

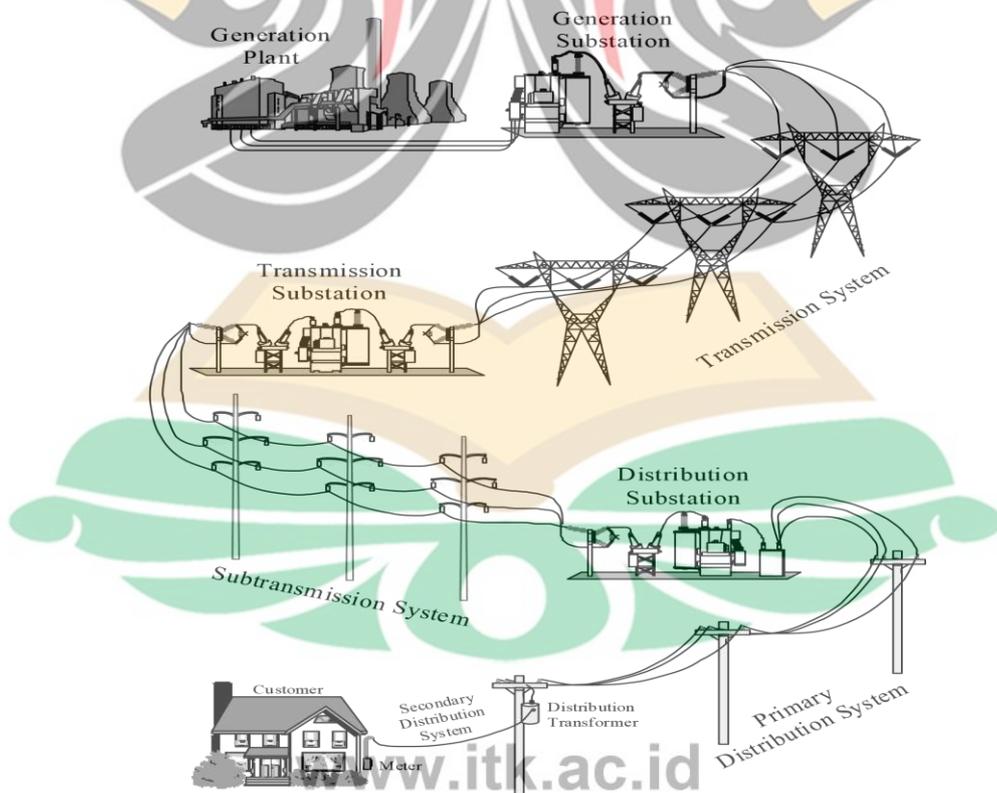
BAB II

www.itk.ac.id

TINJAUAN PUSTAKA

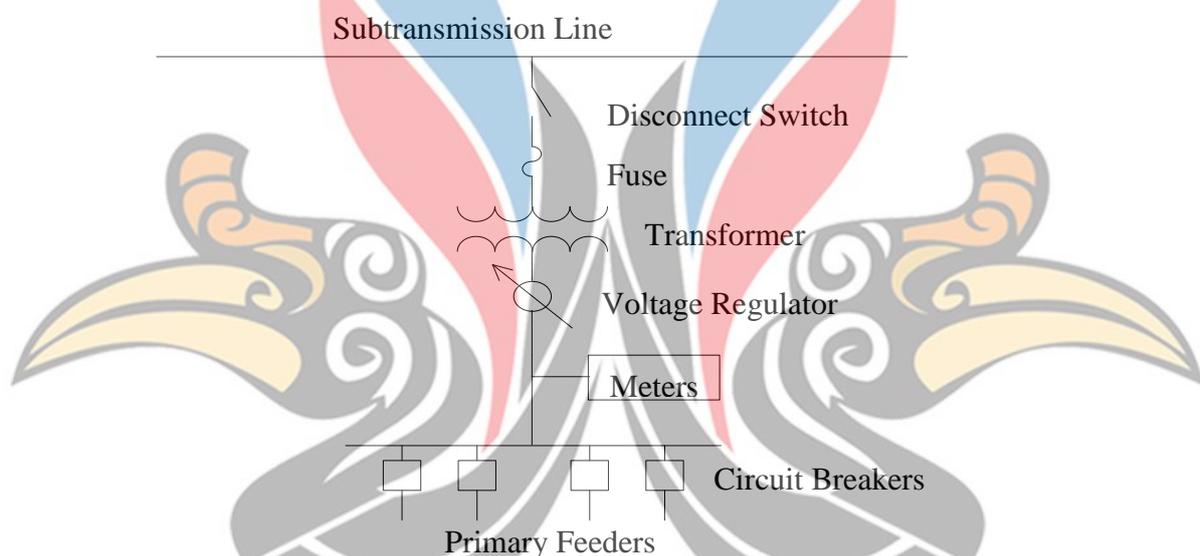
2.1 Distribusi Sistem Tenaga Listrik

Sistem distribusi merupakan bagian dari sistem tenaga listrik. Sistem distribusi ini berguna untuk menyalurkan tenaga listrik dari sumber daya listrik besar (*bulk power source*) sampai ke konsumen. Fungsi distribusi tenaga listrik adalah sebagai pembagian atau penyaluran tenaga listrik ke beberapa tempat (pelanggan), dan merupakan sub sistem tenaga listrik yang langsung berhubungan dengan pelanggan, karena catu daya pada pusat-pusat beban (pelanggan) dilayani langsung melalui jaringan distribusi (Suhadi, 2008). Jaringan distribusi tenaga listrik merupakan jaringan tenaga listrik yang memasok kelistrikan ke beban (pelanggan) dengan menggunakan level tegangan -menengah 20 kV dan tegangan rendah 220-380 volt (Wahyudi, 2014). Gambar 2.1 adalah skema umum dari distribusi.



Gambar 2.1 Sistem Distribusi Listrik (Richard E. Brown, 2009)

Berdasarkan gambar 2.1 jaringan distribusi dengan level tegangan menengah 20 kV disebut jaringan distribusi primer dan jaringan distribusi dengan level tegangan rendah 220/380 volt disebut jaringan distribusi sekunder. Pengertian lain dari jaringan distribusi tenaga listrik adalah jaringan tenaga listrik dari gardu induk ke beban tegangan menengah (TM)/gardu distribusi dengan tegangan menengah dan dari gardu distribusi ke beban pelanggan rendah dengan tegangan rendah (Wahyudi, 2014). Pada gambar 2.2 dijelaskan bahwa terdapat pengaman-pengaman dalam sistem tegangan tinggi sebelum diturunkan tegangannya. Setelah tegangan diturunkan ke level tegangan yang diinginkan, maka energi listrik akan disalurkan ke setiap-setiap *feeder* yang mencakup wilayah dari sistem distribusi tersebut.



