

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Penelitian Terkait

Studi literatur melalui pengumpulan referensi dari buku-buku, penelitian sebelumnya, tinjauan pustaka terkait dan jurnal-jurnal yang bersumber dari internet yang terkait atau dapat mendukung teori penyelesaian penelitian “Analisis Ketidakseimbangan Beban dan *Losses* Berdasarkan Pembebanan Terbesar 3 Unit Transformator Distribusi 3 Fasa *Feeder* Hangtuah Duri Riau” ini. Jurnal-jurnal tersebut meliputi tinjauan pustaka terkait dalam penelitian ini seperti berikut ini:

Pengaruh Ketidakseimbangan Beban Terhadap Arus Netral dan *Losses* pada Trafo Distribusi, dalam jurnal ini membahas tentang analisis ketidakseimbangan beban terhadap arus netral pada transformator distribusi serta *losses* akibat adanya arus netral pada penghantar netral dan *losses* akibat adanya arus netral mengalir ke tanah yang dilakukan di PT. PLN (Persero) Jawa Timur dengan metode komponen simetris. Setelah dianalisa, maka terjadi ketidakseimbangan beban sebesar 28,67% pada siang hari dan pada malam hari sebesar 26,00%, maka arus netral yang muncul akibat ketidakseimbangan beban pada siang hari dengan nilai yang lebih besar daripada malam hari sebesar 118,6A dan malam hari sebesar 131,7 A, dan *losses* akibat arus netral yang mengalir pada penghantar netral pada siang hari sebesar 5,66% sedangkan pada malam hari 6,98%. [3]

Audit Energi Untuk Efisiensi Pemakaian Energi Listrik, dalam jurnal penelitian ini membahas tentang upaya peningkatan efisiensi penggunaan energi listrik berdasarkan data ketidakseimbangan beban. Dalam jurnal ini dipaparkan besar persen ketidakseimbangan beban transformator distribusi berdasarkan standar IEC yaitu sebesar 5%. [2]

Analisa Ketidakseimbangan Beban Transformator Distribusi Untuk Identifikasi Beban Lebih dan Estimasi Rugi-rugi Pada Jaringan Tegangan Rendah, jurnal penelitian ini membahas tentang pengaruh ketidakseimbangan beban terhadap arus netral, analisa rugi-rugi tegangan rendah, dan identifikasi beban lebih menggunakan program ETAP. Dalam penelitian identifikasi beban lebih dilakukan identifikasi sepanjang feeder KI 02 dengan hasil penelitian terdapat 3 transformator distribusi yang berbeban lebih yaitu ML 059, ML354, dan ML425. Sedangkan ketidakseimbangan beban hanya diteliti satu

transformator distribusi yaitu ML 059 dengan ketidakseimbangan beban yang terbesar saat malam hari sebesar 7% dan losses berdasarkan simulasi etap 1 kW dan 13 kVA. [5]

Studi Analisis Rugi-Rugi Daya pada Penghantar Netral Akibat Sistem Tidak Seimbang di Jaringan Distribusi Gardu KA 1495 Penyulang Citraland Menggunakan Simulasi Program ETAP 7.0, jurnal ini membahas perbedaan antara ketidakseimbangan beban dengan metode komponen simetris dan hasil simulasi ETAP. Dari kedua metode ini menghasilkan perhitungan yang tidak jauh berbeda satu sama lain nya. Ketidakseimbangan beban menggunakan komponen simetris sebesar 55.62 % sedangkan dengan simulasi ETAP ketidakseimbangan beban yang dihasilkan sebesar 55.07%. Rugi-rugi dari ketidakseimbangan beban ini dengan perhitungan manual sebesar 56.51 watt sedangkan dengan menggunakan simulasi ETAP sebesar 56.93 watt. Selisih dari kedua cara perhitungan ketidakseimbangan beban dan rugi-rugi relatif kecil. [6]

Pengaruh Ketidakseimbangan Beban Terhadap Arus Netral dan Losses pada Trafo Distribusi Proyek Rusunawi Gading Icon, penelitian ini membahas ketidakseimbangan beban yang terjadi pada trafo distribusi Rusunawi Gading Icon dengan hasil ketidakseimbangan beban yang besar pada siang hari 28.67 % dan pada malam hari 26 % yang mempengaruhi rugi-rugi atau *losses* pada trafo serta perbedaan hasil *losses* antara kawat *incoming* dan *outgoing*. [7]

