan atau pergantian yang baru. (Chapman, 2005:126)

Pada gambar 2.8 terlihat bahwa jika tegangan $V_A = V\angle 0^o V$ dan $V_B = V\angle 120^o V$ maka tegangan V_C adalah :

$$V_C = -V_A - V_B$$

$$V_C = -V\angle 0^o - V\angle 120^o$$

$$V_C = -V - (-0.5V - j0.8666V)$$

$$V_C = -0.5V + j0.8666V)$$

$$V_C = V\angle 120^o V \qquad (2\text{-}14)$$

Hasilnya akan sama dengan jika masih ada transformator ke-3. Fasa C biasa disebut *ghost phase*. Maka dari itu transformator hubungan delta terbuka bisa dioperasikan dengan dua transformator saja, dan masih bisa mengirimkan daya meskipun salah satu fasa yang rusak dilepas.

2.5.2 Pemakaian Transformator tiga Fasa Hubungan Delta Terbuka

Pemakaian transformator tiga fasa hubungan delta terbuka umumnya hanya dipergunakan untuk sementara. Yaitu apabila transformator yang mengalami kerusakan tersebut akan diperbaiki atau diganti dengan transformator yang baru. Disamping bersifat sementara (temporer) transformator ini dapat juga bekerja secara permanen. (Lumbanraja, 2008:39)

- **Temporer**

Telah kita ketahui bahwa pada beberapa industri sangat diperlukan kontinuitas daya yang baik. Tetapi apabila salah satu belitan dari transformator tiga fasa ini mengalami gangguan dan menyebabkan kedua belitan yang lainnya bekerja tidak seimbang sehingga fasa-fasa yang tadinya stabil menjadi tidak stabil. Hal ini menyebabkan pengiriman daya terganggu dan kerugian yang sangat besar akan dialami oleh konsumen. Dengan demikian hubungan belitan delta terbuka memegang peranan penting dalam kejadian ini. Pada kejadian ini perubahan belitan pada inti tidak perlu dilakukan untuk mengurangi *leakage impedance* untuk memperoleh sistem lebih seimbang. Hubungan ini dapat dipakai sementara sebelum adanya pergantian transformator baru atau perbaikan belitan yang rusak apabila memungkinkan.

- **Permanen**

Pada suatu industri yang besar biasanya ada menggunakan penerangan- penerangan dan motor-motor kecil untuk dapat menggerakkan peralatan-peralatan industri yang tersendiri, misalnya pemompaan minyak. Transformator hubungan delta terbuka ini cukup mampu untuk pengiriman daya yang dibuat khusus, karena industri itu cukup mempunyai tenaga teknis untuk itu dan dipandang lebih ekonomis jika dibandingkan dengan pemakaian transformator tiga fasa. Keuntungan yang paling besar adalah sistem dapat lebih seimbang kalau dibandingkan dengan tidak dibuat satu transformator khusus untuk melayani beban ini, sebab belitan konduktor pada inti dapat dibuat sehingga leakage impedance menjadi lebih kecil dan akhirnya dapat mendekati keseimbangan seperti transformator tiga fasa. Disamping hal-hal diatas hubungan delta terbuka juga dilakukan jika beban yang dilayani sekarang terlalu kecil dibandingkan dengan kapasitas transformatomya, tetapi perlu diantisipasi pertumbuhan beban dimasa yang akan datang. (Chen, 1992:227)

2.5.3 Daya Pada Transformator Tiga Fasa Hubungan Delta Terbuka

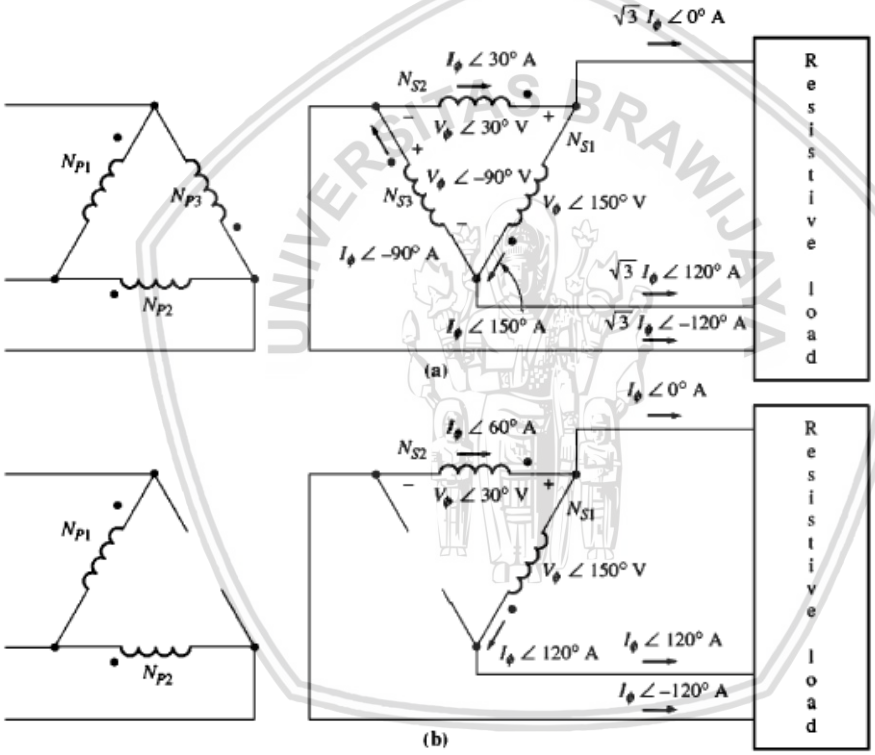
Gambar 2.9 menunjukkan transformator pada saat beroperasi dalam keadaan normal yang terhubung dengan beban resistif. Jika tegangan dari transformator $V_\emptyset$ dan arusnya $I_\emptyset$ maka daya maksimum yang dihasilkan untuk menyuplai beban adalah : (Chapman, 2005:127)

$$P = 3V_\emptyset I_\emptyset \cos\theta \qquad (2\text{-}15)$$

Sudut fasa antara tegangan $V_\emptyset$ dan arus $I_\emptyset$ pada setiap fasa adalah 0° maka daya yang dihasilkan oleh trafo adalah

$$P = 3V_\emptyset I_\emptyset \cos\theta$$

$$P = 3V_\emptyset I_\emptyset \qquad (2\text{-}16)$$



Gambar 2.9 (a) Tegangan dan arus pada transformator hubungan delta-delta (Δ-Δ). (b) tegangan dan arus pada transformator hubungan delta terbuka (V-V).

Sumber : Chapman (2005:128)

Pada transformator hubungan delta terbuka perlu diperhatikan sudut fasa pada tegangan dan arus. Karena salah satu fasa pada transformator dilepas maka arus *line* dan arus fasa besarnya akan sama, dan sudut fasa antara arus dan tegangan akan berbeda 30°. Dikarenakan sudut fasa antara arus dan tegangan berbeda pada setiap transformator maka perlu untuk menentukan daya

maksimum yang dapat dihasilkan oleh setiap transformator. Untuk transformator 1, sudut fasa tegangan 150° dan sudut fasa arus 120°. jadi daya maksimum pada transformator 1 adalah. (Chapman, 2005:127-129)

$$P_1 = 3V_\emptyset I_\emptyset \cos(150^0 - 120^0)$$

$$P_1 = 3V_\emptyset I_\emptyset \cos 30^0$$

$$P_1 = \frac{\sqrt{3}}{2} V_\emptyset I_\emptyset \qquad (2\text{-}17)$$

Pada transformator 2 sudut fasa tegangan 30° dan sudut fasa arus 60°, jadi daya maksimumnya adalah :

$$P_2 = 3V_\emptyset I_\emptyset \cos(30^0 - 60^0)$$

$$P_2 = 3V_\emptyset I_\emptyset \cos(-30^0)$$

$$P_2 = \frac{\sqrt{3}}{2} V_\emptyset I_\emptyset \qquad (2\text{-}18)$$

Jadi total daya maksimum yang dihasilkan oleh transformator hubungan delta terbuka adalah

$$P = \sqrt{3} V_\emptyset I_\emptyset \qquad (2\text{-}19)$$

Daya reaktifnya adalah :

$$Q_1 = 3V_\emptyset I_\emptyset \sin(150^0 - 120^0)$$

$$Q_1 = 3V_\emptyset I_\emptyset \sin 30^0$$

$$Q_1 = \frac{1}{2} V_\emptyset I_\emptyset \qquad (2\text{-}20)$$

$$Q_2 = 3V_\emptyset I_\emptyset \sin(30^0 - 60^0)$$

$$Q_2 = 3V_\emptyset I_\emptyset \sin(-30^0)$$

$$Q_2 = -\frac{1}{2} V_\emptyset I_\emptyset \qquad (2\text{-}21)$$

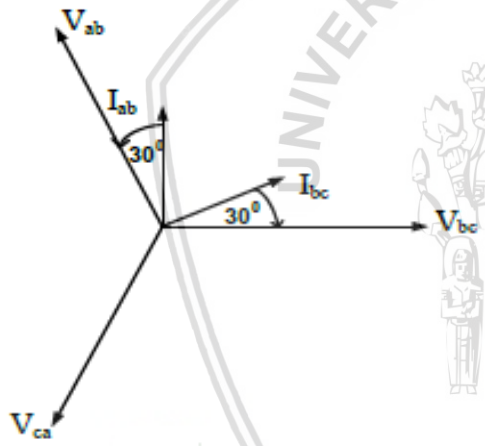
Perbandingan daya keluaran antara transformator hubungan delta terbuka dan transformator tiga fasa dalam kondisi normal adalah. (Chapman, 2005:129)

$$\frac{P_{open\Delta}}{P_{3fasa}} = \frac{\sqrt{3} V_\emptyset I_\emptyset}{3 V_\emptyset I_\emptyset} = \frac{1}{\sqrt{3}} = 0.577 \qquad (2\text{-}22)$$

Dari persamaan diatas terlihat bahwa pada transformator hubungan delta terbuka kapasitasnya jika dibandingkan dengan transformator hubungan delta-delta akan berkurang menjadi 57,7% nya. Besar kapasitasnya tidak sama dengan penjumlahan kapasitas kedua transformator satu fasa tetapi hanya 86,6% nya. Dua buah belitan dari transformator hubungan delta terbuka seharusnya dapat menyuplai 66,6% dari kapasitas total transformator hubungan

delta, tetepi kedua belitan tersebut hanya dapat menyuplai 57,7% dari kapasitas total transformator. Jadi prbandingan rasio transformator 57,7/66.6 = 0,866 disebut juga dengan faktor utilitas dari kedua belitan transformator ketika dalam keadaan berbeban. Dengan dioperasikan seperti ini, transformator masih dapat mengirim daya tiga fasa dengan urutan belitan yang sama, tetapi kapasitas dari transformator berkurang hingga 57,7% dari kapasitas total transformator ketika terhubung delta. Misalkan transformator delta-delta bekerja pada beban nominalnya, jika transformator tersebut dirubah menjadi delta terbuka dengan beban yang sama seperti sebelumnya, maka sisa kedua transformator akan mengalami *overload*/beban lebih. Sehingga untuk mencegah terjadinya kerusakan pada transformator maka bebanya harus dikurangi. (Chapman, 2005:129)

Jika transfomator tersebut melayani beban tiga fasa resistif yang seimbang maka vektor arus dan tegangannya digambarkan sebagai berikut: (Lumbanraja, 2008:53)

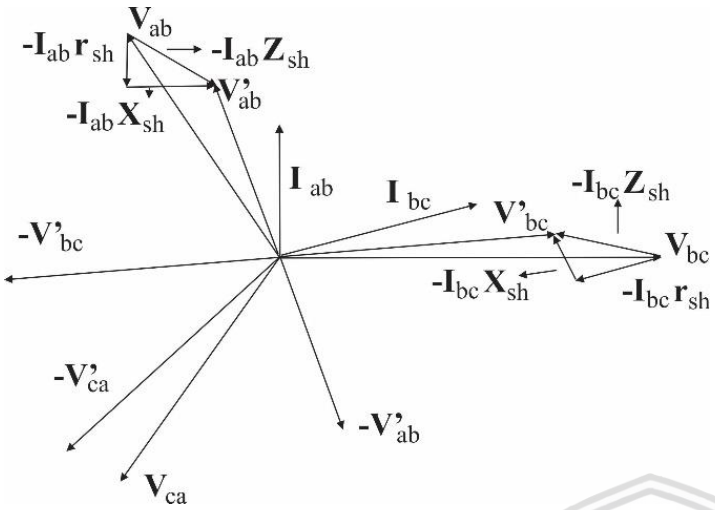


Gambar 2.10 Diagram fasor tegangan dan arus pada transformator delta terbuka.

Sumber : Lumbanraja (2008:53)

Dari gambar 2.10 terlihat bahwa arus fasa I_{ab} tertinggal dari tegangan V_{ab} sebesar 30^0 sedangkan arus fasa I_{bc} mendahului V_{bc} sebesar 30^0.

Jika transformator delta terbuka dibebani tidak seimbang yang mengakibatkan tegangan sekundernya tidak seimbang, vektor arus dan tegangannya digambarkan sebagai berikut:



Gambar 2.11 Vektor tegangan dan arus transformator delta terbuka pada keadaan tidak seimbang.

Sumber : Lumbanraja (2008:56)

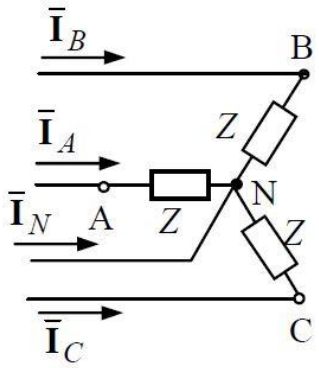
Perubahan besar tegangan V_{ab} dan V_{bc} ini seiring dengan masing-masing vektor emfnya yaitu $I_{ab}\ Z_{sh}$ dan $I_{bc}\ Z_{sh}$ yang menghasilkan V'_{ab} dan V'_{bc}.