Gambar 2.2 Skema Sederhana Distribusi (William H. Kersting, 2002)

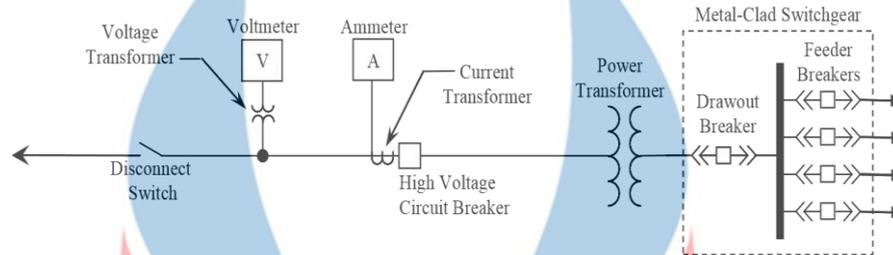
2.2 Saluran Distribusi Sekunder

Sistem distribusi sekunder digunakan untuk menyalurkan tenaga listrik dari gardu distribusi ke beban-beban yang ada di konsumen. Pada sistem distribusi sekunder konfigurasi sistem yang paling banyak digunakan adalah sistem radial. Sistem ini dapat menggunakan kabel yang berisolasi maupun konduktor tanpa isolasi. Sistem ini biasanya disebut sistem tegangan rendah yang langsung akan dihubungkan kepada konsumen/pemakai tenaga listrik dengan melalui peralatan-peralatan sebagai berikut,

1. *Low voltage (LV) board* pada transformator distribusi;

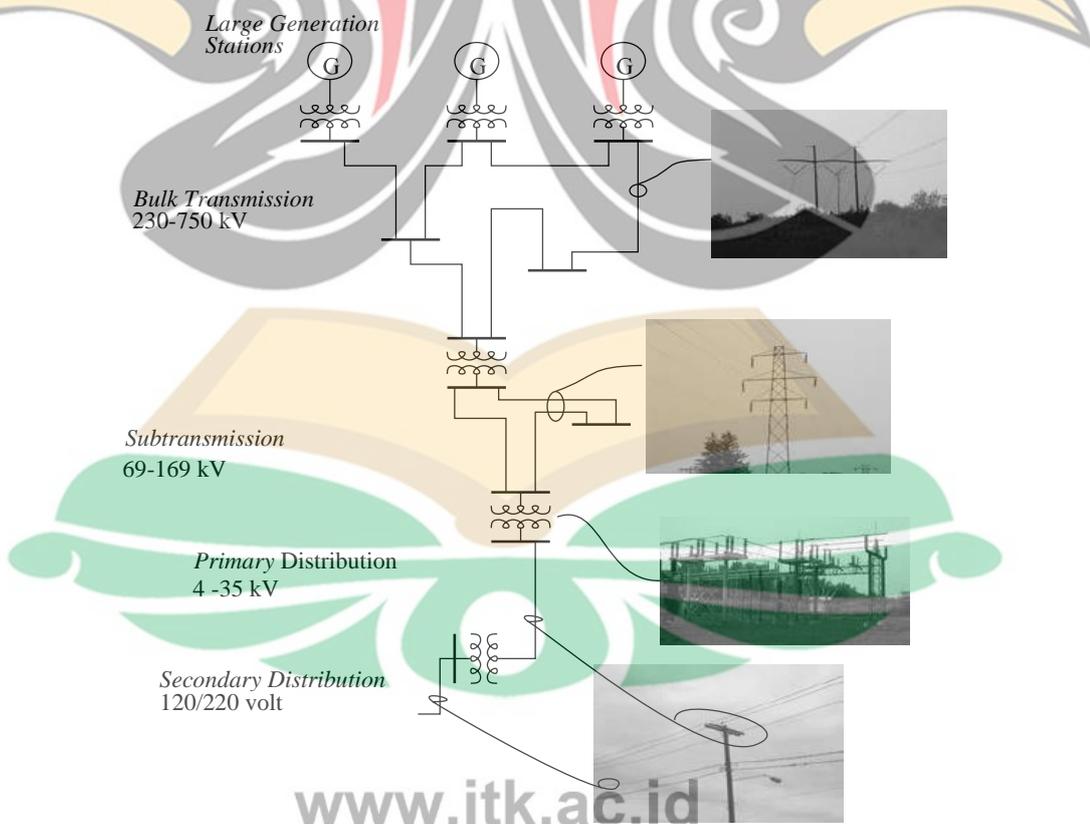
2. Penghantar tegangan rendah (saluran distribusi sekunder); dan
3. Alat pembatas dan pengukur daya (kWh meter) serta *fuse* atau pengaman pada pelanggan.

Komponen saluran distribusi sekunder dapat dilihat seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.3 berikut ini.



Gambar 2.3 Komponen dan Hubungan Sistem Distribusi (Richard E. Brown, 2009)

Sistem distribusi sekunder seperti pada gambar 2.3 merupakan salah satu bagian dalam sistem distribusi, yaitu mulai dari gardu transformator atau gardu distribusi sampai pada pemakai akhir atau konsumen tegangan rendah (Chaerul A., 2017).



Gambar 2.4 Pembagian Tegangan Sistem Tenaga Listrik (T.A. Short, 2004)

Pada gambar 2.4 saluran distribusi primer memiliki gardu-gardu distribusi yang mengambil tegangan untuk diturunkan tegangannya dengan transformator distribusi menjadi sistem tegangan rendah, yaitu 220/380 volt. Selanjutnya disalurkan oleh saluran distribusi sekunder ke konsumen-konsumen melalui penyulang-penyulang. Penyulang merupakan salah satu komponen penting dalam distribusi tenaga listrik. Penyulang berfungsi mengalirkan energi listrik dari gardu induk ke gardu distribusi (Suhadi, 2008).