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan sebelumnya peneliti membahas ketidakseimbangan beban pada transformator distribusi dengan menggunakan metode komponen simetris sedangkan untuk pemilihan objek yang diteliti peneliti hanya mengambil satu transformator distribusi. Pada penelitian ini peneliti akan mencari ketidakseimbangan beban pada transformator distribusi dengan metode komponen simetris menggunakan data hasil pengukuran tarfo dan juga menggunakan simulasi ETAP 12.6.0. Sedangkan untuk transformator distribusi yang akan diteliti peneliti mengambil 3 unit trafo pada *feeder* Hangtuah PT. PLN (Persero) Rayon Duri. Pengambilan 3 unit trafo agar dapat mewakili ketidakseimbangan beban pada *feeder* tersebut dan pemilihan trafo diambil berdasarkan pembebanan trafo yang terbesar pada *feeder* Hangtuah PT. PLN (Persero) Rayon Duri. Peneliti juga akan mengidentifikasi beban lebih setiap fasa pada transformator distribusi serta besar *losses* yang muncul.

2.2. Landasan Teori

2.2.1. Transformator

Transformator merupakan suatu alat listrik yang dapat mengubah tegangan arus bolak-balik dari suatu tingkat ke tingkat yang lain melalui suatu gandengan magnet dan berdasarkan prinsip-prinsip induksi elektromagnet. [3]

Transformator terdiri dari sebuah inti dari besi berlapis dan terdapat dua buah kumparan yaitu kumparan primer dan kumparan sekunder. Penggunaan transformator yang handal dan sederhana hal ini memudahkan dipilihnya tegangan yang sesuai tergantung kebutuhan. salah satu yang menjadi penting yaitu penggunaan arus bolak-balik yang sangat banyak baik untuk pembangkit sampai dengan penyaluran tenaga listrik.

Prinsip kerja dari transformator adalah berdasarkan hukum Ampere dan Faraday, yaitu: arus listrik dapat menimbulkan medan magnet dan medan magnet juga dapat menimbulkan arus listrik. Jika pada kumparan transformator diberi arus bolak-balik maka jumlah garis gaya magnet berubah-ubah. Maka akan terjadi induksi disisi primer. Sisi sekunder akan menerima garis gaya magnet dari sisi primer dengan jumlah yang berubah-ubah. Kemudian di sisi sekunder akan timbul juga induksi, akibatnya antara dua ujung terdapat beda tegangan. [3]

Dengan demikian maka saluran-saluran transmisi tenaga listrik senantiasa mempergunakan tegangan yang tinggi. Hal ini dilakukan terutama untuk mengurangi kerugian energi yang terjadi, dengan cara mempergunakan transformator untuk menaikkan tegangan listrik di pusat pembangkit dari tegangan generator yang pada awal transmisi biasanya sebesar 6 kV – 20 kV kemudian tegangan saluran transmisi berikutnya antara 100 kV – 1000 kV, kemudian diturunkan pada ujung terakhir saluran menjadi tegangan yang lebih rendah. [3]

2.2.2. Jaringan Sistem Distribusi Sekunder [8]

Sistem distribusi sekunder sebagai penyaluran tenaga listrik dari gardu distribusi sampai ke beban yang ada pada konsumen. Sistem radial merupakan sistem yang banyak digunakan pada sistem distribusi sekunder. Sistem ini bisa disebut sistem dengan tegangan rendah yang langsung terhubung ke konsumen/pemakai tenaga listrik melalui beberapa peralatan sebagai berikut:

1. Papan pembagi pada trafo distribusi.
2. Hantaran tegangan rendah (saluran distribusi sekunder).
3. Saluran Layanan Pelanggan (SLP) (ke konsumen/pemakai).

4. Alat Pembatas dan pengukur daya (kWH. meter) serta fuse atau pengaman pada pelanggan.

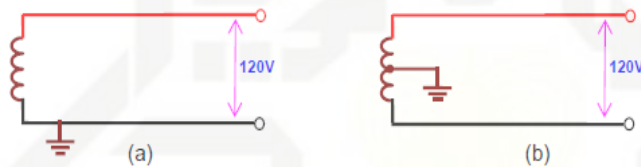
Ada bermacam-macam sistem tegangan distribusi sekunder menurut standar:

1. EEI: Edison Electric Institut,
2. NEMA (National Electrical Manufactures Association).

Ditinjau dari cara pengawatannya, saluran distribusi AC dibedakan atas beberapa macam tipe, dan cara pengawatan ini bergantung pula pada jumlah fasanya.