2.6 Rangkaian Beban Tiga Fasa Seimbang

Yang dimaksud dengan keadaan seimbang adalah suatu keadaan dimana:

1. Ketiga vektor arus atau tegangan sama besar
2. Ketiga vektor saling membentuk sudut 120° satu sama lain.

Rangkaian beban tiga fasa untuk hubungan bintang (Y) dapat digambarkan seperti gambar dibawah ini :



Gambar 2.12 Sistem beban tiga fasa seimbang hubungan bintang (Y).

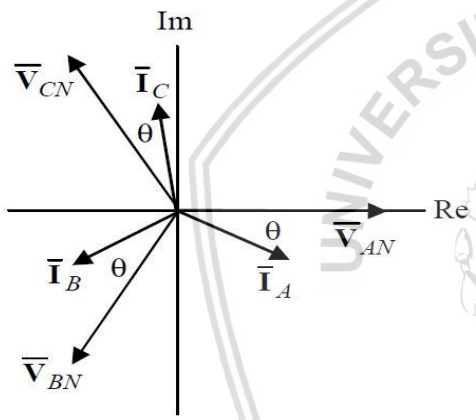
Sumber: Sudirham (2012:311)

Impedansi masing-masing fasa adalah Z. dari gambar 2.12 terlihat bahwa arus yang mengalir di saluran sama dengan arus yang mengalir di masing-masing fasa. (Sudirham, 2012:311-312)

$$I_A = \frac{V_{AN}}{Z}\,;\; I_B = \frac{V_{BN}}{Z}\,;I_C = \frac{V_{CN}}{Z} \qquad (2\text{-}23)$$

Dalam persamaan (2-23) V_{AN}, V_{BN}, dan V_{CN} adalah tegangan fasa yang berbeda fasa 120° satu terhadap lainnya. Karena tegangan ini dibagi oleh Z yang sama untuk mendapatkan arus fasa, jelaslah bahwa masing-masing arus fasa akan tergeser dengan sudut yang sama dari tegangan fasa yang bersangkutan. Jumlah arus-arus fasa ini adalah

$$I_A + I_B + I_C = 0 \qquad (2\text{-}24)$$



Gambar 2.13 Fasor tegangan dan arus beban terhubung bintang (Y).

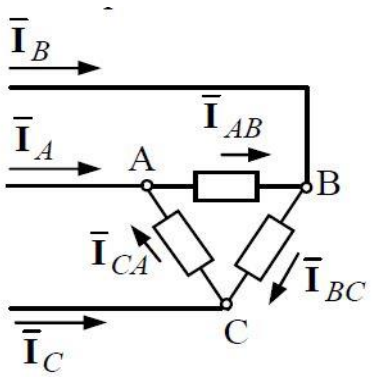
Sumber : Sudirham (2012:312)

Dalam keadaan beban seimbang arus netral sama dengan nol

$I_N + I_A + I_B + I_C = 0$, sehingga

$$I_N = -(I_A + I_B + I_C) = 0 \qquad (2\text{-}25)$$

Untuk rangkaian beban tiga fasa terhubung delta (Δ) arus saluran tidak sama dengan arus fasa, akan tetapi tegangan fasa-fasa terpasang pada impedansi tiap fasa.



Gambar 2.14 Beban tiga fasa seimbang hubungan delta (Δ).

Sumber : Sudirham (2012:314)

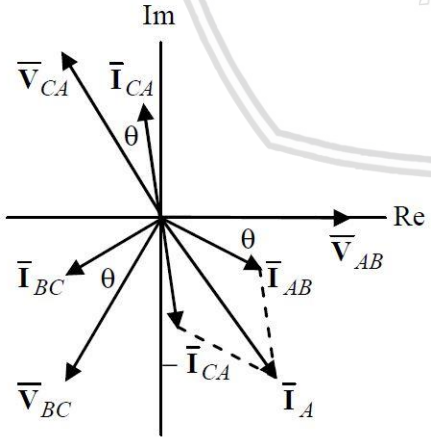
Jika kita perlu menghitung arus maupun daya di tiap fasa dalam keadaan beban tetap terhubung delta kita memerlukan formulasi hubungan antara arus-arus fasa I_{AB} , I_{BC} , I_{CA} dengan tegangan-tegangan fasa V_{AB} , V_{BC} , dan V_{CA} dari gambar 2.14 terlihat bahwa : (Sudirham, 2012:315)

$$I_{AB} = \frac{V_{AB}}{Z}; I_{BC} = \frac{V_{BC}}{Z}; I_{CA} = \frac{V_{CA}}{Z} \qquad (2\text{-}26)$$

Sehingga diperoleh :

$$I_A = I_{AB} - I_{CA} \; ; I_B = I_{BC} - I_{BA} \; ; I_C = I_{CA} - I_A = I_{AB} - I_{CA} \qquad (2\text{-}27)$$

Diagram fasor tegangan dan arus untuk beban yang terhubung delta dengan mengambil V_{AB} sebagai referensi sebagai berikut:



Gambar 2.15 Fasor tegangan dan arus beban terhubung delta.

Sumber : Sudirham (2012:315)

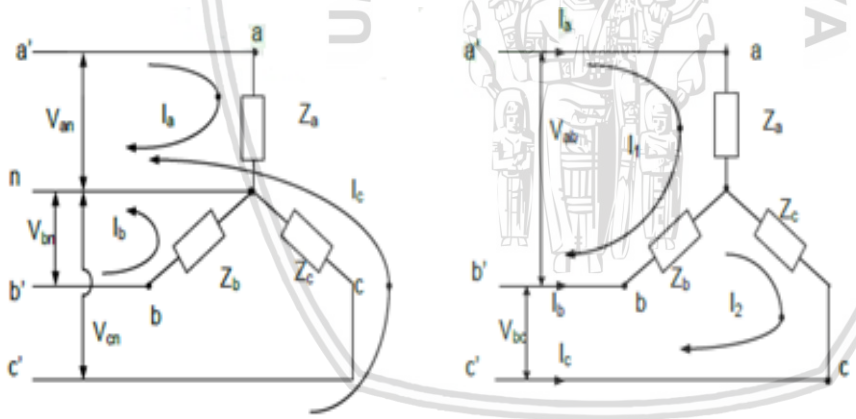
2.7 Rangkaian Beban Tiga Fasa Tidak Seimbang

Yang dimaksud dengan keadaan tidak seimbang adalah keadaan dimana salah satu atau kedua syarat keadaan seimbang 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 membentuk sudut 120° satu sama lain.
3. Ketiga vektor tidak sama besar dan tidak membentuk sudut 120^0 satu sama lain.

Penyelesaian beban tak seimbang untuk hubungan delta dapat disamakan dengan keadaan seimbang. Sedangkan untuk hubungan bintang penyelesaiannya adalah sebagai berikut:

Pada sistem 4 kawat, masing-masing fase akan mengalirkan arus yang tak seimbang menuju netral (pada sistem empat kawat). Sedangkan pada sistem tiga kawat akan mengakibatkan tegangan yang berubah cukup signifikan dan memunculkan suatu netral yang berbeda dari netral yang semestinya. (Lumbanraja, 2008:49)



Gambar 2.16 Beban tidak seimbang terhubung bintang (Y) empat kawat dan tiga kawat.

Sumber: Lumbanraja (2008:49)

Pada sistem dengan empat kawat berlaku

$$I_a = \frac{V_{an}}{Z_a}\,;\, I_b = \frac{V_{bn}}{Z_b}\,;\, I_c = \frac{V_{cn}}{Z_c}$$

$$I_n = -(I_a + I_b + I_c) \qquad (2\text{-}28)$$

Sedangkan pada sistem tiga kawat diselesaikan dengan persamaan loop sebagai berikut : (Lumbanraja, 2008:50)

Loop 1: $(Z_a + Z_b)I_1 - Z_2 I_2 = V_{ab}$ (2-29)

Loop 2: $-Z_2 I_1 + (Z_2 + Z_3)I_2 = V_{bc}$ (2-30)

Dari persamaan diatas dapat dicari harga I_1 dan I_2 kemudian arus-arus line dapat dicari dengan

$$I_a = I_1 \quad (2\text{-}31)$$

$$I_b = I_2 - I_1 \quad (2\text{-}32)$$

$$I_c = I_2 \quad (2\text{-}33)$$

Sedangkan besar tegangan pada setiap impedansi beban adalah :

$$V_{a0} = I_a Z_1 \quad (2\text{-}34)$$

$$V_{b0} = I_b Z_2 \quad (2\text{-}35)$$

$$V_{c0} = I_c Z_3 \quad (2\text{-}36)$$

Perhitungan ketidakseimbangan beban : (Setiadji, 2006:71)

$$I_{rata-rata} = \frac{I_R + I_S + I_T}{3} \quad (2\text{-}37)$$

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

$$a = \frac{I_R}{I_{rata-rata}} \quad (2\text{-}38)$$

$$b = \frac{I_S}{I_{rata-rata}} \quad (2\text{-}39)$$

$$c = \frac{I_T}{I_{rata-rata}} \quad (2\text{-}40)$$

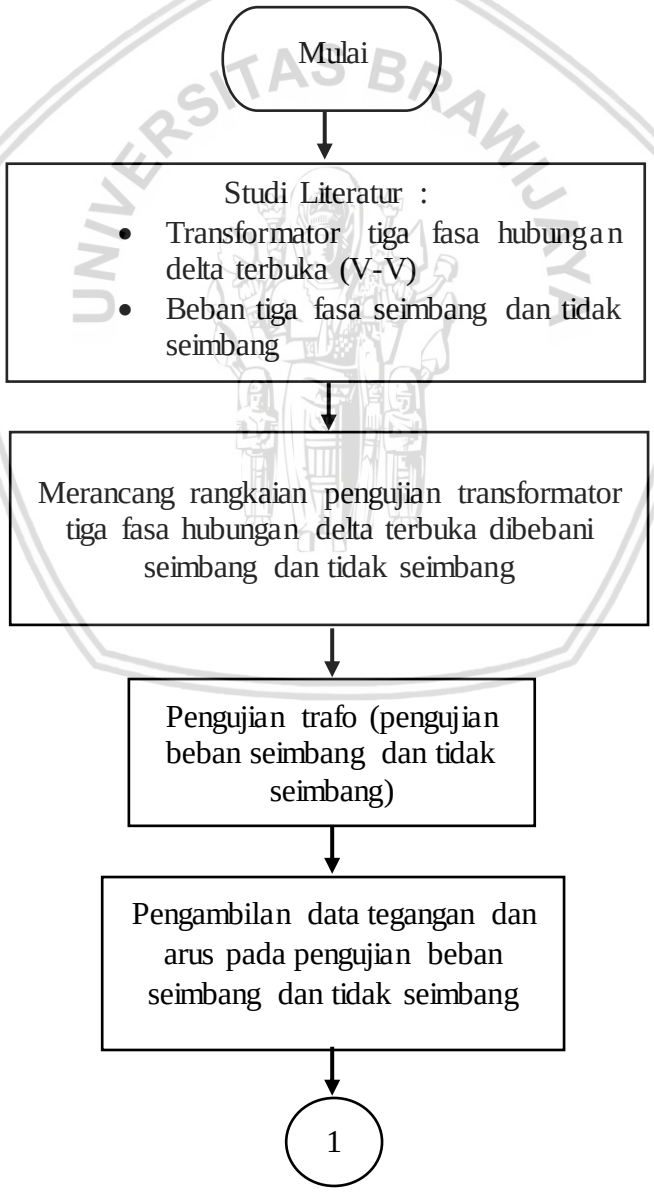
Dimana pada keadaan seimbang nilai a = b = c = 1, dengan demikian rata-rata ketidakseimbangan beban (dalam%) adalah :

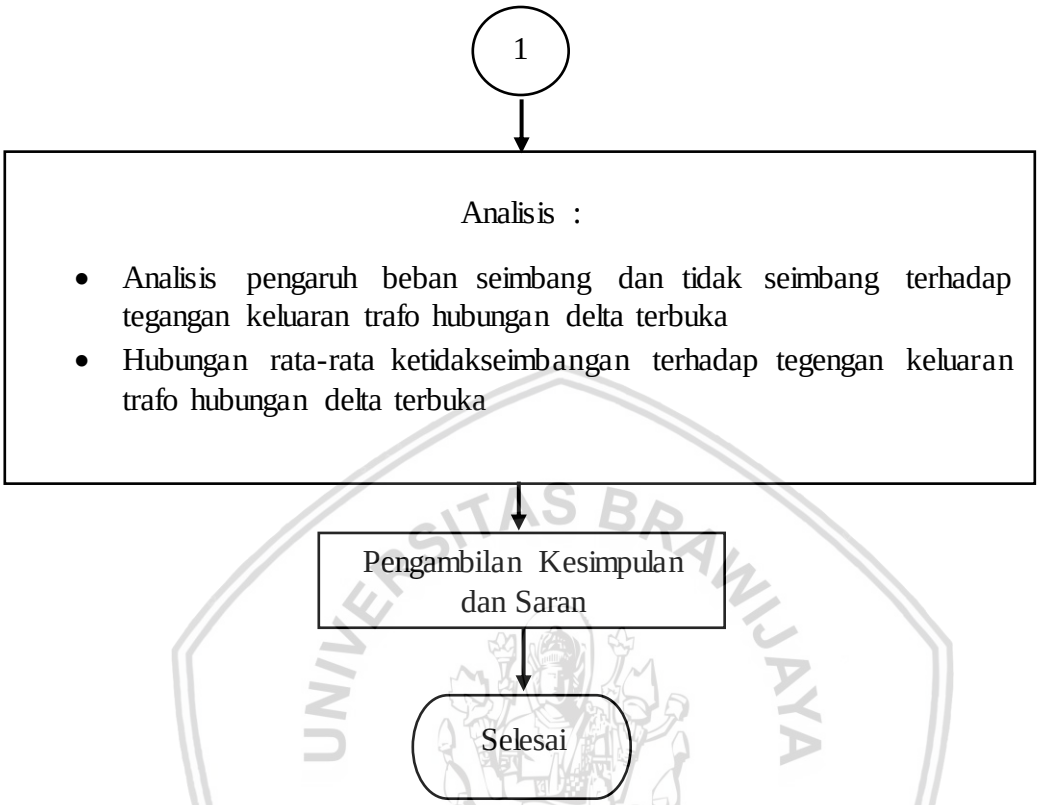
$$= \frac{\{|a-1| + |b-1| + |c-1|\}}{3} x100\% \quad (2\text{-}41)$$

BAB III

METODE PENELITIAN

Untuk mencapai tujuan penelitian dibutuhkan cara atau metode penelitian. Metode penelitian ini adalah untuk mengetahui pengaruh pembebanan tiga fasa seimbang dan tidak seimbang pada tegangan keluaran transformator hubungan delta terbuka. Metodologi yang digunakan untuk pembahasan dalam skripsi ini yaitu sebagai berikut :





Gambar 3.1 Diagram alir penelitian.