2.3 Gardu Distribusi

Pengertian umum gardu distribusi tenaga listrik yang paling dikenal adalah suatu bangunan gardu listrik berisi atau terdiri dari instalasi perlengkapan hubung bagi tegangan menengah (PHB-TM), transformator distribusi (TD) dan perlengkapan hubung bagi tegangan rendah (PHB-TR) untuk memasok kebutuhan tenaga listrik bagi para pelanggan baik dengan tegangan menengah (TM 20 kV) maupun tegangan rendah (TR 220/380 volt). Gambar 2.5 merupakan skema gardu distribusi.

Secara garis besar gardu distribusi dibedakan atas:

1. Jenis pemasangannya:

- Gardu pasangan luar, contohnya adalah gardu portal dan gardu cantol;
- Gardu pasangan dalam, contohnya adalah gardu beton dan gardu kios;

2. Jenis Konstruksinya:

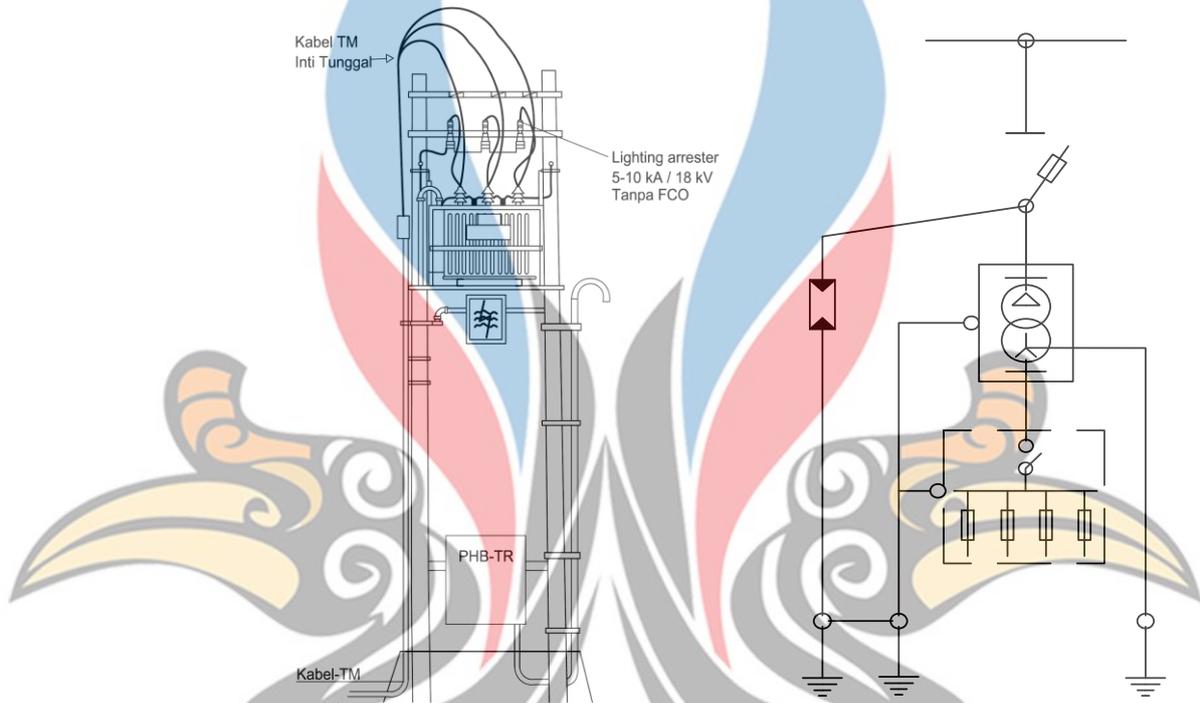
- Gardu Beton, contohnya adalah bangunan sipil dari batu atau beton;
- Gardu Tiang, contohnya adalah gardu portal dan gardu cantol;

3. Jenis Penggunaannya:

- Gardu Kios;
- Gardu Pelanggan Umum; dan
- Gardu Pelanggan Khusus.

Konstruksi Gardu distribusi dirancang berdasarkan optimalisasi biaya terhadap maksud dan tujuan penggunaannya yang kadang kala harus disesuaikan dengan peraturan Pemda (PLN, 2010). Fungsi gardu distribusi adalah sebagai berikut,

1. Menyalurkan atau meneruskan tenaga listrik tegangan menengah ke konsumen tegangan rendah; www.itk.ac.id
2. Menurunkan tegangan menengah menjadi tegangan rendah selanjutnya disalurkan kekonsumen tegangan rendah;
3. Menyalurkan atau meneruskan tenaga listrik tegangan menengah ke gardu distribusi lainnya dan ke gardu hubung.



Gambar 2.5 Gardu Distribusi (PLN, 2010)

2.4 Studi Aliran Daya

Studi aliran daya merupakan penentuan atau perhitungan tegangan, arus, daya aktif maupun, daya reaktif yang terdapat pada berbagai titik jaringan listrik pada keadaan operasi normal, baik yang sedang berjalan maupun yang diharapkan akan terjadi di masa yang akan datang (Stevenson, 1983). Adapun tujuan dari studi analisa aliran daya antara lain,

1. Untuk mengetahui tegangan-tegangan pada setiap bus yang ada dalam sistem, baik magnitud maupun sudut fasa tegangan;
2. Untuk mengetahui daya aktif dan daya reaktif yang mengalir dalam stiap saluran yang ada dalam sistem;

3. Untuk mengetahui kondisi dari semua peralatan, apakah memenuhi batas-batas yang ditentukan untuk menyalurkan daya listrik yang diinginkan;
4. Untuk memperoleh kondisi mula pada perencanaan sistem yang baru. Untuk memperoleh kondisi awal untuk studi-studi selanjutnya seperti studi hubung singkat, stabilitas, dan pembebanan ekonomis (Sulasno, 1993).