1. Sistem distribusi satu fasa dengan dua kawat [8]

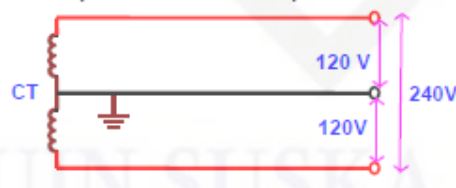
Tipe yang paling sederhana yang biasanya untuk penyaluran daya berkapasitas kecil dengan jarak yang pendek. Seperti di daerah perumahan ataupun pedesaan. Tipe ini terbagi dua menurut dari sisi sekunder transformator distribusi, seperti gambar dibawah ini:



Gambar 2.1. Sistem satu fasa dua kawat tegangan 120 volt [8]

2. Sistem distribusi satu fasa dengan tiga kawat [8]

Prinsip dari tipe ini seperti sistem distribusi DC tiga kawat, yang terdapat dua alternatif besar tegangan. Untuk saluran netral dihubungkan pada belitan yang di tengah sisi sekunder trafo, dan ditanahkan untuk pengaman. Tipe ini untuk penyaluran daya kapasitas kecil jarak pendek seperti daerah desa atau perumahan.

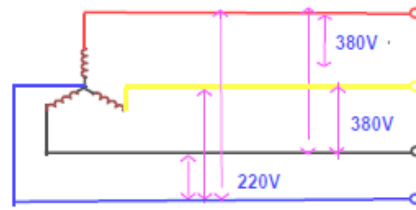


Gambar 2.2. Sistem satu fasa tiga kawat tegangan 120/240 volt [8]

3. Sistem distribusi tiga fasa dengan empat kawat [8]

Tipe ini untuk melayani penyalur daya berkapasitas sedang dengan jarak pendek, yaitu daerah perumahan pedesaan dan perdagangan ringan, dimana terdapat beban 3 fasa. Pada tipe ini, sisi sekunder (output) trafo distribusi terhubung star, dimana saluran netral diambil dari titik bintangnya. Seperti halnya pada sistem tiga fasa yang lain, di sini perlu

diperhatikan keseimbangan beban antara ketiga fasanya, dan disini terdapat dua alternatif besar tegangan.



Gambar 2.3. Sistem tiga fasa empat kawat tegangan 220/380 volt [8]

2.2.3. Pembebanan Pada Transformator Distribusi

Perbedaan antara beban puncak dengan bukan beban puncak di Indonesia mengalami fluktuasi yang sangat tajam. Jika dilihat dari segi efisiensi trafo kurang baik saat terjadi beban sangat rendah, jika penyediaan kapasitas trafo didasarkan pada beban puncak dari segi ekonomi menjadi kurang efisien. Sebab akan terjadi saat beban rendah akan di layani dengan kapasitas trafo yang besar. Beban transformator distribusi tergantung dari sifat dan jenis beban seperti berikut: [9]

1. Sifat beban untuk pelanggan rumah tangga: beban puncak pada malam hari lebih besar dari beban puncak siang hari.
2. Sifat beban untuk pelanggan rumah industri: beban puncak pada malam hari lebih rendah dari beban puncak siang hari.

Pada dasarnya suatu transformator dapat diizinkan bekerja pada beban lebih dalam waktu yang singkat. Sebelum melakukan pembebanan lebih sebaiknya di perhatikan *design*, kenaikan temperaturnya, lama beban lebih dan peralatan lainnya.

Mengenai pembebanan lebih pada transformator distribusi khususnya daerah operasi. Tidak semua transformator distribusi yang terkena pembebanan lebih. Ada juga yang beban nya underload dibawah 50% dari kapasitas transformator distribusi. [9]

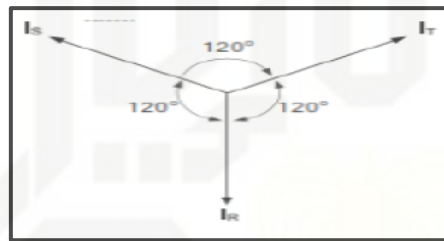
Pembebanan yang tidak pernah melebihi pembebanan transformator biasanya berada di daerah yang dipadatkan beban rendahnya dikarenakan kepadatan penduduk yang rendah pula. Pembebanan lebih dari kapasitas transformator tetapi pembebanan sebelumnya rendah. Hal ini diperbolehkan hanya untuk waktu yang singkat pembebanan lebih.