3.1 Studi Literatur

Studi literatur yang dilakukan dalam hal ini adalah memahami konsep tentang transformator hubungan delta terbuka, beban seimbang dan tidak seimbang serta pengaruhnya terhadap tegangan keluaran pada transformator hubungan delta terbuka. Untuk memahami hal-hal tersebut digunakan jurnal ilmiah, buku, skripsi, jurnal dan sumber relevan lainnya.

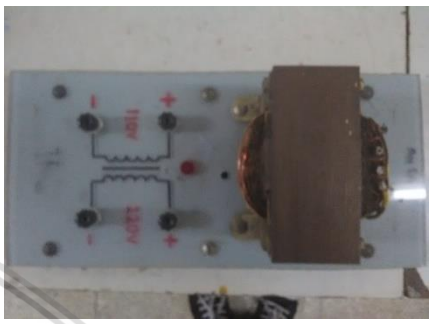
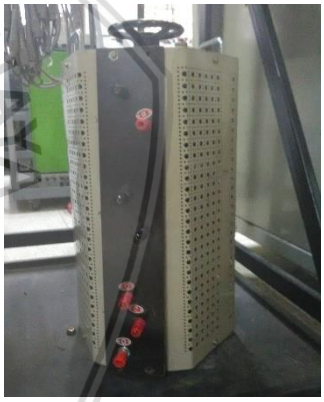
3.2 Pengujian transformator

3.2.1 Pengujian Berbeban

Pengujian ini bertujuan untuk mendapatkan karakteristik tegangan keluaran dari transformator tiga fasa tersebut dengan kondisi beban yang berbeda yaitu seimbang dan tidak seimbang.

3.3 Peralatan Yang Digunakan

Tabel 3.1 Peralatan Yang Digunakan Untuk Pengujian

No.	Nama	Spesifikasi	Jumlah	Gambar
1.	Transformator 1 fasa	Kapasitas : 350 W Tegangan primer/sekunder : 110 V/220 V Arus primer/sekunder : 5 A/10 A	2	
2.	Pengatur tegangan AC 3 fasa		1	
3.	Multimeter	CD 772	1	

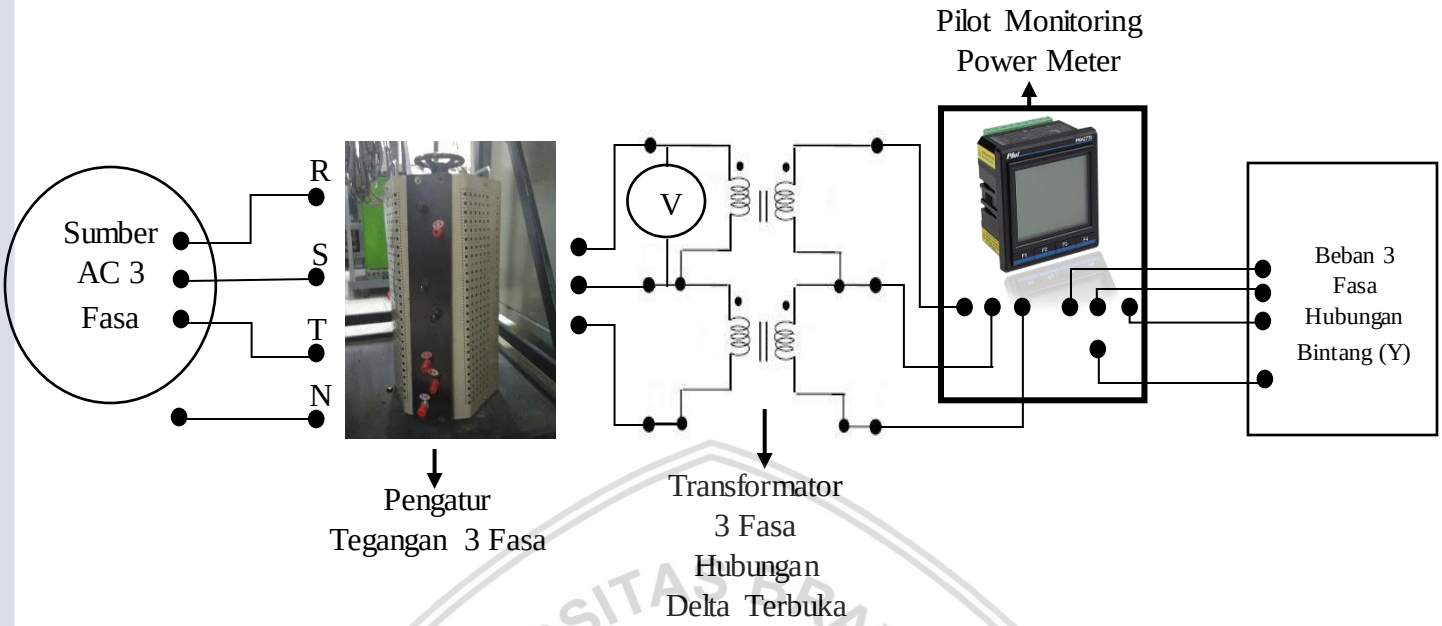
repository.ub.ac.id
UNIVERSITAS BRAWIJAYA

4.	Pilot Monitoring Power Meter	PMAC770 Imax=5A	1	
5.	Lampu Pijar	100 W		
6.	Panel Lampu		1	
7.	Kabel Penghubung		secukupnya	

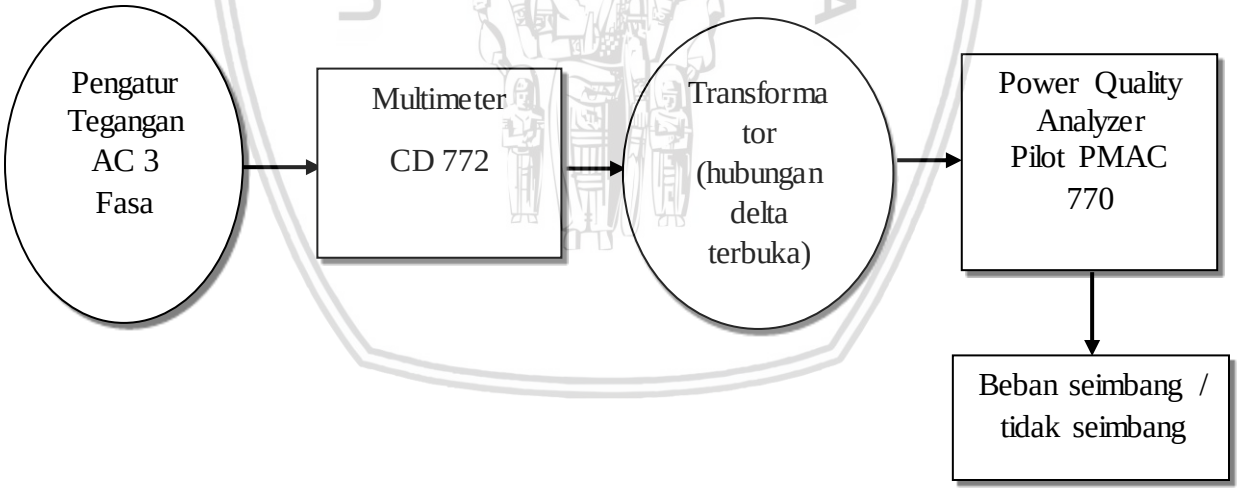
3.4 Rangkaian Pengujian

Pengujian yang akan dilakukan ada dua yaitu pengujian dengan beban seimbang dan pengujian dengan beban tidak seimbang. Pada pengujian dengan beban tidak seimbang dilakukan dengan variasi mengubah arus beban. Rangkaian pengujian ditunjukkan pada Gambar 3.2

repository.ub.ac.id
UNIVERSITAS BRAWIJAYA



Gambar 3.2 Rangkaian pengujian transformator hubungan delta terbuka berbeban.



Gambar 3.3 Diagram pengujian beban seimbang dan tidak seimbang.

3.5 Prosedur Pengujian

Prosedur pengujian ini adalah sebagai berikut :

1. Rangkai peralatan pengujian.
2. Atur pengatur tegangan dalam keadaan minimum.

3. Hidupkan pengatur tegangan serta multimeter.
4. Atur tegangan pada sisi primer (V_1) sebesar 110 V dengan mengatur pengatur tegangan.
5. Atur nilai arus beban (I_2) sesuai data yang diinginkan, pada percobaan ini dengan mengatur jumlah lampu pijar pada setiap fasa.
6. Untuk setiap perubahan arus beban (I_2) catat arus masukan (I_1) dan tegangan keluaran (V_2) pada alat ukur dengan menjaga tegangan sisi primer (V_1) tetap konstan.
7. Turunkan arus beban dan tegangan masukan dengan mengatur pengatur tegangan dan matikan semua peralatan.

3.6 Pengambilan Data dan Analisis

Pengambilan data dilakukan untuk memperoleh data-data yang diperlukan dalam menyelesaikan penelitian. Data-data yang di kumpulkan adalah data dari masing-masing pengujian dengan mencatat hasil tegangan keluaran dan arus dari tansformator yang tertera pada alat ukur. Setelah data-data didapatkan selanjutnya menganalisis data berdasarkan dari teori yang sudah di dapat dari referensi.

3.7 Kesimpulan dan Saran

Kesimpulan diambil berdasarkan teori, hasil perhitungan dan analisis, terutama hasil saat pengujian sistem. Kesimpulan ini ditarik berdasarkan kinerja bagian-bagian dari pengujian. Saran diberikan untuk memberikan masukan kepada pembaca yang akan meneliti lebih lanjut mengenai topik skripsi ini. Saran diberikan berdasarkan kesulitan-kesulitan yang dialami selama penelitian dan hal-hal lain yang perlu dikaji lebih mendalam.

repository.ub.ac.id
UNIVERSITAS BRAWIJAYA

BAB IV

ANALISIS DAN PEMBAHASAN

Pada bab ini menyajikan data-data hasil dari pengujian pada transformator hubungan delta terbuka yang di bebani tiga fasa seimbang dan tidak seimbang. Data yang diambil melalui percobaan adalah berupa data tegangan (V) dan arus (I), serta data yang akan disajikan melalui perhitungan rumus adalah data rata-rata ketidakseimbangan beban.

4.1 Data Transformator

Transformator yang digunakan adalah dua transformator satu fasa yang berada di Laboratorium Mesin Elektrik Teknik Elektro Universitas Brawijaya. Berikut adalah data transformator yang akan digunakan :

Daya	: 350 W
Frekuensi	: 50 Hz
Tegangan Sisi Primer	: 110 V
Arus Sisi Primer	: 5 A
Tegangan Sisi Sekunder	: 220 V
Arus Sisi Sekunder	: 10 A

Transformator akan dirangkai menjadi transformator tiga fasa hubungan delta terbuka dengan *setting step up*.

Kapasitas	: (2x411) x 0,866 = 711,85 VA
Frekuensi	: 50 Hz
Tegangan	: 110/220 V
Arus Sisi Primer	: $I_{fL} = \frac{711,85}{\sqrt{3}x110} = 3,74\ A$
Arus Sisi Sekunder	: $I_{fL} = \frac{711,85}{\sqrt{3}x220} = 1,86\ A$

Pada transformator hubungan delta terbuka jika besar tegangan pada dua transformator yang tersisa adalah $V_A = V\angle 0^o V$ dan $V_B = V\angle 120^o V$ maka tegangan pada sisi transformator yang dilepas V_C adalah :

$$V_C = -V_A - V_B$$
$$V_C = -V\angle 0^o - V\angle 120^o$$
$$V_C = -V - (-0.5V - j0.8666V)$$
$$V_C = -0.5V + j0.8666V)$$
$$V_C = V\angle 120^o V$$

Hasilnya akan sama dengan jika transformator yang ke-3 masih terpasang, maka besar tegangan keluarannya akan sama dengan ketika terhubung delta-delta.

4.2 Pengujian Beban Seimbang

Dari hasil pengujian beban tiga fasa seimbang diperoleh data sebagai berikut :

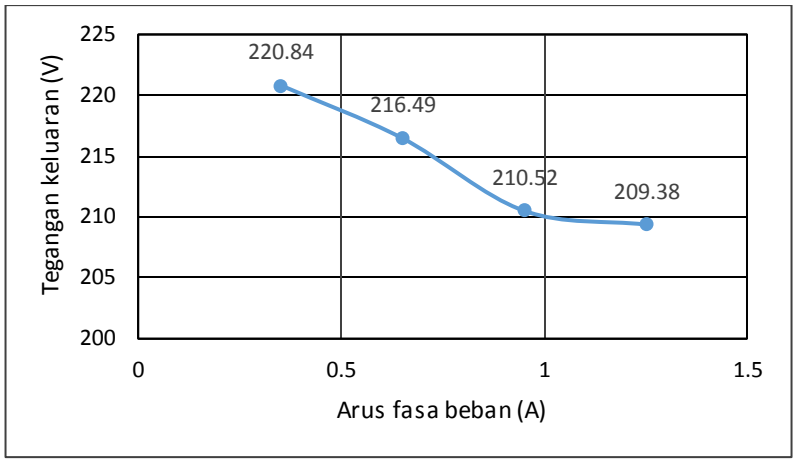
$V_1 = 110\ V$

Tabel 4.1 Data Hasil Pengujian Beban Seimbang.