2.5 Transformator

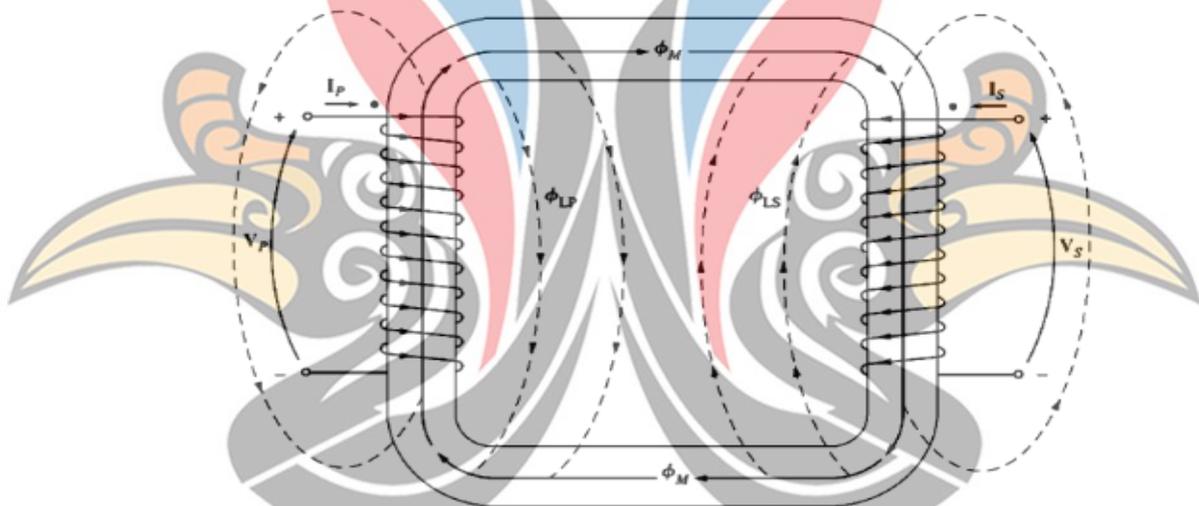
Transformator adalah perangkat yang mengubah daya listrik pada satu level tegangan menjadi daya listrik pada level tegangan lain melalui aktivitas medan magnet. Transformator terdiri dari dua atau lebih kumparan kawat yang melilit inti feromagnetik (Stephen J. Chapman, 2005). Transformator merupakan peralatan statis dimana rangkaian magnetik dan belitan yang terdiri dari 2 atau lebih belitan secara induksi elektromagnetik mentransformasikan daya (arus dan tegangan) sistem AC ke sistem arus dan tegangan lain pada frekuensi yang sama (IEC 60076 -1, 2011). Transformator menggunakan prinsip elektromagnetik yaitu induksi *Faraday*, dimana perubahan arus atau medan listrik dapat membangkitkan medan magnet dan perubahan medan magnet / fluks medan magnet dapat membangkitkan tegangan induksi (PLN, 2014).

Transformator distribusi merupakan transformator yang digunakan untuk mendistribusikan energi listrik dari pembangkit listrik ke daerah perumahan atau lokasi industri. Pada dasarnya transformator distribusi ini mendistribusikan energi listrik pada tegangan rendah yaitu kurang dari 33 kV untuk keperluan rumah tangga ataupun industri yang berada pada kisaran 220 V hingga 440 V (Ratih Listiyarini, 2018). Gambar 2.6 merupakan konstruksi dari transformator.



Gambar 2.6 Kontruksi Transformator (Turan Gonen, 2014)

Apabila kumparan primer dihubungkan dengan sumber, maka akan mengalir arus bolak balik pada kumparan tersebut. Oleh karena kumparan mempunyai inti, arus primer menimbulkan fluks magnet yang juga berubah-ubah pada intinya. Fluks diproduksi di inti seperti yang diberikan oleh hukum *Faraday*. Perubahan fluks pada inti kemudian menginduksi tegangan pada belitan sekunder transformator. (Stephen J. Chapman, 2005). Akibat adanya fluks magnet yang berubah-ubah, pada kumparan primer akan timbul Gerak Gaya Listrik (GGL) induksi (Sumanto, 1991). Fluks magnet yang menginduksikan GGL induksi juga dialami oleh kumparan sekunder karena merupakan fluks Bersama (mutasi fluks) (Aditya Prayoga, 2010). Dengan demikian fluks tersebut menginduksikan GGL induksi pada kumparan sekunder yang dapat dilihat pada gambar 2.7.



Gambar 2.7 Prinsip Kerja Transformator (Chapman, 2005)

2.6 Karakteristik Daya

Daya adalah perkalian antara tegangan yang diberikan dengan hasil arus yang mengalir (Ramdhani, 2008). Daya listrik dapat dibagi menjadi 3 macam yaitu,

1. Daya Aktif (P)

Daya ini sebenarnya adalah daya yang dipakai oleh komponen pasif resistor yang merupakan daya yang terpakai atau terserap. Kalau kita perhatikan *supply* dari PLN ke rumah-rumah maka daya yang tercatat pada alat kWh meter adalah daya rata-rata atau sering disebut juga sebagai daya nyata yang akan dibayarkan oleh

pelanggan dengan satuan watt (Ramdhani, 2008). Persamaan matematisnya adalah sebagai berikut,

www.itk.ac.id

sistem *line to neutral* 1 Fasa

$$P = V \cdot I \cdot \cos \theta \quad (2.1)$$

sistem *line to line* 3 Fasa

$$P = \sqrt{3} \cdot V \cdot I \cdot \cos \theta \quad (2.2)$$

di mana V adalah tegangan (volt), I adalah arus (ampere) dan $\cos \theta$ adalah faktor daya (John J. Grainger, 1994).

2. Daya Reaktif (Q)

Daya ini adalah daya yang muncul diakibatkan oleh komponen pasif diluar resistor yang merupakan daya rugi-rugi atau daya yang tidak diinginkan. Daya ini seminimal mungkin dihindari dan diharapkan bisa diperkecil, walaupun tidak akan hilang sama sekali dengan cara memperkecil faktor dayanya. Satuan dari daya reaktif adalah volt ampere reaktif (VAR) (Ramdhani, 2008). Persamaan matematisnya adalah sebagai berikut,

sistem *line to neutral* 1 Fasa

$$Q = V \cdot I \cdot \sin \theta \quad (2.3)$$

sistem *line to line* 3 Fasa

$$Q = \sqrt{3} \cdot V \cdot I \cdot \sin \theta \quad (2.4)$$

di mana V adalah tegangan (volt), I adalah arus (ampere) dan $\sin \theta$ adalah faktor daya (John J. Grainger, 1994).

3. Daya Kompleks (S)

Daya yang sebenarnya disupply oleh PLN, merupakan resultan daya antara daya aktif dengan satuan watt dan daya reaktif dengan satuan volt ampere (VAR).

Satuan dari daya kompleks adalah volt ampere (VA) (Ramdhani, 2008). Persamaan matematisnya adalah sebagai berikut.

$$S = P + jQ \quad (2.5)$$

sistem *line to neutral* 1 Fasa

$$S = V \cdot I \quad (2.6)$$

sistem *line to line* 3 Fasa

$$S = \sqrt{3} \cdot V \cdot I \quad (2.7)$$

di mana P adalah daya aktif, Q adalah daya reaktif, V adalah tegangan (volt) dan I adalah arus (ampere) (John J. Grainger, 1994).