2.2.4. Ketidakseimbangan Beban

Pasokan listrik menjadi bagian penting dalam kehidupan manusia. Kebutuhan pasokan listrik dibutuhkan bagi masyarakat perumahan maupun industri. Pertumbuhan penduduk yang semakin meningkat dan tidak merata penyebarannya akan menyebabkan pendistribusian tenaga listrik menjadi tidak merata pada setiap penghantar fasa.

Adapun keadaan seimbang pada beban adalah suatu keadaan dimana: [5]

1. Ketiga vektor arus / tegangan adalah sama besar
2. Ketiga vektor saling membentuk sudut 120° satu sama lain, seperti yang terlihat pada Gambar 2.4 di bawah ini :



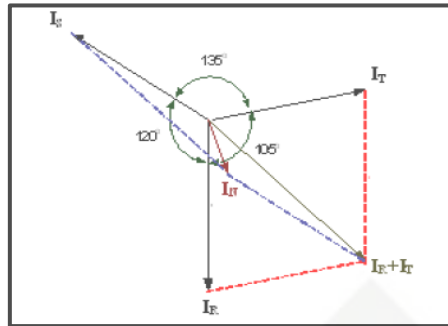
Gambar 2.4. Vektor Diagram Arus Keadaan Seimbang [7]

Terlihat dari gambar diatas, dalam keadaan seimbang vektor arus seperti pada gambar. Penjumlahan dari ketiga vektor arus I_R , I_S , dan I_T sama dengan nol maka arus netral pada transformator tidak muncul.

Sedangkan yang dimaksud dengan keadaan tidak seimbang adalah keadaan dimana salah satu atau kedua syarat keadaan setimbang tidak terpenuhi. Kemungkinan keadaan tidak seimbang ada tiga yaitu: [5]

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° satu sama lain.

Seperti yang terlihat pada Gambar 2.5 di bawah ini :



Gambar 2.5. Vektor Diagram Arus Keadaan Tidak Seimbang [7]

Terlihat dari gambar diatas, dalam keadaan tidak seimbang vektor arus seperti pada gambar. Penjumlahan dari ketiga vektor arus I_R , I_S , dan I_T tidak sama dengan nol maka arus netral pada transformator akan muncul berpengaruh dari besar ketidakseimbangannya.

2.2.5. Metode Komponen Simetris

Penelitian ketidakseimbangan beban pada transformator distribusi ini menggunakan metode komponen simetris. Berdasarkan jurnal dan buku yang didapat metode komponen simetris merupakan metode yang memperlihatkan kondisi beban trafo berdasarkan fasa R, S, dan T dalam keadaan seimbang atau tidak seimbang. Sehingga metode komponen simetris dapat digunakan dalam menyelesaikan permasalahan ketidakseimbangan beban pada trafo karena belum ditemukan metode lain untuk menyelesaikan permasalahan ketidakseimbangan beban trafo.

Beban tidak seimbang pada sistem distribusi tegangan rendah akan mengakibatkan arus mengalir pada kawat netral pada transformator arus. Arus yang mengalir adalah arus bolak-balik pada sistem 3 fasa 4 kawat. Arus yang mengalir pada sistem 3 fasa 4 kawat tersebut merupakan penjumlahan dari ketiga vektor arus setiap fasa dalam komponen simetris.

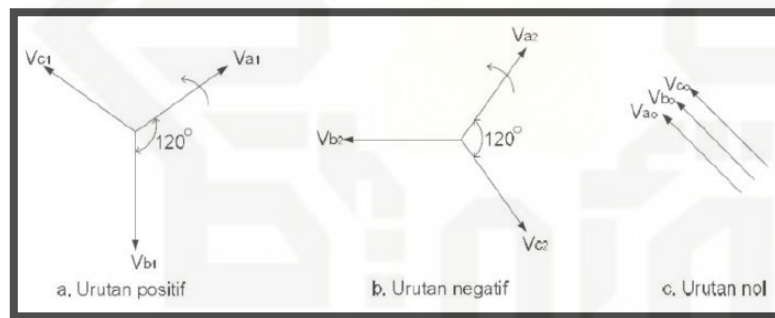
Menurut Fortescue yang menyatakan tiga fasor tegangan tak seimbang dari sistem tiga fasa dapat diuraikan menjadi tiga fasa yang seimbang dengan menggunakan komponen simetris. Komponen simetris tersebut yaitu urutan positif, negatif dan urutan nol. Himpunan komponen seimbang tersebut antara lain: [10]