No	I_{L-L} primer (A)			$Vout_{L-L}$ (V)			I_{ph} Beban (A)		
	I_1	I_2	I_3	V_u	V_v	V_w	I_4	I_5	I_6
1	0,93	0,91	0,95	220,84	215,58	218,77	0,35	0,35	0,35
2	1,54	1,51	1,55	216,49	209,37	211,86	0,65	0,65	0,65
3	2,11	2,23	2,14	210,52	204,21	203,67	0,95	0,95	0,95
4	2,61	2,72	2,69	209,38	204,89	201,54	1,25	1,25	1,25

Dari data hasil pengujian yang tertera pada Tabel 4.1 maka dapat digambarkan grafik hubungan antara tegangan keluaran (V_{out}) transformator terhadap kenaikan arus beban pada tiap-tiap fasa.

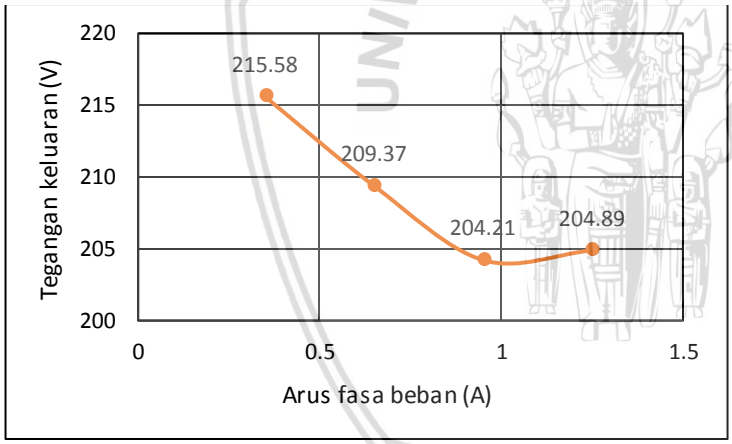
repository.ub.ac.id
UNIVERSITAS BRAWIJAYA



Gambar 4.1 Grafik hubungan antara tegangan keluaran fasa R terhadap arus beban.

Analisa grafik

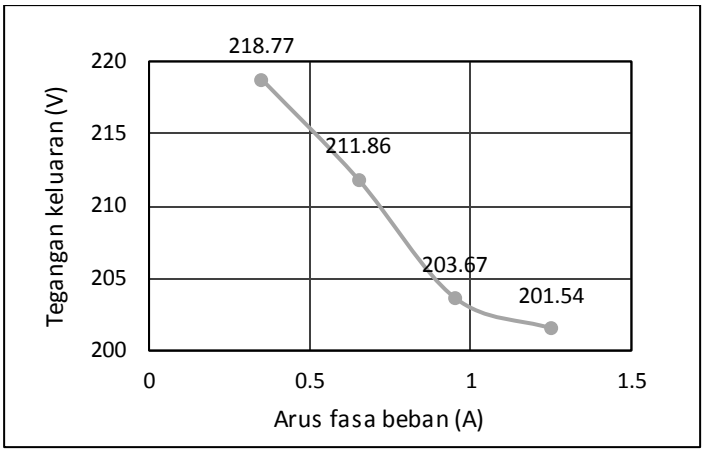
- Dari Gambar 4.1 Terlihat bahwa perubahan tegangan keluaran pada fasa R terhadap arus beban turun secara linier. Semakin besar arus beban maka akan mengakibatkan tegangan keluaran tansformator semakin menurun.



Gambar 4.2 Grafik hubungan antara tegangan keluaran fasa S terhadap arus beban.

Analisa grafik

- Dari Gambar 4.2 Terlihat bahwa perubahan tegangan keluaran pada transformator pada fasa S akan menurun pada saat arus beban dinaikkan. Ketika arus beban semakin besar akan mengakibatkan tegangan keluarannya tidak seimbang terhadap fasa lain.

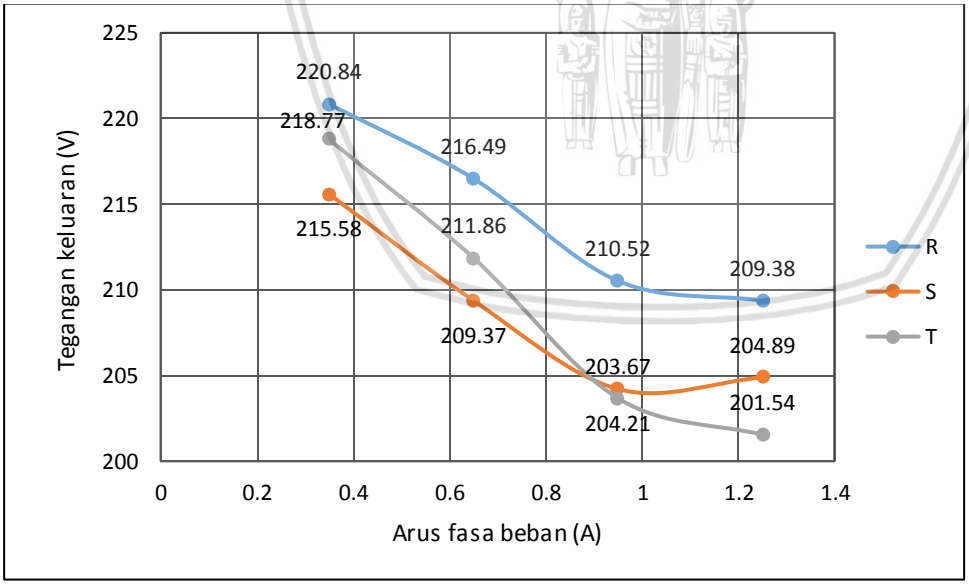


Gambar 4.3 Grafik hubungan antara tegangan keluaran fasa T terhadap arus beban.

Analisa grafik

- Dari Gambar 4.3 Terlihat bahwa perubahan tegangan keluaran pada fasa T terhadap arus beban turun secara linier. Semakin besar arus beban maka akan mengakibatkan tegangan keluaran tansformator semakin menurun.

Setelah didapatkan grafik hubungan antara tegangan keluaran terhadap arus fasa beban untuk masing-masing fasa, maka grafik akan di gabungkan untuk melihat perbedaan yang terjadi pada setiap kenaikan arus beban.



Gambar 4.4 Grafik hubungan antara tegangan keluaran terhadap arus beban tiga fasa seimbang pada transformator tiga fasa hubungan delta terbuka.

Analisa Grafik

- Dari Gambar 4.4 dapat kita ketahui bahwa pada pegujian beban seimbang dengan menaikkan arus beban maka tegangan keluaran pada transformator hubungan delta terbuka akan semakin menurun dan mengakibatkan tegangan keluaran semakin tidak seimbang.

4.3 Pengujian Beban Tidak Seimbang

4.3.1 Pengujian dengan 2 fasa dibebani sama sedangkan 1 fasa dibebani berbeda

$V_1 = 110\ V$

Tabel 4.2 Data Hasil Pengujian Dengan 2 Fasa Dibebani Sama Sedangkan 1 Fasa Dibebani Berbeda.

No	I_{L-L} primer (A)			$Vout_{L-L}$ (V)			I_{ph} Beban (A)		
	I_1	I_2	I_3	V_u	V_v	V_w	I_4	I_5	I_6
1	0,98	2,76	2,56	220,56	200,53	217,26	0,35	1,25	1,25
2	2,36	1,14	2,55	222,53	209,09	202,73	1,25	0,35	1,25
3	2,55	2,61	1,07	208,28	219,35	212,27	1,25	1,25	0,35
4	1,49	2,14	2,08	213,37	204,34	208,41	0,65	0,95	0,95
5	1,89	1,67	2,07	211,67	204,21	200,62	0,95	0,65	0,95
6	1,96	2,11	1,68	210,45	211,33	207,13	0,95	0,95	0,65
7	1,02	1,38	1,41	214,52	204,34	212,81	0,35	0,65	0,65
8	1,26	0,98	1,48	214,66	213,63	206,38	0,65	0,35	0,65
9	1,48	1,49	0,87	211,34	214,81	212,52	0,65	0,65	0,35

Dari data hasil pengujian yang tertera pada Tabel 4.2 selanjutnya akan dilakukan perhitungan untuk mencari rata-rata ketidakseimbangan beban.

- Untuk beban tidak seimbang dengan arus beban (0,35 A, 1,25 A, 1,25 A).

Dari data pengujian dapat dicari arus rata-ratanya ($I_{rata-rata}$) yaitu :

$$I_{rata-rata} = \frac{I_R + I_S + I_T}{3}$$

$$I_{rata-rata} = \frac{0,35 + 1,25 + 1,25}{3}$$

$I_{rata-rata}$ = 0,95 A

Dengan menggunakan persamaan koefisien a, b, dan c dapat diketahui besarnya, dimana besarnya arus fasa dalam keadaan seimbang (I) sama besarnya dengan arus rata-rata ($I_{rata-rata}$).

I_R = a x I maka,

a = $\frac{I_R}{I} = \frac{0,35}{0,95}$

= 0,36

I_S = b x I maka,

b = $\frac{I_S}{I} = \frac{1,25}{0,95}$

= 1,32

I_T = c x I maka,

c = $\frac{I_T}{I} = \frac{1,25}{0,95}$

= 1,32

Rata-rata ketidakseimbangan beban (dalam %) adalah :

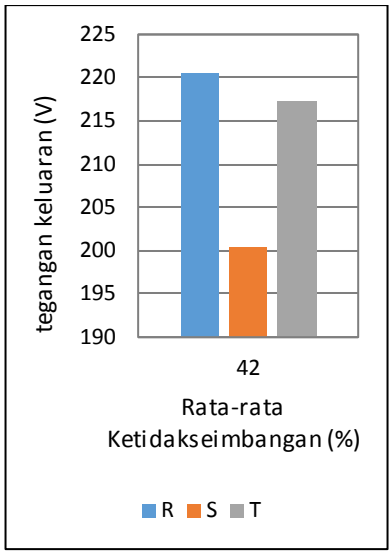
$= \frac{\{|a-1|+|b-1|+|c-1|\}}{3} \; x \; 100\%$

$= \frac{\{|0,36-1|+|1,32-1|+|1,32-1|\}}{3} \; x \; 100\%$

$= \frac{\{1,28\}}{3} \; x \; 100\%$

= 42%

Berdasarkan dari hasil perhitungan rata-rata ketidakseimbangan beban dengan perbedaan arus fasa beban 0,35 A, 1,25 A, 1,25 A didapatkan hasil rata-rata ketidakseimbangan sebesar 42%. Untuk beban tidak seimbang dengan rata-rata ketidakseimbangannya 42% pengaruhnya pada tegangan keluaran trafo hubungan delta terbuka dapat dilihat pada gambar 4.5.



Gambar 4.5 Perbedaan tegangan keluaran fasa R, S, T pada rata-rata ketidakseimbangan 42%.

Analisa grafik :

- Dari Gambar 4.5 Dapat kita ketahui bahwa pada rata-rata ketdiakseimbangan 42% akan mengakibatkan tegangan keluaran pada transformator delta terbuka tidak seimbang dan perbedaan antara fasa R, S, T sangat besar.

➢ Untuk beban tidak seimbang dengan besar arus beban (0,65 A, 0,95 A, 0,95 A)

Dari data pengujian dapat dicari arus rata-ratanya ($I_{rata-rata}$) yaitu :

$I_{rata-rata} = \frac{I_R + I_S + I_T}{3}$

$I_{rata-rata} = \frac{0.65 + 0,95 + 0,95}{3}$

$I_{rata-rata}$ = 0,85 A

I_R = a x I maka,

a = $\frac{I_R}{I} = \frac{0,65}{0,85}$

= 0,41

I_S = b x I maka,

b = $\frac{I_S}{I} = \frac{0,95}{0,85}$

= 1,12

I_T = c x I maka,

c = $\frac{I_T}{I} = \frac{0,95}{0,85}$

= 1,12

Rata-rata ketidakseimbangan beban (dalam %) adalah :

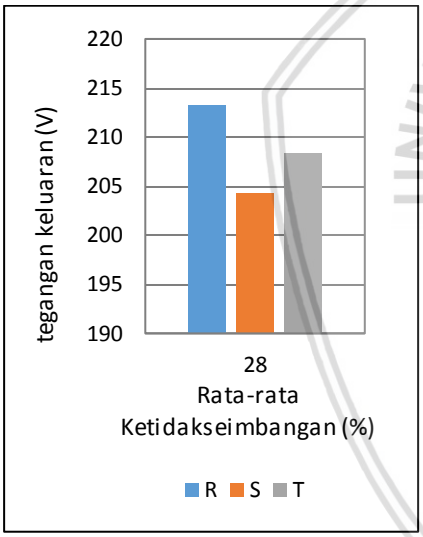
$= \frac{\{|a-1|+|b-1|+|c-1|\}}{3} \; x \; 100\%$

$= \frac{\{|0,41-1|+|1,12-1|+|1,12-1|\}}{3} \; x \; 100\%$

$= \frac{\{0,83\}}{3} \; x \; 100\%$

= 28%

Berdasarkan dari hasil perhitungan rata-rata ketidakseimbangan beban dengan perbedaan arus fasa beban 0,65 A, 0,95 A, 0,95 A didapatkan hasil rata-rata ketidakseimbangan sebesar 28%. Untuk beban tidak seimbang dengan rata-rata ketidakseimbangannya 28% pengaruhnya pada tegangan keluaran trafo hubungan delta terbuka dapat dilihat pada gambar 4.6.