Pada sistem 3 fasa tegangan *line to line* (V_{L-L}) adalah tegangan antar fasa. Oleh karena itu, tegangan fasa atau tegangan *line to neutral* (V_{L-N} / V_P) dapat dituliskan pada persamaan 2.8 berikut ini,

$$V_P = \frac{V_{L-L}}{\sqrt{3}} \quad (2.8)$$

sehingga dengan mensubstitusikan persamaan 2.8 ke persamaan 2.2, 2.4 dan 2.7, maka didapatkan persamaan berikut ini,

$$P = 3 \cdot V_P \cdot I \cdot \cos \theta \quad (2.9)$$

$$Q = 3 \cdot V_P \cdot I \cdot \sin \theta \quad (2.10)$$

$$S = 3 \cdot V_P \cdot I \quad (2.11)$$

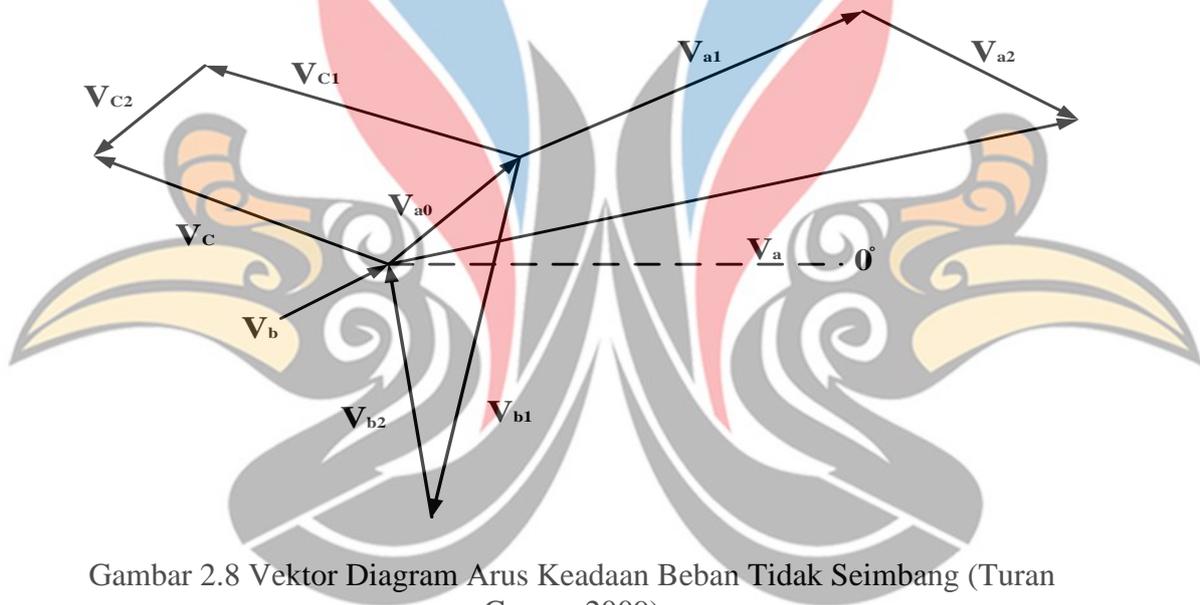
di mana P adalah daya aktif (watt), Q adalah daya reaktif (VAR), V adalah tegangan (volt) dan I adalah arus (ampere) pada sistem (John J. Grainger, 1994).

2.7 Beban Tidak Seimbang

Saluran 3 fasa tunggal dianggap tidak seimbang jika arus netral tidak nol. Ini terjadi ketika beban yang terhubung antara saluran fasa dan saluran netral besarnya tidak sama. Hasilnya adalah arus dan tegangan yang tidak simetris dan arus yang

bukan nol di jalur netral. Oleh karena itu, perhitungan yang dapat dilakukan dengan menggunakan metode komponen simetris (Turan Gonen, 2014). Pembebanan tidak seimbang ini terjadi pada transformator distribusi akibat karakteristik beban yang terhubung pada transformator berbeda-beda untuk ketiga fasanya. Gambar 2.8 merupakan gambar yang menunjukkan beban dikatakan dalam keadaan tidak seimbang yaitu ketika berada pada posisi,

1. Ketiga vektor sama besar tetapi tidak membentuk sudut 120° satu sama lain;
 2. Ketiga vektor tidak sama besar dan membentuk sudut 120° satu sama lain;
 3. Ketiga vektor tidak sama besar dan tidak membentuk sudut 120° satu sama lain
- (Wa Ode, 2018).



Gambar 2.8 Vektor Diagram Arus Keadaan Beban Tidak Seimbang (Turan Gonen, 2009)

Dalam sistem tenaga tiga fasa ideal, arus netral adalah jumlah vektor dari arus tiga fasa dengan nilai sama dengan nol. Besar arus netral (I_N) berpengaruh pada besar dari faktor ketidakseimbangan. Di bawah kondisi operasi normal, beberapa ketidakseimbangan fasa terjadi mengakibatkan arus netral kecil (Dey, 2013).

2.8 Persentase Ketidakseimbangan Beban

Pemakaian beban pada tiap fasa yang tidak seimbang adalah salah satu sebab mengapa ketidakseimbangan beban terjadi sehingga sangat mempengaruhi persentase tingkat ketidakseimbangan beban. Pada penyaluran daya dengan

keadaan tidak seimbang, besarnya arus tiap fasa dapat dinyatakan dengan koefisien a, b, dan c sebagai berikut,

$$|I_R| = a \cdot |I| \quad (2.12)$$

$$|I_S| = a \cdot |I| \quad (2.13)$$

$$|I_T| = a \cdot |I| \quad (2.14)$$

arus I_R , I_S , dan I_T berturut-turut adalah arus difasa R, S, dan T dan koefisien a, b dan c dapat diketahui besarnya, di mana besarnya arus fasa dalam keadaan seimbang sama dengan besarnya arus rata-rata (I_{rata}) sehingga dapat digunakan persamaan sebagai berikut,

$$I_R = a \cdot I_{Rata-rata} \quad (2.15)$$

$$I_S = b \cdot I_{Rata-rata} \quad (2.16)$$

$$I_T = c \cdot I_{Rata-rata} \quad (2.17)$$

$$I_{Rata-rata} = \frac{I_R + I_S + I_T}{3} \quad (2.18)$$

setelah didapatkan nilai koefisien a, b dan c pada persamaan di atas, maka dapat dilakukan perhitungan rata-rata ketidakseimbangan beban dalam persen (%) sebagai berikut,

$$\text{Ketidakseimbangan (\%)} = \frac{\{|a - 1| + |b - 1| + |c - 1|\}}{3} \times 100\% \quad (2.19)$$