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} . Gambar 2.6 merupakan tiga himpunan komponen simetris. [11]



Gambar 2.6. Representasi Komponen Simetris [10]

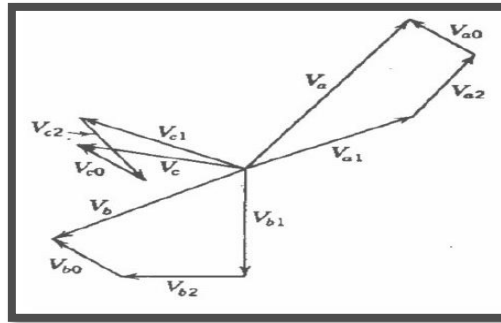
Tegangan tak seimbang setiap fasanya merupakan penjumlahan masing-masing komponen simetris yaitu: [7]

$$\text{Tegangan fasa a, } V_a = V_{a1} + V_{a2} + V_{a0} \quad (2.1)$$

$$\text{Tegangan fasa b, } V_b = V_{b1} + V_{b2} + V_{b0} \quad (2.2)$$

$$\text{Tegangan fasa c, } V_c = V_{c1} + V_{c2} + V_{c0} \quad (2.3)$$

Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang
 1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber;
 a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.



Gambar 2.7. Penjumlahan Komponen-komponen [10]

Dari Gambar 2.7 diatas, didapatkan hubungan antara komponen-komponen simetrisnya, yaitu: [10]

$$V_{b1} = a^2 V_{a1} \qquad V_{c1} = a V_{a1} \qquad (2.4)$$

$$V_{b2} = a V_{a2} \qquad V_{c2} = a^2 V_{a2} \qquad (2.5)$$

$$V_{b0} = V_{a0} \qquad V_{c0} = V_{a0} \qquad (2.6)$$

Berdasarkan persamaan diatas (2.4), (2.5), dan (2.6), maka persamaan (2.1), (2.2), dan (2.3) menjadi: [10]

$$V_a = V_{a1} + V_{a2} + V_{a0} \qquad (2.7)$$

$$V_b = a^2 V_{a1} + a V_{a2} + V_{a0} \qquad (2.8)$$

$$V_c = a V_{a1} + a^2 V_{a2} + V_{a0} \qquad (2.9)$$

Sehingga hubungan antara komponen-komponen simetrisnya dan tegangan sistemnya dapat ditulis sebagai berikut: [10]

$$V_{a0} = \frac{1}{3} (V_a + V_b + V_c) \qquad (2.10)$$

$$V_{a1} = \frac{1}{3} (V_a + a V_b + a^2 V_c) \qquad (2.11)$$

$$V_{a2} = \frac{1}{3} (V_a + a^2 V_b + a V_c) \qquad (2.12)$$

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. Persamaan tegangan tersebut berlaku juga pada persamaan arusnya.

2.2.6. 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: [7]

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.

2.2.7. Arus Netral Karena Beban Tidak Seimbang

Jika suatu sistem tidak seimbang dari arus tiga fasa sistem tersebut, maka dapat digunakan metode komponen simetris. Dapat digunakan notasi-notasi seperti pada tegangan, sebagaimana persamaan untuk arus-arus fasanya sebagai berikut: [5]

$$I_a = I_1 + I_2 + I_0 \tag{2.13}$$

$$I_b = a^2 I_1 + a I_2 + I_0 \tag{2.14}$$

$$I_c = a I_1 + a^2 I_2 + I_0 \tag{2.15}$$

Dimana:

I_a = Arus urutan a pada vektor

I_b = Arus urutan b pada vektor

I_c = Arus urutan c pada vektor

Dalam menentukan tegangan urutan positif, urutan negatif, dan urutan nol 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: [5]

$$I_1 = 1/3 (I_a + a I_b + a^2 I_c) \tag{2.16}$$

$$I_2 = 1/3 (I_a + a^2 I_b + a I_c) \tag{2.17}$$

$$I_0 = 1/3 (I_a + I_b + I_c) \tag{2.18}$$

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. Hasil penjumlahan ini akan menjadi nol dalam sistem tiga fasa empat kawat.