Gambar 4.6 Perbedaan tegangan keluaran fasa R, S, T pada rata-rata ketidakseimbangan 28%.

Analisa grafik :

- Dari Gambar 4.6 Dapat kita ketahui bahwa pada rata-rata ketdiakseimbangan 28% akan mengakibatkan tegangan keluaran pada transformator delta terbuka tidak seimbang dan perbedaan antara fasa R, S, T cukup besar.

➢ Untuk beban tidak seimbang dengan besar arus beban (0,35 A, 0,65 A, 0,65 A).

Dari data pengujian dapat dicari arus rata-ratanya ($I_{rata-rata}$) yaitu :

$I_{rata-rata} = \frac{I_R + I_S + I_T}{3}$

$I_{rata-rata} = \frac{0,35+0,65+0,65}{3}$

$I_{rata-rata}$ = 0,55 A

I_R = a x I maka,

a = $\frac{I_R}{I} = \frac{0,35}{0,55}$

= 0,64

I_S = b x I maka,

b = $\frac{I_S}{I} = \frac{0,65}{0,55}$

= 1,18

I_T = c x I maka,

c = $\frac{I_T}{I} = \frac{0,65}{0,55}$

= 1,18

Rata-rata ketidakseimbangan beban (dalam %) adalah :

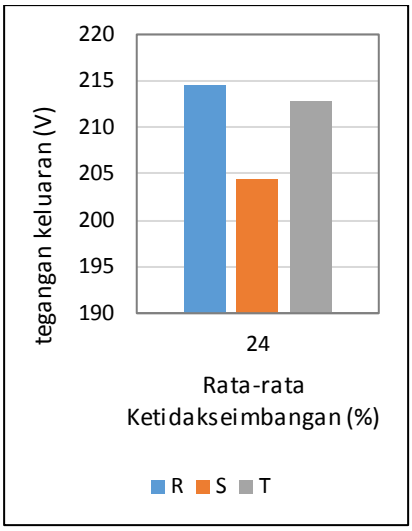
$= \frac{\{|a-1|+|b-1|+|c-1|\}}{3}\ x\ 100\%$

$= \frac{\{|0,64-1|+|1,18-1|+|1,18-1|\}}{3}\ x\ 100\%$

$= \frac{\{0,72\}}{3}\ x\ 100\%$

= 24%

Berdasarkan dari hasil perhitungan rata-rata ketidakseimbangan beban dengan perbedaan arus fasa beban 0,35 A, 0,65 A, 0,65 A didapatkan hasil rata-rata ketidakseimbangan sebesar 24%. Untuk beban tidak seimbang dengan rata-rata ketidakseimbangannya 24% pengaruhnya pada tegangan keluaran trafo hubungan delta terbuka dapat dilihat pada gambar 4.7.



Gambar 4.7 Perbedaan tegangan keluaran fasa R, S, T pada rata-rata ketidakseimbangan 24%.

Analisa grafik :

- Dari Gambar 4.7 Dapat kita ketahui bahwa pada rata-rata ketdiakseimbangan 24% akan mengakibatkan tegangan keluaran pada transformator delta terbuka tidak seimbang dan perbedaan antara fasa R, S, T cukup besar.

4.3.2 Pengujian Dengan Masing-masing Fasa Dibebani Berbeda

$V_1 = 110\ V$

Tabel 4.3 Data Hasil Pengujian Dengan Masing-masing Fasa Dibebani Berbeda.

No	I_{L-L} primer (A)			$Vout_{L-L}$ (V)			I_{ph} Beban (A)		
	I_1	I_2	I_3	V_u	V_v	V_w	I_4	I_5	I_6
1	0,87	1,86	1,97	215,47	201,39	209,76	0,35	0,65	0,95
2	1,68	1,01	2,17	216,33	214,01	205,63	0,65	0,35	0,95
3	2,08	1,68	1,04	208,11	213,84	206,15	0,95	0,65	0,35
4	1,54	2,46	2,58	213,44	208,39	210,28	0,65	0,95	1,25
5	2,49	1,62	2,59	214,39	212,33	206,79	0,95	0,65	1,25
6	2,57	2,47	1,54	209,03	212,73	208,69	1,25	0,95	0,65
7	0,91	2,5	2,58	217,37	203,39	214,17	0,35	0,95	1,25
8	2,38	1,06	2,46	218,34	210,45	207,56	0,95	0,35	1,25
9	2,48	2,36	1,04	206,78	216,63	207,12	1,25	0,95	0,35

Dari data hasil pengujian yang tertera pada Tabel 4.3 selanjutnya akan dilakukan perhitungan untuk mencari rata-rata ketidakseimbangan beban.

- Untuk beban tidak seimbang dengan arus beban (0,35 A, 0,65 A, 0,95 A).

Dari data pengujian dapat dicari arus rata-ratanya ($I_{rata-rata}$) yaitu :

$I_{rata-rata} = \frac{I_R + I_S + I_T}{3}$

$I_{rata-rata} = \frac{0,35+0,65+0,95}{3}$

$I_{rata-rata}$ = 0,65 A

I_R = a x I maka,

a = $\frac{I_R}{I} = \frac{0,35}{0,65}$

= 0,54

I_S = b x I maka,

b = $\frac{I_S}{I} = \frac{0,65}{0,65}$

= 1

I_T = c x I maka,

c = $\frac{I_T}{I} = \frac{0,95}{0,65}$

= 1,46

Dengan demikian rata-rata ketidakseimbangan beban (dalam %) adalah :

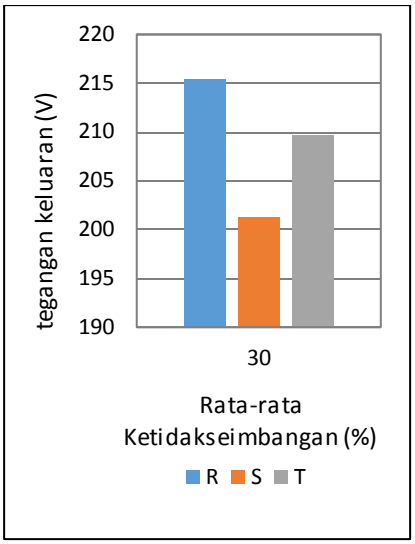
$= \frac{\{|a-1|+|b-1|+|c-1|\}}{3}\ x\ 100\%$

$= \frac{\{|0,54-1|+|1-1|+|1,46-1|\}}{3}\ x\ 100\%$

$= \frac{\{0,92\}}{3}\ x\ 100\%$

= 30%

Berdasarkan dari hasil perhitungan rata-rata ketidakseimbangan beban dengan perbedaan arus fasa beban 0,35 A, 0,65 A, 0,95 A didapatkan hasil rata-rata ketidakseimbangan sebesar 30%. Untuk beban tidak seimbang dengan rata-rata ketidakseimbangannya 30% pengaruhnya pada tegangan keluaran trafo hubungan delta terbuka dapat dilihat pada gambar 4.8.



Gambar 4.8 Perbedaan tegangan keluaran fasa R, S, T pada rata-rata ketidakseimbangan 30%.

Analisa grafik :

- Dari Gambar 4.8 Dapat kita ketahui bahwa pada rata-rata ketdiakseimbangan 30% akan mengakibatkan tegangan keluaran pada transformator delta terbuka tidak seimbang dan perbedaan antara fasa R, S, T cukup besar.

➢ Untuk beban tidak seimbang dengan arus beban (0,65 A, 0,95 A, 1,25 A).

Dari data pengujian dapat dicari arus rata-ratanya ($I_{rata-rata}$) yaitu :

$I_{rata-rata} = \frac{I_R + I_S + I_T}{3}$

$I_{rata-rata} = \frac{0,65+0,95+1,25}{3}$

$I_{rata-rata}$ = 0,95 A

I_R = a x I maka,

a = $\frac{I_R}{I} = \frac{0,65}{0,95}$

= 0,68

I_S = b x I maka,

b = $\frac{I_S}{I} = \frac{0,95}{0,95}$

= 1

I_T = c x I maka,

c = $\frac{I_T}{I} = \frac{1,25}{0,95}$

= 1,32

Dengan demikian rata-rata ketidakseimbangan beban (dalam %) adalah :

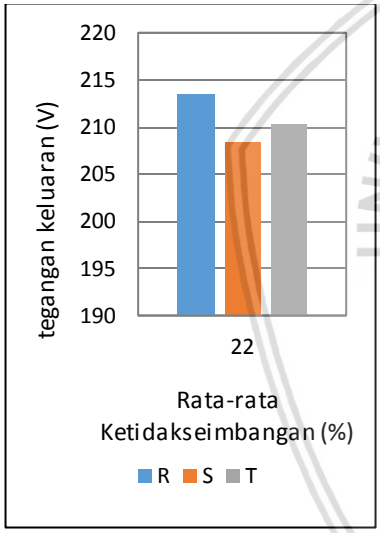
$= \frac{\{|a-1|+|b-1|+|c-1|\}}{3} \; x \; 100\%$

$= \frac{\{|0,68-1|+|1-1|+|1,32-1|\}}{3} \; x \; 100\%$

$= \frac{\{0,64\}}{3} \; x \; 100\%$

= 22%

Berdasarkan dari hasil perhitungan rata-rata ketidakseimbangan beban dengan perbedaan arus fasa beban 0,65 A, 0,95 A, 1,25 A didapatkan hasil rata-rata ketidakseimbangan sebesar 22%. Untuk beban tidak seimbang dengan rata-rata ketidakseimbangannya 22% pengaruhnya pada tegangan keluaran trafo hubungan delta terbuka dapat dilihat pada gambar 4.9.



Gambar 4.9 Perbedaan tegangan keluaran fasa R, S, T pada rata-rata ketidakseimbangan 22%.

Analisa grafik :

- Dari Gambar 4.9 Dapat kita ketahui bahwa pada rata-rata ketdiakseimbangan 22% akan mengakibatkan tegangan keluaran pada transformator delta terbuka tidak seimbang dan perbedaan antara fasa R, S, T tidak terlalu besar.

➢ Untuk beban tidak seimbang dengan arus beban (0,35 A, 0,95 A, 1,25 A).

Dari data pengujian dapat dicari arus rata-ratanya ($I_{rata-rata}$) yaitu :

$I_{rata-rata} = \frac{I_R + I_S + I_T}{3}$

$I_{rata-rata} = \frac{0,35+0,95+1,25}{3}$

$I_{rata-rata}$ = 0,85 A

I_R = a x I maka,

a = $\frac{I_R}{I} = \frac{0,35}{0,85}$

= 0,41

I_S = b x I maka,

b = $\frac{I_S}{I} = \frac{0,95}{0,85}$

= 1,12

I_T = c x I maka,

c = $\frac{I_T}{I} = \frac{1,25}{0,85}$

= 1,47

Dengan demikian rata-rata ketidakseimbangan beban (dalam %) adalah :

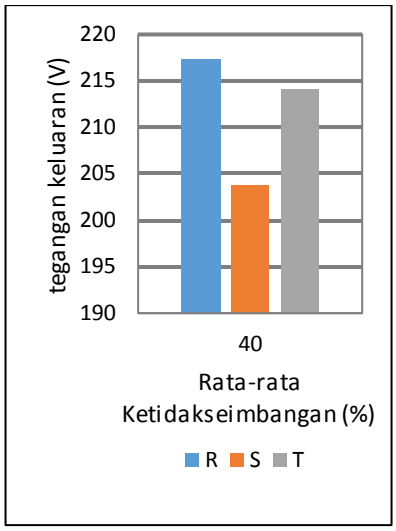
$= \frac{\{|a-1|+|b-1|+|c-1|\}}{3}\ x\ 100\%$

$= \frac{\{|0,41-1|+|1,12-1|+|1,47-1|\}}{3}\ x\ 100\%$

$= \frac{\{1,2\}}{3}\ x\ 100\%$

= 40%

Berdasarkan dari hasil perhitungan rata-rata ketidakseimbangan beban dengan perbedaan arus fasa beban 0,35 A, 0,95 A, 1,25 A didapatkan hasil rata-rata ketidakseimbangan sebesar 40%. Untuk beban tidak seimbang dengan rata-rata ketidakseimbangannya 40% pengaruhnya pada tegangan keluaran trafo hubungan delta terbuka dapat dilihat pada gambar 4.10.



Gambar 4.10 Perbedaan tegangan keluaran fasa R, S, T pada rata-rata ketidakseimbangan 40%.

Analisa grafik :

- Dari Gambar 4.10 Dapat kita ketahui bahwa pada rata-rata ketdiakseimbangan 40% akan mengakibatkan tegangan keluaran pada transformator delta terbuka tidak seimbang dan perbedaan antara fasa R, S, T sangat besar.

Setelah didapatkan hasil dari perhitungan rata-rata ketidakseimbangan beban pada setiap variasi arus beban yang diatur pada pengujian beban tidak seimbang maka data dapat disusun sebagai berikut :

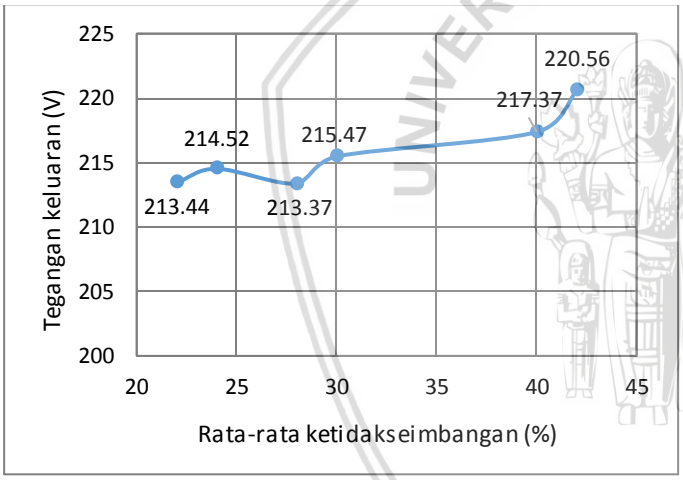
Tabel 4.4 Data Rata-rata Ketidakseimbangan Beban.