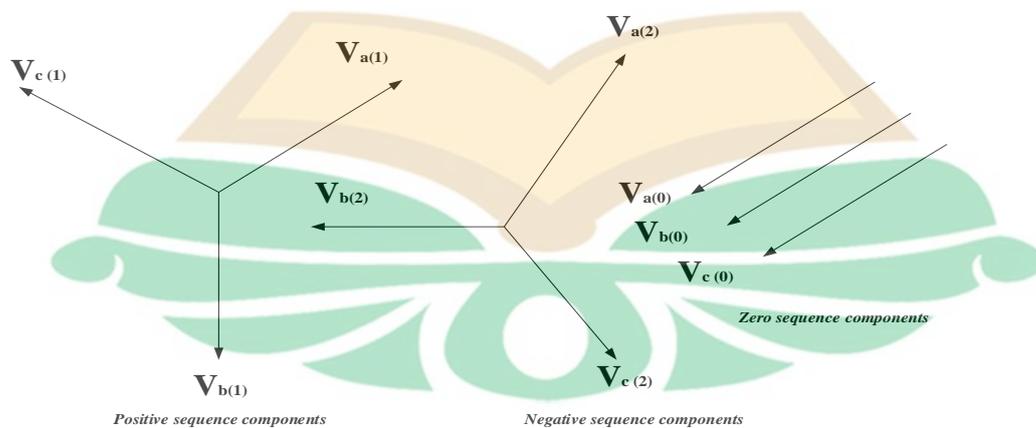
Sebuah transformator berada dalam keadaan seimbang, jika nilai koefisiensi a, b dan c adalah 1 (Susongko,2016). Ketidakseimbangan pembebanan disebabkan oleh beban antar fasa yang tidak seimbang. Baik akibat perbedaan beban antar fasa atau sifat beban dalam satu proses produksi yang membebani setiap fasa pada waktu yang berbeda, batasan ketidakseimbangan pembebanan rata-rata adalah maksimum 2 % (SPLN D5.004-1, 2012).

2.9 Komponen Simetris

Fortescue menyatakan tiga fasor tegangan tak seimbang dari sistem tiga fasa dapat diuraikan menjadi tiga fasa yang seimbang dengan menggunakan komponen simetris. Komponen simetris tersebut yaitu urutan positif, negatif dan urutan nol. Himpunan komponen seimbang tersebut adalah

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

Pemecahan masalah untuk komponen simetris dengan menggunakan koefisien pada ketiga fasa dapat dinyatakan sebagai a, b, dan c, maka urutan fasa untuk tegangan dan arus dalam sistem adalah abc. Untuk fasa komponen urutan positif dari fasor tidak seimbang adalah abc, sedangkan fasa dari urutan negatif adalah acb. Jika fasor aslinya adalah tegangan, maka tegangan tersebut dapat dinyatakan V_a , V_b , dan V_c . Komponen urutan positif untuk V_a , V_b , dan V_c adalah V_{a1} , V_{b1} , dan V_{c1} . Komponen urutan negatif adalah V_{a2} , V_{b2} , dan V_{c2} . Komponen urutan nol adalah V_{a0} , V_{b0} , dan V_{c0} yang ditunjukkan pada gambar 2.9.



Gambar 2.9 Representasi Komponen Simetris (John J. Grainger, 1994)

Tegangan tak seimbang setiap fasanya merupakan penjumlahan masing-masing komponen simetris yaitu,

tegangan fasa a,

$$V_a = V_{a1} + V_{a2} + V_{a0} \quad (2.20)$$

tegangan fasa b,

$$V_b = V_{b1} + V_{b2} + V_{b0} \quad (2.21)$$

tegangan fasa c,

$$V_c = V_{c1} + V_{c2} + V_{c0} \quad (2.22)$$

karena penerapan teori komponen simetris ke sistem tiga fase, dibutuhkan untuk unit phasor (atau operator) yang akan memutar phasor lain sebesar 120° secara berlawanan arah jarum jam. Operator tersebut adalah operator a. Besar dari operator tersebut adalah 1 sudut 120° (Turan Gonen, 2009). Berdasarkan persamaan di 2.20 sampai 2.22 dapat dibuat persamaan berdasarkan komponen V_a dengan fungsi operator a sehingga menghasilkan persamaan sebagai berikut,

$$V_{b0} = V_{a0} \quad V_{c0} = V_{a0} \quad (2.23)$$

$$V_{b1} = a^2 V_{a1} \quad V_{c1} = a V_{a1} \quad (2.24)$$

$$V_{b2} = a V_{a2} \quad V_{c2} = a^2 V_{a2} \quad (2.25)$$

dengan memasukkan persamaan 2.23 sampai 2.25 ke persamaan 2.20 sampai 2.22, maka menghasilkan persamaan berikut,

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

$$V_b = a^2 V_{a1} + a V_{a2} + V_{a0} \quad (2.27)$$

$$V_c = a V_{a1} + a^2 V_{a2} + V_{a0} \quad (2.28)$$

Berdasarkan persamaan 2.26, persamaan 2.27 dan persamaan 2.28 didapatkan hubungan antara komponen-komponen simetrisnya dan tegangan sistemnya

sehingga dapat ditulis pada persamaan 2.29, persamaan 2.30 dan persamaan 2.31 sebagai berikut,

www.itk.ac.id

$$V_{a1} = \frac{(V_a + aV_b + a^2V_c)}{3} \quad (2.29)$$

$$V_{a2} = \frac{(V_a + a^2V_b + aV_c)}{3} \quad (2.30)$$

$$V_{a0} = \frac{(V_a + V_b + V_c)}{3} \quad (2.31)$$

Dalam sistem tenaga listrik tidak terdapat komponen urutan nol jika suatu sistem seimbang. Pada sistem tiga fasa yang tidak seimbang, pada kabel netralnya dapat mengandung komponen urutan nol (John J. Grainger, 1994).