Dalam sistem 3 fasa 4 kawat arus netral sama dengan jumlah arus saluran, maka dapat dilihat dari persamaan berikut: [5]

$$I_N = I_a + I_b + I_c \tag{2.19}$$

$$I_N = 3I_0 \tag{2.20}$$

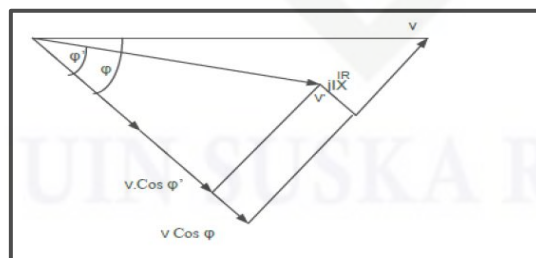
Jumlah arus dalam saluran sama dengan arus netral yang akan melewati kembali kawat netral. Jika sistem dikatakan seimbang setiap arus fasanya maka arus netral akan bernilai nol. Sedangkan sistem tidak seimbang, maka akan ada arus yang mengalir di kawat netral sistem atau disebut memiliki nilai arus netral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

2.2.8. Penyaluran dan Susut Daya pada Keadaan Arus Seimbang [7]

Jika diketahui daya sebesar P melewati saluran dengan penghantar netral. Apabila dalam penyaluran daya setiap arus fasa dalam keadaan seimbang, besarnya daya dapat dicari dengan persamaan berikut:

$$P = 3 [V] [I] \cos \phi \tag{2.21}$$

Penyusutan daya pada saluran akan terjadi jika daya yang berada diujung terima lebih kecil dari besar daya P . Pada Gambar 2.8 berikut penyusutan daya dapat terlihat menggunakan diagram fasor tegangan saluran.



Gambar 2.8. Diagram Fasa Tegangan Saluran Daya Model Fasa Tunggal [7]

Diagram diatas merupakan asumsi pemusatan kapasitif yang kecil sehingga bisa diabaikan. Oleh karena itu besar dari arus ujung kirim sama dengan arus uju terima. Jika tegangan dinotasikan V' dan faktor daya pada ujung terima ϕ' , maka persamaan untuk daya ujung terima, yaitu:

$$P' = 3 [V'] [I] \cos \phi' \quad (2.22)$$

Selisih antara P pada persamaan (4.10) dan P' pada persamaan (4.11) memberikan susut daya saluran, yaitu :

$$P_1 = P - P' \quad (2.23)$$

$$= 3 [V] [I] \cos \phi - 3 [V'] [I] \cos \phi' \quad (2.24)$$

$$= 3 [I] \{ [V] \cos \phi - [V'] \cos \phi' \} \quad (2.25)$$

Dimana:

P_1 = Susut daya saluran (Watt)

P = Daya pada ujung pengirim (Watt)

P' = Daya pada ujung terima (Watt)

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

$$P_1 = 3 [I] R \quad (2.26)$$

2.2.9. Penyaluran dan Susut Daya pada Keadaan Arus Tidak Seimbang [5]

Dalam penyaluran daya yang sama tapi tidak dalam keadaan seimbang, maka besar dari arus-arus fasa dinyatakan dalam koefisien a, b, dan c. Jika diketahui besaran arus fasa (I) dan daya (P) dalam keadaan seimbang.

$$[I_R] = a [I] \quad (2.27)$$

$$[I_S] = b [I] \quad (2.28)$$

$$[I_T] = c [I] \quad (2.29)$$

Walaupun besar dari arus setiap fasa berbeda tetapi faktor daya dari ketiga fasa R, S, dan T dianggap sama. Dengan ini besar daya yang disalurkan sebagai berikut:

$$P = 3 (a + b + c) [I] \cos \phi \quad (2.30)$$

Apabila persamaan (2.24) dan persamaan $I_N = 3I_{a0}$ menyatakan daya yang besarnya sama, maka dari kedua persamaan tersebut dapat diperoleh persyaratan koefisien a, b, dan c adalah