No	Variasi Arus Fasa Beban (A)			Rata-rata Ketidakseimbangan (%)
	I_4	I_5	I_6	
1	0,65	0,95	1,25	22
2	0,35	0,65	0,65	24
3	0,65	0,95	0,95	28
4	0,35	0,65	0,95	30
5	0,35	0,95	1,25	40
6	0,35	1,25	1,25	42

Tabel 4.5 Data Arus Fasa Beban, Rata-rata Ketidakseimbangan Beban dan Tegangan Keluaran.

No	$I_{ph}Beban\ (A)$			Rata-rata Ketidakseimbangan (%)	$V_{out}\ (V)$		
	I_4	I_4	I_4		R	S	T
1	0,65	0,95	1,25	22	213,44	208,39	210,28
2	0,35	0,65	0,65	24	214,52	204,34	212,81
3	0,65	0,95	0,95	28	213,37	204,34	208,41
4	0,35	0,65	0,95	30	215,47	201,39	209,76
5	0,35	0,95	1,25	40	217,37	203,39	214,17
6	0,35	1,25	1,25	42	220,56	200,53	217,26

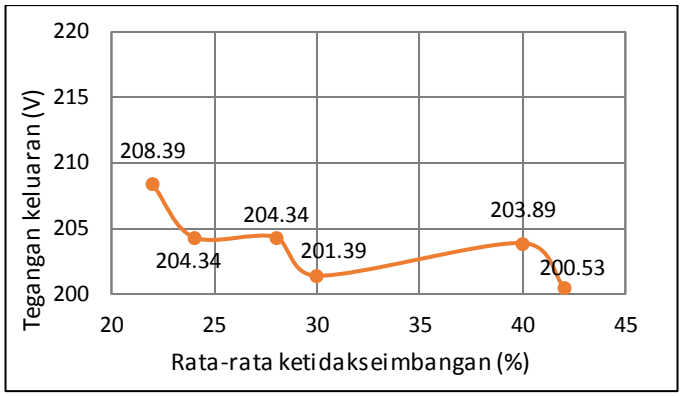
Berdasarkan data pada tabel 4.5 Telah didapatkan hasil perhitungan rata-rata ketidakseimbangan beban dan data tegangan keluaran transformator yang di dapatkan dari hasil pengujian, maka dari data tersebut dapat di gambarkan grafik hubungan antara tegangan keluaran tiap fasa terhadap rata-rata ketidakseimbangan beban.



Gambar 4.11 Grafik hubungan tegangan keluaran fasa R terhadap rata-rata ketidakseimbangan beban.

Analisa grafik

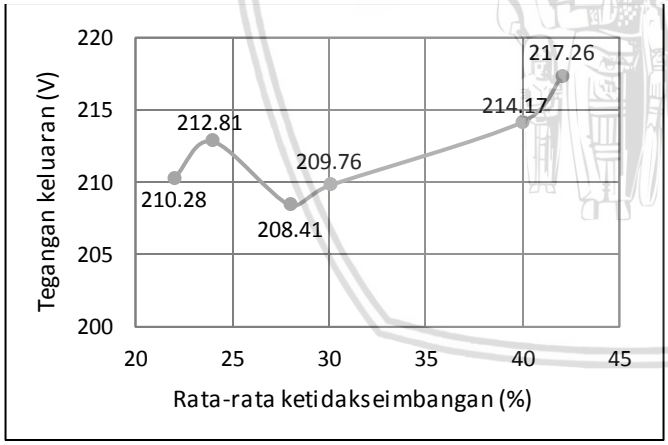
- Dari gambar 4.11 Terlihat bahwa tegangan keluaran pada fasa R berubah secara fluktuatif terhadap kenaikan rata-rata ketidakseimbangan beban. Semakin besar ketidakseimbangan beban akan mengakibatkan tegangan keluaran akan semakin tidak seimbang



Gambar 4.12 Grafik hubungan tegangan keluaran fasa S terhadap rata-rata ketidakseimbangan beban.

Analisa grafik

- Dari gambar 4.12 Terlihat bahwa tegangan keluaran pada fasa S berubah secara fluktuatif terhadap kenaikan rata-rata ketidakseimbangan beban. Semakin besar ketidakseimbangan beban akan mengakibatkan tegangan keluaran akan semakin tidak seimbang

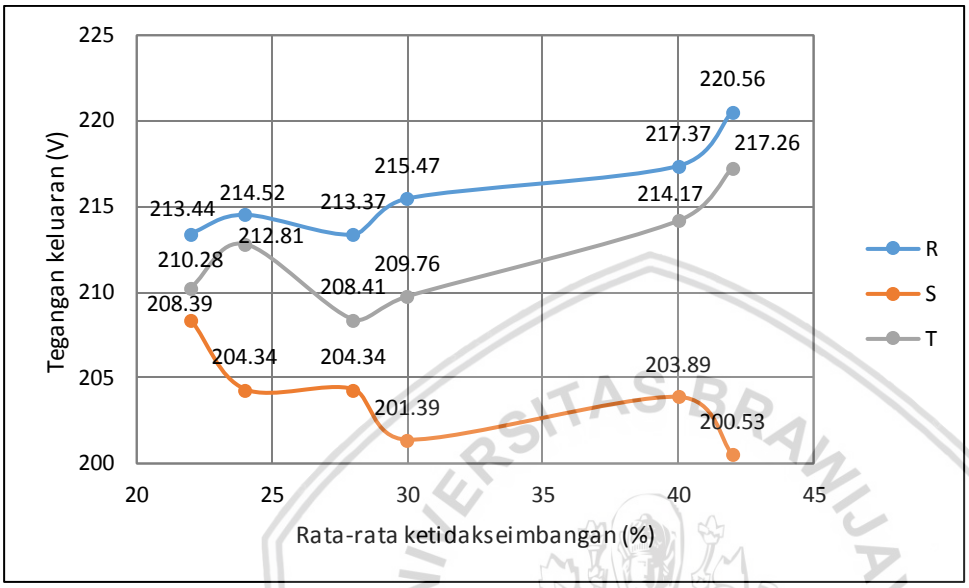


Gambar 4.13 Grafik hubungan tegangan keluaran fasa S terhadap rata-rata ketidakseimbangan beban.

Analisa grafik

- Dari gambar 4.13 Terlihat bahwa tegangan keluaran pada fasa T berubah secara fluktuatif terhadap kenaikan rata-rata ketidakseimbangan beban. Semakin besar ketidakseimbangan beban akan mengakibatkan tegangan keluaran akan semakin tidak seimbang

Setelah didapatkan grafik hubungan antara tegangan keluaran terhadap rata-rata ketidakseimbangan beban untuk masing-masing fasa, maka grafik akan di gabungkan untuk melihat perbedaan yang terjadi pada setiap kenaikan ketidakseimbangan beban.



Gambar 4.14 Grafik Hubungan Antara Rata-rata Ketidakseimbangan Dengan Tegangan Keluaran.

Analisa Grafik :

- Dari Gambar 4.14 Dapat kita ketahui pada beban tidak seimbang dengan variasi ketidakseimbangan beban yang berbeda-beda mengakibatkan rata-rata ketidakseimbangan yang berbeda pula sehingga berpengaruh terhadap tegangan keluaran transformator. Terlihat dari grafik ketika rata-rata ketidakseimbangan beban semakin meningkat yang menandakan bebannya semakin tidak seimbang maka tegangan keluaran akan semakin tidak seimbang.

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil perhitungan dan analisis pengaruh beban seimbang dan tidak seimbang terhadap tegangan keluaran transformator tiga fasa hubungan delta terbuka, maka dapat disimpulkan beberapa hal sebagai berikut:

1. Besar tegangan keluaran transformator hubungan delta terbuka untuk transformator yang digunakan pada penelitian ini adalah 220 V, hasilnya sama dengan ketika terhubung delta-delta, hal ini dikarenakan hubungan delta terbuka adalah hubungan alternatif dari hubungan delta-delta ketika salah satu fasa mengalami kerusakan dapat dilepas untuk diperbaiki. Besar tegangan keluarannya akan sama tetapi kapasitas transformator akan berkurang.
2. Pada saat dibebani dengan beban tiga fasa seimbang tegangan keluaran pada transformator hubungan delta terbuka akan berubah terhadap arus beban. Semakin besar beban yang dilayani maka tegangan keluaran transformator hubungan delta terbuka akan semakin menurun serta akan mengakibatkan perbedaan besar tegangan keluaran antara fasa-fasanya sehingga mengakibatkan tegangan keluarannya tidak seimbang.
3. Pada saat dibebani dengan beban tiga fasa tidak seimbang tegangan keluaran pada transformator hubungan delta terbuka menjadi tidak seimbang pula. Tegangan keluarannya dipengaruhi oleh persentase rata-rata ketidakseimbangan bebannya. Semakin besar rata-rata ketidakseimbangan beban maka perbedaan tegangan antara fasa R, S dan T akan semakin besar. Hal ini yang menyebabkan tegangan keluaran pada transformator semakin tidak seimbang.

repository.ub.ac.id
UNIVERSITAS BRAWIJAYA

5.2 Saran

Untuk penelitian lebih lanjut beban yang digunakan sebaiknya beban yang lebih kompleks. Untuk kapasitas transformator dapat menggunakan kapastias transformator yang lebih besar seperti transformator untuk sistem distribusi.

repository.ub.ac.id
UNIVERSITAS BRAWIJAYA

DAFTAR PUSTAKA

Chapman, Stephen J. (2005). *Electric Machinery Fundamentals* 4th Edition. Singapore: Mc Graw – Hill Book Company.

Chen, H.T. (1992). Open wye-open delta and open delta-open delta transformer models for rigorous distribution system analysis. *IEE PROCEEDINGS Vol, 139, No. 3:*227-233.

Lumbanraja, Hotdes. (2008). *Pengaruh Beban Tidak Seimbang Terhadap Efisiensi Transformator Tiga Fasa Hubungan Delta terbuka*. Medan: Universitas Sumatra Utara.

Neupauer, J.C (1956). Unbalanced Open-Wye Open-Delta Transormer Banks. *AIEE Transactions:* 570-572.

Setiadji, Julius Santoso, Tabrani, M. & Yanuar, I. (2006). Pengaruh Ketidakseimbangan Beban Terhadap Arus Netral dan Losses pada Trafo Distribusi. *Jurnal Teknik Elektro Vol. 6, No. 1*:68-73.

Sudirham, Sudaryanto. (2012). *Analisis Rangkaian Listrik Jilid 1*. Bandung: Darpublic.

Sumanto, MA, Drs. (1991). *Teori Transformator*. Yogyakarta: Andi Offset

Wijaya, Mochtar. (2001). *Dasar-dasar Mesin Listrik*. Jakarta: Djambatan.

Zuhal. (2000). *Dasar Teknik Tenaga Listrik dan Elektronika Daya*. Jakarta: Edisi ke-6, Gramedia Pustaka Utama.

LAMPIRAN

repository.ub.ac.id
UNIVERSITAS BRAWIJAYA

Lampiran 1. PMAC770 manual book

PMAC770 Multifunction Power Meter

Installation & Operation Manual

V3.0

ZHUHAI PILOT TECHNOLOGY CO., LTD.

1. General Information

PMAC770 Three Phase Multifunction Power Meter is designed for monitoring and displaying all kinds of electricity parameters. It's widely used in low voltage and medium voltage distribution/ automation system.

PMAC770 provide the main function as below:

- Real-time measuring data, true RMS
- All energy data (include real energy, multi-tariff energy, history energy, 1st ~13th harmonic energy.
- Power quality analysis
- Demand calculation
- Build-in clock and event log
- Over/ under limit alarm
- Phase sequence checking

- Modbus-RTU / BACnet MS/TP / MODBUS TCP/IP communication (Optional)
- Digital input/ Digital output (DI/ DO)
- Analog input/ Analog output (AI/ AO, optional)
- 2 pulse output (optional) etc.