2.10 Arus Netral

Arus netral merupakan arus yang mengalir pada kawat netral pada transformator distribusi dengan sistem tegangan rendah tiga fasa empat kawat. Arus netral akan muncul ketika terjadi dua keadaan sebagai berikut,

1. Kondisi beban tidak seimbang;
2. Karena adanya arus harmonisa akibat beban *non-linear*.

Arus yang muncul merupakan arus bolak-balik untuk sistem tiga fasa empat kawat. Arus yang mengalir tersebut adalah penjumlahan dari ketiga arus fasa dalam komponen simetris (Antonov, 2017).

Jika suatu sistem tidak seimbang dari arus tiga fasa sistem tersebut, maka dapat digunakan metode komponen simetris. Dapat digunakan notasi-notasi seperti pada tegangan di persamaan, sebagaimana persamaan untuk arus-arus fasanya sebagai berikut (Hadi Saadat, 1999),

$$I_a = I_1 + I_2 + I_0 \quad (2.32)$$

$$I_b = a^2I_1 + aI_2 + I_0 \quad (2.33)$$

$$I_c = aI_1 + a^2I_2 + I_0 \quad (2.34)$$

www.itk.ac.id

Dalam menentukan tegangan urutan positif, urutan negatif, dan urutan nol dilakukan dengan tiga cara yang telah dijabarkan sebelumnya. Untuk menentukan komponen arus urutan positif, urutan negatif, dan urutan nol dapat digunakan cara seperti pada tegangan, berikut penjabaran dari arus-arus tersebut,

$$I_1 = \frac{(I_a + aI_b + a^2I_c)}{3} \quad (2.35)$$

$$I_2 = \frac{(I_a + a^2I_b + aI_c)}{3} \quad (2.36)$$

$$I_0 = \frac{(I_a + I_b + I_c)}{3} \quad (2.37)$$

Arus netral merupakan penjumlahan dari ketiga arus pada sistem, dapat dilihat bahwa I_0 (arus urutan nol) merupakan sepertiga dari penjumlahan arus pada sistem atau arus netral. Dalam sistem 3 fasa 4 kawat arus netral sama dengan jumlah arus saluran, maka dapat dilihat dari persamaan berikut,

$$I_N = I_a + I_b + I_c \quad (2.38)$$

$$I_N = 3I_0 \quad (2.39)$$

Jumlah arus dalam saluran sama dengan arus netral yang akan melewati kembali kawat netral (John J. Grainger, 1994). Jika sistem dikatakan seimbang di setiap arus fasanya maka arus netral akan bernilai nol. Sedangkan sistem tidak seimbang, maka akan ada arus yang mengalir di kawat netral sistem atau disebut memiliki nilai arus netral tersebut (Simamora, 2014).

2.11 Rugi pada Arus Netral

Losses atau rugi-rugi terjadi apabila terdapat aliran arus dari tiap-tiap fasa pada sisi sekunder transformator di netral transformator. Hal ini disebabkan oleh adanya ketidakseimbangan beban antara tiap-tiap fasa tersebut. Apabila hal ini tidak segera ditangani, maka bisa berakibat kerugian finansial maupun produksi listrik itu sendiri. Kerugian daya pada jaringan listrik adalah salah satu indikator terpenting operasi ekonomi dari perusahaan jaringan listrik dan juga mengubah

kondisi sistem pembacaan meter listrik serta efektivitas jaringan (Chembe, 2009). Sebagai akibat dari ketidakseimbangan beban antara tiap-tiap fasa pada sisi sekunder transformator (fasa R, fasa S, fasa T) mengalir arus di netral trafo. Arus yang mengalir pada penghantar netral trafo ini menyebabkan *losses* (rugi-rugi). *Losses* pada penghantar netral transformator ini dapat dirumuskan sebagai berikut,

$$P_N = I_N^2 \times R_N \quad (2.40)$$

di mana, P_N adalah *losses* pada penghantar netral trafo (watt), I_N adalah arus yang mengalir pada netral transformator (A) dan R_N adalah tahanan penghantar netral trafo (Ω). Daya aktif transformator dapat dirumuskan sebagai berikut,

$$P = S \times \cos \theta \quad (2.41)$$

di mana, P adalah daya aktif transformator (watt), S adalah daya semu transformator (VA) dan $\cos \theta$ adalah *power factor* dengan nilai 0,85 (asumsi). Setelah didapatkan nilai P_N dan P persamaan di atas, maka dapat dihitung presentase rugi-rugi daya akibat arus netral dalam persen (%) yaitu sebagai berikut,

$$\%P_N = \frac{P_N}{P} \times 100\% \quad (2.42)$$

di mana P_N adalah presentase rugi-rugi daya akibat adanya arus netral pada penghantar netral transformator (Prasetya, 2008).

2.12 Pembebanan Transformator

Pola pembebanan transformator distribusi hendaknya mengikuti ketentuan transformator sesuai SPLN (Standar PLN) no. 50: 1997, agar didapatkan susut yang minimal, maka pembebanan transformator maksimal sebesar 60% - 70% dari kapasitas trafo (PT PLN, 2010). Pembebanan suatu transformator dapat dihitung dengan persamaan 2.43 sebagai berikut,

$$\%kVA = \frac{\text{kVA Beban}}{\text{kVA Transformator}} \times 100\% \quad (2.43)$$

di mana %kVA adalah persentase pembebanan, kVA Beban adalah beban yang terpakai dan kVA transformator adalah kapasitas beban transformator sesuai *name plate* (Antonov, 2017).

2.13 Efisiensi Transformator

Transformator memiliki nilai efisiensi hasil perbandingan antara daya keluaran dan masukan. Persamaan 2.44 merupakan persamaan efisiensi transformator.

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100\% \quad (2.44)$$

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{out} + P_{loss}} \times 100\% \quad (2.45)$$

di mana P_{out} adalah daya yang keluar (watt) dan P_{loss} adalah daya dari rugi yang dihasilkan (watt) (Turan Gonen, 2014). Rugi yang ada pada trafo riil harus dipertimbangkan dalam membuat persamaan transformator adalah,

1. Rugi tembaga Cu (I^2R) yaitu rugi yang terjadi pada kumparan primer dan sekunder transformator;
2. Rugi arus eddy dan rugi histerisis, terjadi pada inti transformator;
3. Fluks bocor akan menghasilkan *self-inductance* pada kumparan primer dan kumparan sekunder, sehingga perlu diperhitungkan efek dari induktansi pada pemodelan transformator.