$$a + b + c = 3 \quad (2.31)$$

2.2.10. ETAP (*Electric Transient and Analysis Program*) [15]

ETAP (*Electric Transient and Analysis Program*) merupakan perangkat lunak untuk simulasi sistem tenaga listrik. *Software* ini dapat bekerja dalam keadaan *offline* untuk simulasi tenaga listrik, untuk pengelolaan data *real-time* secara *online* atau digunakan untuk mengendalikan sistem secara *real-time*. Fitur yang terdapat dalam ETAP 12.6.0 bermacam-macam yang dapat digunakan untuk menganalisa pembangkit tenaga listrik, sistem transmisi maupun sistem distribusi tenaga listrik.

Analisa tenaga listrik yang dapat dilakukan ETAP 12.6.0 sebagai berikut:

1. Analisa aliran daya (*Load Flow Analysis*)
2. Analisa hubung singkat (*Short Sircuit Analysis*)
3. *Arc Flash Analysis*
4. *Unbalanced Load Flow Analysis*
4. *Optimal Power Flow Analysis*, dll.

Dalam menganalisa sistem tenaga listrik, suatu diagram saluran tunggal (*single line diagram*) merupakan notasi yang disederhanakan untuk sebuah sistem tenaga listrik tiga fasa. Sebagai ganti dari representasi saluran tiga fasa yang terpisah, digunakanlah sebuah konduktor. Hal ini memudahkan dalam pembacaan diagram maupun dalam analisa rangkaian. Elemen elektrik seperti misalnya pemutus rangkaian, transformator, kapasitor, busbar maupun konduktor lain dapat ditunjukkan dengan menggunakan simbol yang telah distandardisasi untuk diagram saluran tunggal. Elemen pada diagram tidak mewakili ukuran fisik atau lokasi dari peralatan listrik, tetapi merupakan konvensi umum untuk mengatur diagram dengan urutan kiri-ke-kanan yang sama, atas-ke-bawah.

ETAP memiliki 2 macam standar yang digunakan untuk melakukan analisa kelistrikan, ANSI dan IEC. Pada dasarnya perbedaan yang terjadi di antara kedua standar tersebut adalah frekuensi yang digunakan, yang berakibat pada perbedaan spesifikasi peralatan yang sesuai dengan frekuensi tersebut. Pada penelitian ini digunakan standar IEC dengan frekuensi 50 Hz. Simbol elemen listrik yang digunakan dalam analisa dengan menggunakan ETAP pun berbeda.

Beberapa hal yang perlu diperhatikan dalam bekerja dengan ETAP Power Station adalah :

1. One Line Diagram, menunjukkan hubungan antar komponen/peralatan listrik sehingga membentuk suatu sistem kelistrikan.

2. Library, informasi mengenai semua peralatan yang akan dipakai dalam sistem kelistrikan. Data elektris maupun mekanis dari peralatan yang detail/lengkap dapat mempermudah dan memperbaiki hasil simulasi/analisa.
3. Standar yang dipakai, biasanya mengacu pada standar IEC atau ANSII, frekuensi sistem dan metode – metode yang dipakai.
4. Study Case, berisikan parameter – parameter yang berhubungan dengan metode studi yang akan dilakukan dan format hasil analisa.

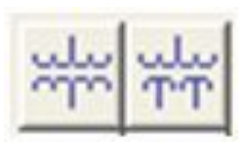
Komponen elemen AC pada *software* ETAP dalam bentuk diagram satu garis ditunjukkan pada Gambar, kecuali elemen-elemen IDs, penghubung bus dan status. Semua data elemen AC dimasukkan dalam editor yang telah dipertimbangkan oleh para ahli teknik. Daftar seluruh elemen *ac* pada *software* ETAP ada pada *AC toolbar*.



Gambar. 2.9. Elemen-elemen AC di ETAP [15]

1. Transformator

Transformator 2 kawat sistem distribusi dimasukkan dalam *editor power station software* transformator 2 kawat pada *power station software* ETAP ditunjukkan pada gambar dibawah ini.



Gambar 2.10. Simbol transformator 2 kawat di ETAP [15]

2. Load

Beban listrik sistem distribusi tenaga listrik dimasukkan dalam *editor* berupa rated kV dan MVA yang ditampilkan pada bagian atas informasi editor load. ETAP terdapat dua macam beban, yaitu beban statis dan beban dinamis. Simbol generator sinkron *power station software* ETAP ditunjukkan dibawah ini.