Measuring Function of PMAC770 Basic Unit	High class
Voltage, Current, Power (P, Q, S), Power factor, Energy (kwh, kvarh in 4 quadrant), CO2（for active energy） Frequency, Phase Angle, Demand, Max./ min. value (U, I, P, Q), Multi-tariff energy,Load rate One RS485 (Modbus-RTU), Real-time clock,	√
3 status input + 2 relay output Over / under limit alarm SOE event log	√
Voltage/Current unbalance rate, THD, 31st harmonic, Harmonic RMS(0~31st), Harmonic energy (1~13th), Voltage crest factor, Current K factor, Voltage deviation, Frequency deviation Record for voltage/ frequency deviation, Record history multi-tariff energy Voltage unbalance rate record Record Demand Maximum value Record real time parameters maximum value Running time record	√

repository.ub.ac.id
UNIVERSITAS BRAWIJAYA

2. Order Information

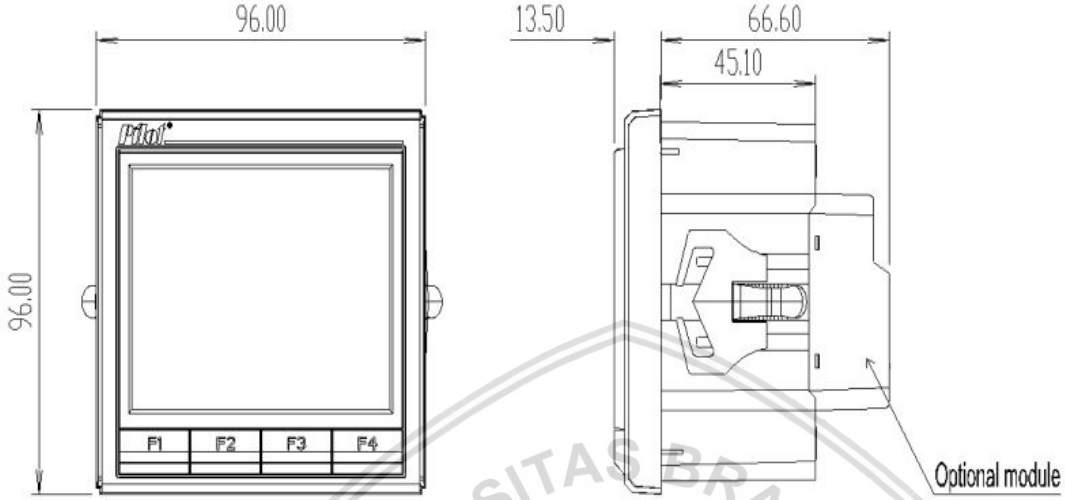
Model No. PMAC770-E - ① - ② - ③ – ④	
Function of basic unit	
E	High class
① Optional Module (Multiple choice, one meter can add no more than 3 modules. One meter can add 2pcs of Module SW or SD, but only 1pcs of other modules.)	
SW	DI module: 4 Digital Input (wet contact),
SD	DI module: 4 Digital Input (dry contact),
R	DO module: 2 Relay output
C	RS485 module: the 2nd RS485 port (Modbus-RTU protocol)
AO	AO module: 2 Analog output (4-20mA)
AI	AI module: 2 Analog input (4-20mA)
EP	Pulse module: 2 pulse output
BA	BACnet module: BACnet protocol
64M+TCP	64Mbit Memory (8M byte) + Ethernet Port
② Rated input voltage(Vph-N/ Vph-ph) and current	
V1	57.7/100V (via PT), 5A
V2	57.7/100V (via PT), 1A
V3	220/380V (direct), 5A
V4	220/380V (direct),1 A
V5	120/208V (direct), 5A
V6	240/415V (direct), 5A
V7	277/480V (direct), 5A
V8	63.5/110V (via PT), 5A
V9	120/208V (direct),1 A
V10	240/415V (direct),1 A
V11	277/480V (direct),1 A
V12	63.5/110V (via PT),1 A
V13	398/690V(direct), 5A
③ Rated input frequency (Not choose will be deem as 50Hz)	
F1	50Hz
F2	60Hz
④ Aux. power supply (Not choose will be deem as P1)	
P1	85~265Vac, 85 ~ 265Vdc, 45-65Hz
P2	100 ~ 420Vac , 100 ~ 400Vdc, 45~60Hz

repository.ub.ac.id
UNIVERSITAS BRAWIJAYA

4. Figure and Terminals

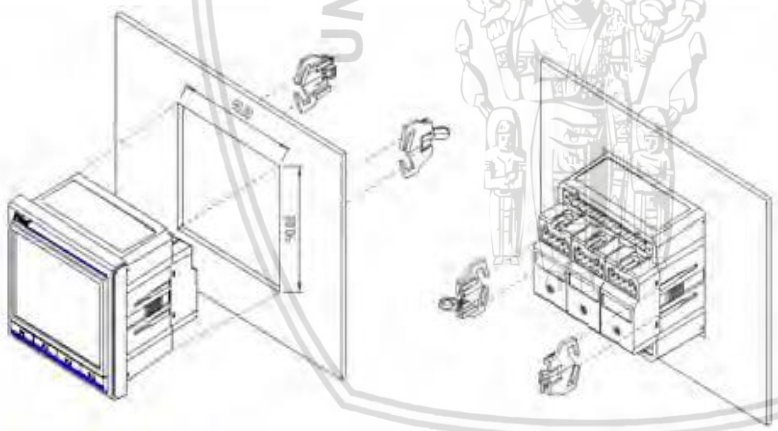
4.1 Dimension

Unit: mm
Cut size: 90*90mm; panel size: 96x96mm
Depth: 45.1mm (no module) ; 66.6mm (add module)



4.2Installation

Unit: mm



repository.ub.ac.id
UNIVERSITAS BRAWIJAYA

4.3 Terminals

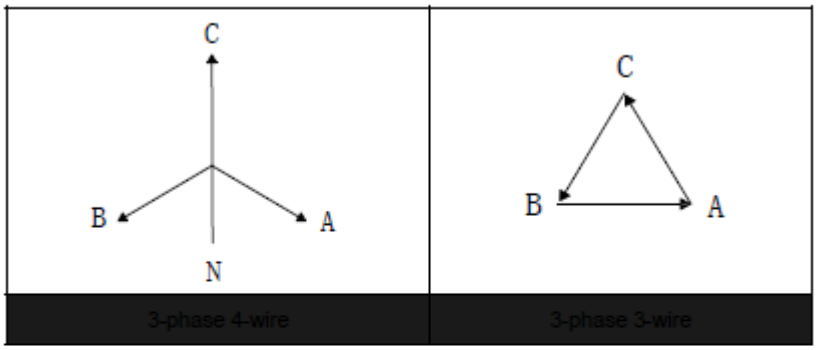
4.3.1 Terminal of Basic Unit

No.	Mark	Definition
1	N/-	Negative wire, Aux. power supply AC/ DC 220V
2	L/+	Positive wire, Aux. power supply AC/ DC 220V
3	V1	Phase A voltage
4	V2	Phase B voltage
5	V3	Phase C voltage
6	VN	Voltage neutral line
7	SHLD	RS485 shield
8	485-	RS485 com port -1, negative wire
9	485+	RS485 com port -1, positive wire
10	RL21	Relay output 2, positive
11	RL22	Relay output 2, negative
12	RL11	Relay output 1, positive
13	RL12	Relay output 1, negative
14	SG	Digital input, common earth
15	S3	Digital input 3, positive
16	S2	Digital input 2, positive
17	S1	Digital input 1, positive
18	I1+	In line, phase A current
19	I1-	Out line, phase A current
20	I2+	In line, phase B current
21	I2-	Out line, phase B current
22	I3+	In line, phase C current
23	I3-	Out line, phase C current

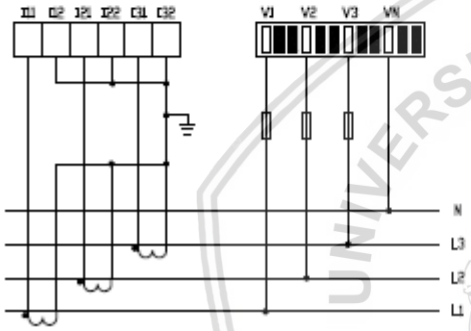
repository.ub.ac.id
UNIVERSITAS BRAWIJAYA

5. Connection Mode and Wiring

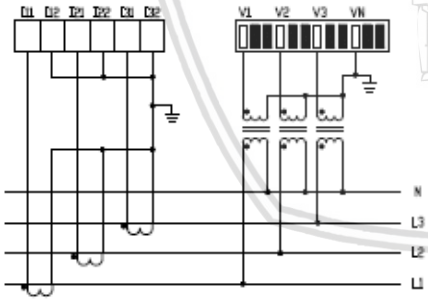
PMAC770 supports 2 kinds of connection mode: 3P4W and 3P3W..



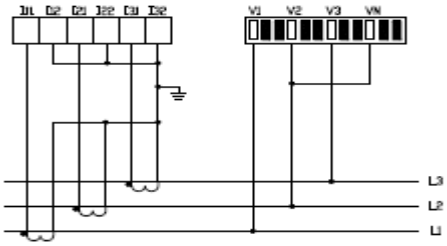
(1) 3-phase 4-wire, no PT, 3CT:



(2) 3-phase 4-wire, 3PT, 3CT:

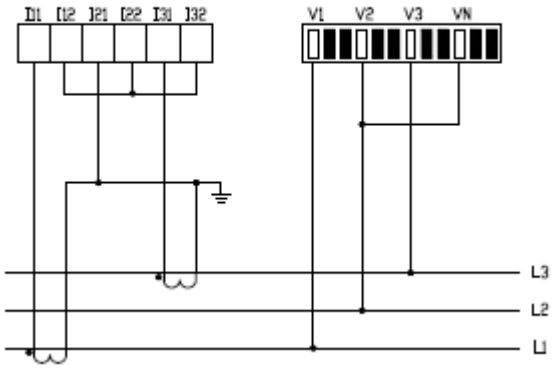


(3) 3-phase 3-wire, no PT, 3CT:

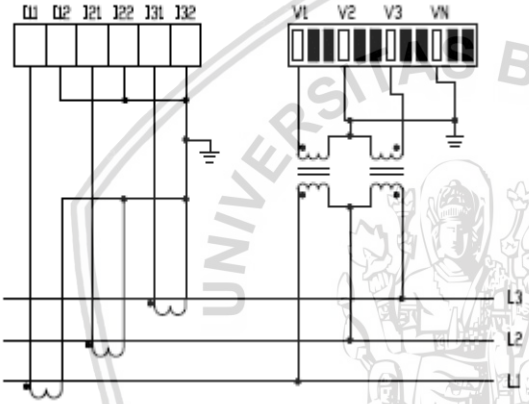


repository.ub.ac.id
UNIVERSITAS BRAWIJAYA

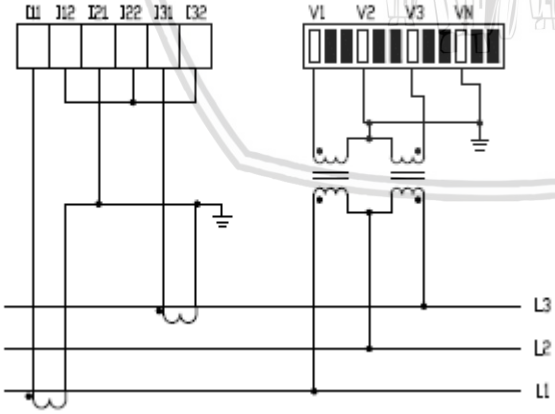
(4) 3-phase 3-wire , no PT, 2CT:



(5) 3-phase 3-wire , 2PT, 3CT:



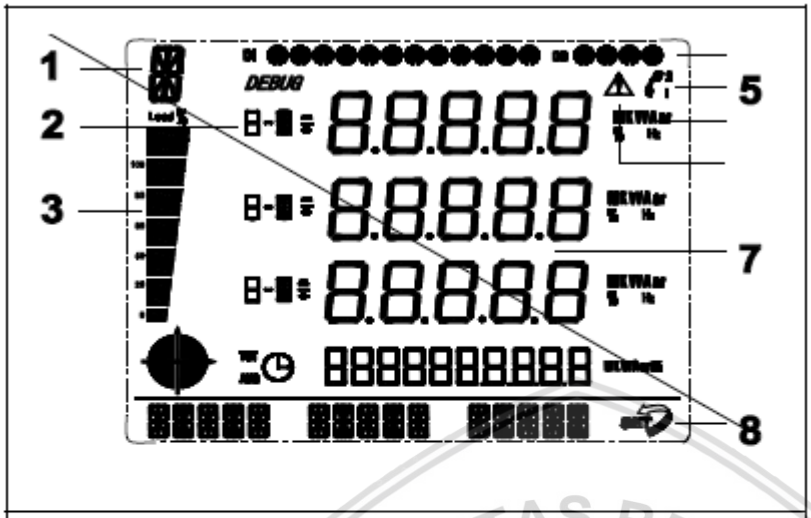
(6) 3-phase 3-wire, 2PT, 2CT:



repository.ub.ac.id
UNIVERSITAS BRAWIJAYA

6. Display and Key-press Operation

6.1 Display Instruction



1: Menu

2: Item

3: Load rate: Load rate= average current / rated current ×100%

4: DI/ DO status: ● means ON, ○ means OFF

5: Communication: meansno communication,

means RS485 port 1, means RS485 port 1, 2.

6: Unit

7: Data display area

8: Key prompt area

9: Alarm: when display ⚠, it mean there is error.

repository.ub.ac.id
UNIVERSITAS BRAWIJAYA

6.2 Keys

6.2.1. General Information

PMAC770 has a back-light LCD, user-friendly display.

Users can query/ set different information by 4 keys according to the menu prompt.

If press the keys, the back-light will be on lasting for 60s. If no continue pressing key,

the back-light will be off.

Keys: F1, F2, F3, F4

6.2.2. Menu Prompt and Keys Instruction

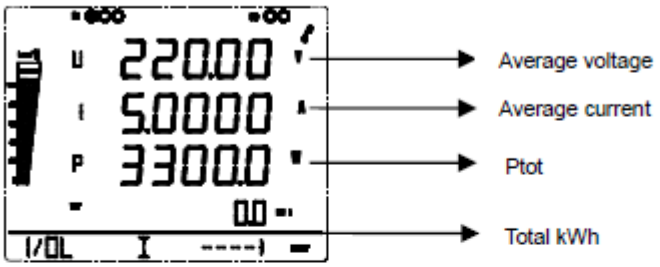
Keys or Prompt	Instruction
---->	To next item, it is for menu rolling search
↩	Return to previous menu or cancel
SET	Setting
Menu prompt	Enter into the menu of corresponding parameter.

repository.ub.ac.id
UNIVERSITAS BRAWIJAYA

7. Query Procedure

7.1 Initial Display

When PMAC770 is powered on, the initial display as below:



Menu Prompt:

VOL: voltage menu

I: Current menu

FRE: Frequency menu

POWER: Power menu

ENERGY: Energy menu

PQ: Power quality menu

DMD: Demand menu

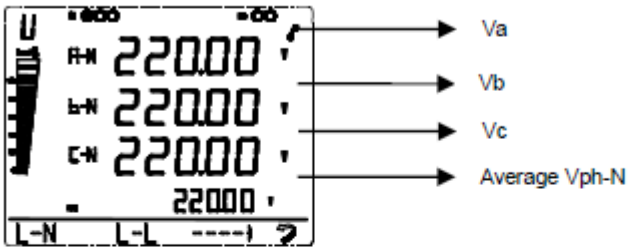
RUN-T:Running time menu

A-I: Analog input menu

SET: Setting

repository.ub.ac.id
UNIVERSITAS BRAWIJAYA

7.2 Voltage Value



Menu Prompt:

L-N: Vph-N & average menu

L-L: Vph-ph & average menu

UNBAL: Positive (U-2). Negative (U-1).