Berdasarkan rugi-rugi yang telah disebutkan di atas, maka rumus persamaan efisiensi transformator dapat dituliskan pada persamaan 2.21 berikut ini,

$$\eta = \frac{V_s \times I_s \times \cos \theta}{P_{cu} + P_{core} + V_s \times I_s \times \cos \theta} \times 100\% \quad (2.46)$$

di mana V_s dan I_s berturut-turut adalah tegangan keluaran (volt) dan arus keluaran (A), $\cos \theta$ adalah faktor daya, P_{cu} adalah rugi tembaga (kW) dan P_{Core} adalah rugi inti (Stephen J. Chapman, 2005).

Rugi besi dan rugi tembaga pada transformator yang diambil dari SPLN 50:1997 ditampilkan pada tabel 2.1.

Tabel 2.1 Standar Rugi Daya SPLN *)

Standar Rugi SPLN No. 50 1997				
No	Daya (kVA)	Rugi Besi (kW)	Rugi Tembaga Cu (kW)	Losses (%)
1	25	0,075	0,425	2,12
2	50	0,150	0,800	2,02
3	100	0,300	1,600	2,02
4	160	0,400	2,000	1,60
5	200	0,480	2,500	1,59
6	250	0,600	3,000	1,54
7	315	0,770	3,900	1,58
8	400	0,930	4,600	1,48
9	500	1,100	5,500	1,41
10	630	1,300	6,500	1,32
11	800	1,750	9,100	1,44
12	1000	2,300	12,100	1,53

*) PT PLN, 2010

Selain itu juga terdapat rugi yang disebabkan oleh arus netral (P_N) akibat adanya kondisi ketidakseimbangan, sehingga persamaan rugi-rugi transformator dapat ditulis sebagai berikut,

$$P_{losses} = P_N + P_{cu} + P_{Core} \quad (2.47)$$

dengan mesubstitusikan persamaan 2.47 ke persamaan 2.45, maka dapat dibuat persamaan 2.48 untuk nilai efisiensi sebagai berikut,

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{cu} + P_{core} + P_N + P_{out}} \times 100\% \quad (2.48)$$

di mana P_{out} adalah daya keluaran (kW), P_N adalah rugi arus netral (kW), P_{cu} adalah rugi tembaga (kW) dan P_{Core} adalah rugi inti (J. Ohoiwutun, 2019).

2.14 Metode All Reconnecting

Banyak transformator distribusi yang tingkat ketidakseimbangan bebannya cukup tinggi sehingga memerlukan metode penyeimbangan yang sederhana namun cukup efektif digunakan pada segmen pelanggan tertentu. Penyeimbangan beban

transformator dapat dilakukan secara intensif. Salah satunya adalah dengan “*All Reconnecting* “. *All reconnecting* dilakukan dengan merencanakan dan menetapkan ulang titik masukan/sambungan rumah (SR) dari seluruh pelanggan pada suatu gardu distribusi. Parameter/nilai yang digunakan untuk perencanaan dan penetapan tersebut adalah pemakaian kWh pelanggan perbulannya. Metode ini hanya bisa diterapkan pada gardu distribusi dengan segmen pelanggan yang sama, contohnya adalah gardu distribusi pada wilayah pedesaan, di mana rata-rata pelanggannya adalah rumah tangga (Tim Cop Distribusi, 2009).



www.itk.ac.id

2.15 Penelitian Terdahulu

Berikut adalah rangkuman hasil penelitian terdahulu yang memiliki keterkaitan dengan penelitian yang telah dilakukan.

Tabel 2.2 Penelitian Terdahulu

No	Nama dan Tahun Publikasi	Judul	Hasil
1	W. Susongko dkk, 2016	Analisis Ketidakseimbangan Beban pada Jaringan Distribusi Sekunder Gardu Distribusi DS 0587 di PT PLN (Persero) Disrtibusi Bali Rayon Denpasar	Ketidakseimbangan beban di JTR dan SR gardu distribusi DS 0587 telah menyebabkan tingginya nilai persentase ketidakseimbangan. Tingginya nilai persentase ketidakseimbangan disebabkan oleh perbedaan besarnya arus yang mengalir pada masing-masing fasa. Selain itu juga, ketidakseimbangan menyebabkan terjadinya rugi - rugi daya (<i>losses</i>).
2	Wa Ode Sitti Hajriani F.A. dkk, 2018	Evaluasi Pengaruh Ketidakseimbangan Beban Trafo Distribusi 20 kV Penyulang Toddopuli	Ketidakseimbangan beban akan menghasilkan arus di netral trafo sehingga arus yang mengalir di netral trafo ini menyebabkan terjadinya rugi-rugi. Nilai faktor ketidakseimbangan beban pada Penyulang Toddopuli adalah sebesar 0,14 yang mana ini masih dalam keadaan seimbang dan ditolerir. Rugi-rugi daya jaringan yang terjadi pada Penyulang Toddopuli adalah sebesar 415,70 kW dengan rugi-rugi daya pada penghantar netralnya sebesar 23,88 kW.

Tabel 2.2 Penelitian Terdahulu (Lanjutan)

No	Nama dan Tahun Publikasi	Judul	Hasil
3	Dwiyanto, Markus T. S., 2018	Analisis Pengaruh Ketidakseimbangan Beban Terhadap Arus Netral dan <i>Losses</i> pada Transformator Distribusi Di PT PLN (Persero) Area Sorong	Ketidakseimbangan beban pada transformator akan memunculkan arus di netral yang mengakibatkan <i>losses</i> pada transformator distribusi. Oleh karena itu, semakin besar arus netral transformator, maka <i>losses</i> atau rugi-rugi daya pada transformator semakin besar. Kemudian, setelah dilakukan penyeimbangan beban besar ketidakseimbangan dan arus netral mengalami penurunan menjadi 6,67% dan 0,99%.
4	Muhammad Zia K.P., 2020	Analisis Perbaikan Ketidakseimbangan Beban Transformator Sisi Sekunder Metode <i>All Reconnecting</i> pada Gardu Distribusi <i>Feeder</i> Haru 6 PT PLN (Persero) ULP Samarinda Seberang	Penyeimbangan metode <i>all reconnecting</i> dengan menerapkan konsep pemindahan beban dan penambahan transformator akan menurunkan besar arus netral rata-rata menjadi 0,0975 A dan 0,095 A, menurunkan persentase ketidakseimbangan rata-rata menjadi 1% dan rata-rata efisiensi naik menjadi 95%.

www.itk.ac.id



~ Halaman ini sengaja dikosongkan ~

www.itk.ac.id