Gambar 2.11 Simbol beban statis dan dinamis di ETAP [15]

3. Pemutus Rangkaian

Merupakan sebuah saklar otomatis yang dirancang untuk melindungi sebuah rangkaian listrik dari kerusakan yang disebabkan oleh kelebihan beban atau hubungan pendek. Simbol pemutus rangkaian di ETAP ditunjukkan pada gambar.



Gambar 2.12. Simbol pemutus rangkaian di ETAP [15]

4. Bus

Bus AC atau *node* sistem distribusi tenaga listrik dimasukkan dalam *editor power station software* ETAP. Editor bus sangat membantu untuk pemodelan berbagai tipe bus dalam sistem tenaga listrik. Generator, motor dan beban statik adalah elemen yang dapat dihubungkan dengan beberapa bus yang diinginkan. Simbol bus pada *power station software* ETAP ditunjukkan Gambar.



Gambar 2.13. Simbol bus di ETAP [15]

2.2.11. Perhitungan Pembebanan Transformator Distribusi

Pembebanan transformator distribusi yang melebihi *standard* pembebanan trafo sebesar 80% akan membuat tidak handal nya transformator bekerja. [4]

Oleh sebab itu dibutuhkan analisa persen pembebanan transformator distribusi dengan melakukan perhitungan sebagai berikut:

1. Terlebih dahulu mencari arus *full load* dengan menggunakan parameter tegangan dan daya terpasang pada transformator. Dengan rumus yaitu:

$$I_{FL} = \frac{S}{\sqrt{3} \times V} \quad (2.32)$$

2. Setelah didapatkan arus *full load* maka dicari arus rata-rata dan persen pembebanannya.

$$I_{rata-rata} = \frac{I_R + I_S + I_T}{3} \quad (2.33)$$

$$\% = \frac{I_{rata-rata}}{I_{FL}} \times 100\% \quad (2.34)$$

2.2.12. Perhitungan Ketidakseimbangan Beban [3]

Untuk mencari persen ketidakseimbangan beban dapat dicari dengan menggunakan koefisien a, b, dan c. Dimana koefisien a, b, dan c memerlukan arus setiap fasa dan arus rata-rata. Maka diperoleh persamaan untuk koefisien a, b, dan c sebagai berikut:

$$a = \frac{I_R}{I_{rata-rata}} \quad (2.35)$$

$$b = \frac{I_S}{I_{rata-rata}} \quad (2.36)$$

$$c = \frac{I_T}{I_{rata-rata}} \quad (2.37)$$

Dimana:

I_R = Arus pada fasa R (Ampere)

I_S = Arus pada fasa S (Ampere)

I_T = Arus pada fasa T (Ampere)

Dalam keadaan seimbang, besarnya koefisien a, b dan c sama dengan 1. Maka persamaan persen ketidakseimbangan beban (dalam %) adalah :

$$\% = \frac{\{|a-1|+|b-1|+|c-1|\}}{3} \times 100\% \quad (2.38)$$

2.2.13. Perhitungan *Losses* (rugi-rugi) Akibat Adanya Arus Netral Pada Penghantar Netral dan Arus Netral yang Mengalir ke Tanah [3]

Ketidakseimbangan beban akan mengakibatkan muncul arus di netral transformator pada setia fasa R, S, dan T. Arus netral yang muncul akan mengakibatkan adanya rugi-rugi (*losses*) pada sistem.

1. *Losses* Akibat Adanya Arus Netral Pada Penghantar Netral

Arus yang mengalir pada penghantar netral trafo ini menyebabkan *losses* (rugi-rugi). Dan *losses* pada penghantar netral dapat dirumuskan sebagai berikut :

$$P_N = I_N^2 \cdot R_N \quad (2.39)$$

Keterangan:

P_N = *Losses* yang timbul pada penghantar netral (*watt*)

I_N = Arus yang mengalir melalui kawat netral (*Ampere*)

R_N = Tahanan pada kawat netral (Ω)

2. *Losses* Akibat Arus Netral yang Mengalir ke Tanah

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

$$P_G = I_G^2 \cdot R_G \quad (2.40)$$

Keterangan:

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

I_G = Arus netral yang mengalir ke tanah (*Ampere*)

R_G = Tahanan pembumian netral trafo (Ω)