Neutral(U-0). Unbalance rate

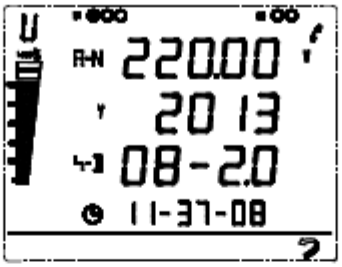
MAX.: Max. Vph-N or Max. Vph-ph

MIN: Min. Vph-N or Min. Vph-ph & time stamp

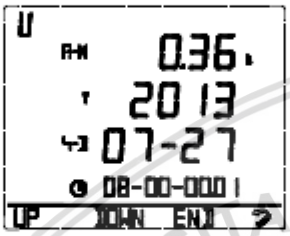
REC: Voltage deviation record

repository.ub.ac.id
UNIVERSITAS BRAWIJAYA

Max. Voltage



Record of Voltage Deviation



Menu Prompt:

UP: Page up to next record

DOWN: Page down to previous record

START: Event occurs time

END: Event end time

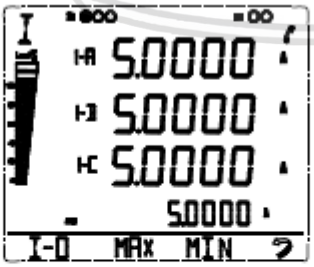
Special notice: the digit on the right of the number

08-00-00.01

It means: Hour, Minute, Second,

After decimal point, it means the records number

7.3 Current Value



Menu Prompt:

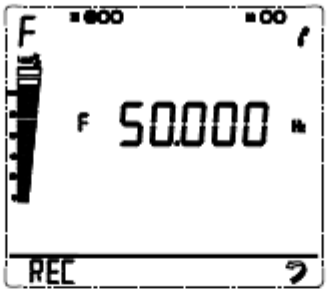
UNBAL: Positive (I-2), Negative (I-1), Neutral (I-0)

Max.: Max. current & time stamp

Min.: Min. current & time stamp

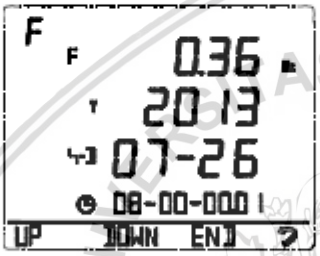
repository.ub.ac.id
UNIVERSITAS BRAWIJAYA

7.4 Frequency



Menu Prompt:

REC: Frequency deviation record 【Display menu similar to Voltage Deviation Record】



Menu Prompt:

UP: Page up to previous record

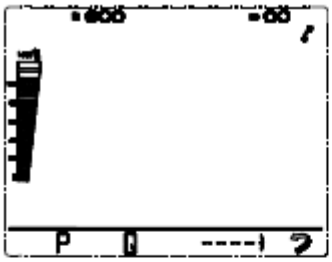
DOWN: Page down to next record

START: Event occurs time

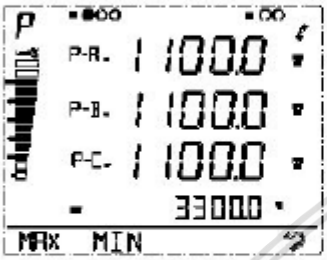
END: Event end time

repository.ub.ac.id
UNIVERSITAS BRAWIJAYA

7.5 Power Value



picture 1



picture 2

picture 3

Menu Prompt:

Power display menu (Picture 1)

P: Active power, per phase & total (Picture 2)

P: Max Active power, per phase&total (Picture 3)

P: Min Active power, per phase&total

Q: Reactive power, per phase & total (Picture 4)

Q : Max Reactive power, per phase&total

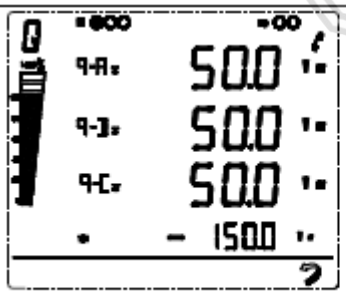
Q : Min Reactive power, per phase&total

S: Apparent power, per phase & total

S:Max Apparent power, per phase&total

S:Min Apparent power, per phase&total

PF: Power factor, per phase & total



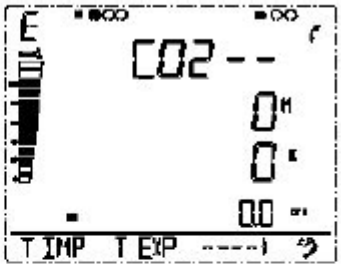
picture 4

repository.ub.ac.id
UNIVERSITAS BRAWIJAYA

7.6 Energy

Total kWh Import kWh, tariff-1

Picture 1



Picture 2

Menu Prompt:

KWH: CO2 Total kWh, Phase A/ B/ C kWh (Imp. & Exp) –Picture 1

KVARH: Total kvarh, Phase A/ B/ C kvarh (Imp. & Exp.)-Picture 4

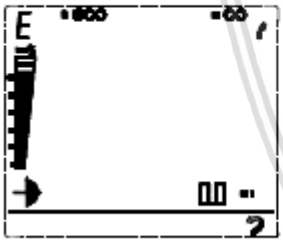
KVAH: Apparent energy (Total, A, B, C Phase)

TOU: Import kWh (or kvarh) of each tariff (tariff 1#, tariff 2#, tariff 3#, tariff 4#),

Export kWh (or kvarh) of each tariff (tariff 1#, tariff 2#, tariff 3#, tariff 4#).

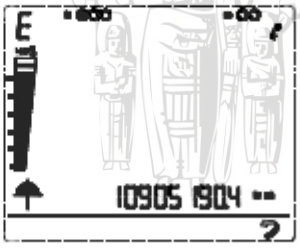
(Picture 2)

Import kWh, phase A



Picture 3

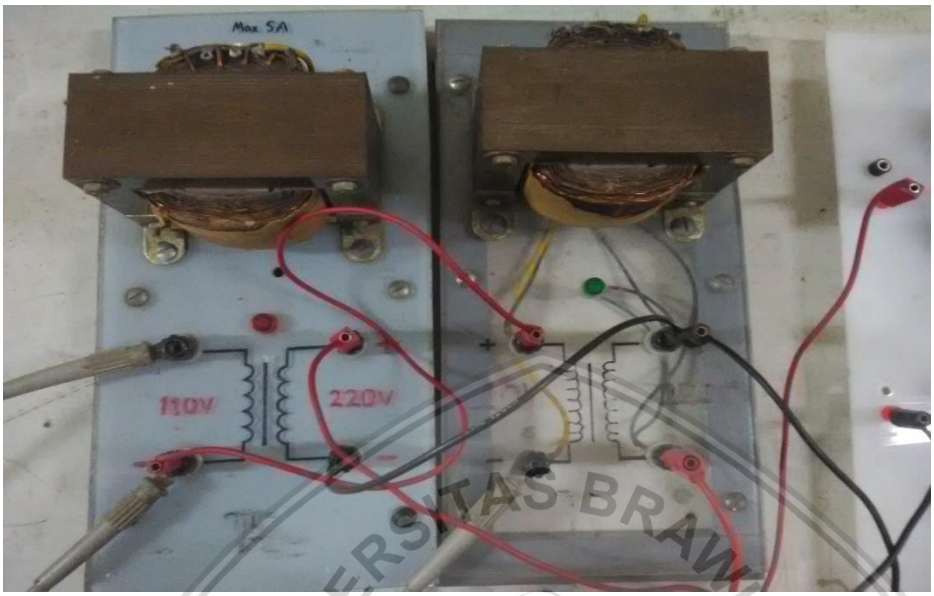
Import kvarh, phase A



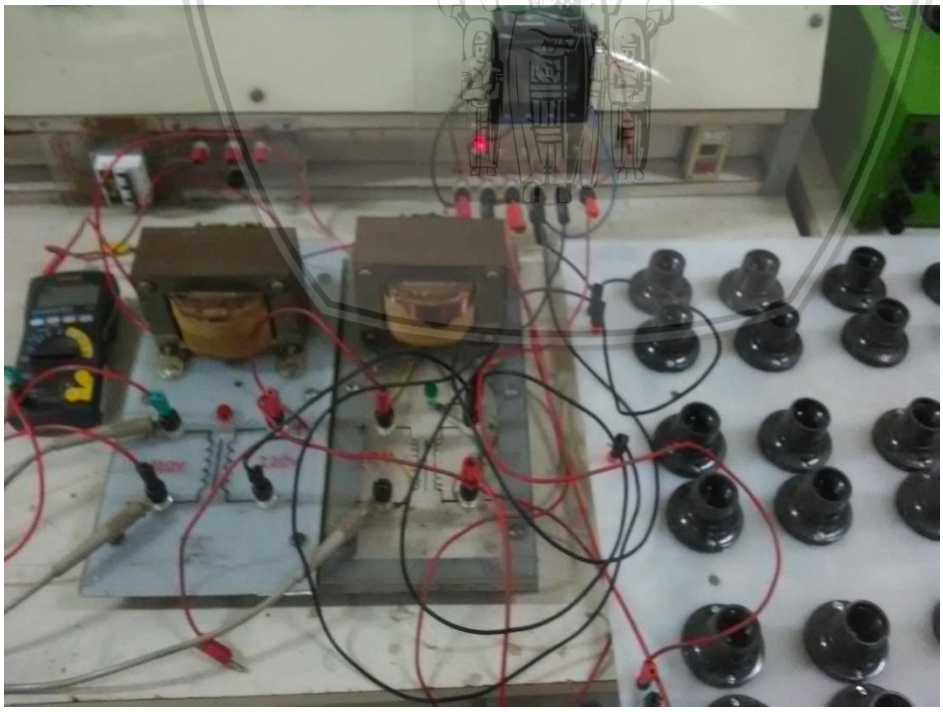
Picture 4

repository.ub.ac.id
UNIVERSITAS BRAWIJAYA

Lampiran 2. Dokumentasi

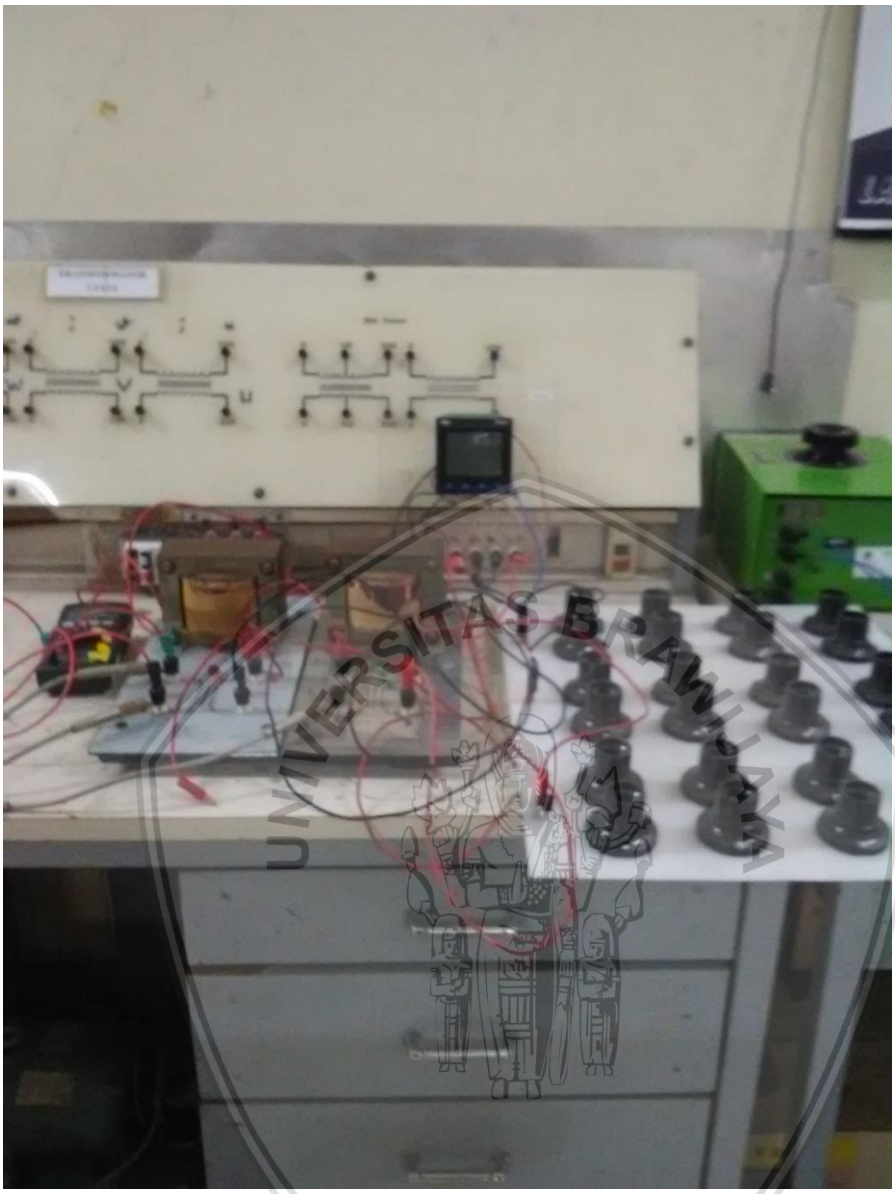


Gambar transformator hubungan delta terbuka



Gambar rangkaian pengujian

repository.ub.ac.id
UNIVERSITAS BRAWIJAYA



Gambar rangkaian pengujian

repository.ub.ac.id
UNIVERSITAS BRAWIJAYA