

BAB I PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Sistem distribusi memiliki peranan penting dalam sistem tenaga listrik. Hal itu disebabkan karena sistem ini langsung berhubungan dengan pemakai energi listrik pelanggan di saluran tegangan menengah dan tegangan rendah. Sistem distribusi sendiri memiliki fungsi diantaranya yaitu menerima daya listrik dari sumber daya juga mendistribusikan daya tersebut ke konsumen. Gardu distribusi merupakan salah satu komponen dari suatu sistem distribusi tenaga listrik. Dalam gardu distribusi ini biasanya digunakan transformator distribusi yang berfungsi untuk menurunkan tegangan listrik dari jaringan distribusi tegangan tinggi menjadi tegangan terpakai pada jaringan distribusi tegangan rendah (*step down transformer*); misalkan tegangan 20 kV menjadi tegangan 400 Volt atau 220 Volt. Transformator akan bekerja secara kontinyu apabila transformator tersebut berada pada beban nominalnya. Namun, apabila beban yang dilayani mendekati 100% bahkan lebih besar dari 100%, maka transformator tersebut akan mendapat pemanasan lebih dan dapat memperpendek umur isolasinya. Transformator mempunyai batasan-batasan dalam operasinya. Apabila transformator digunakan secara terus-menerus dalam kondisi *overload*, maka akan mengalami peningkatan pada suhu dan panas pada transformator pun bertambah. Sehingga akan merusak isolasi, material dan transformator akan rusak. Selain itu, mempengaruhi kualitas daya transformator, drop tegangan pada ujung jaringan dan berakibat susut umur pada transformator.

Menurut SPLN No. 50 Tahun 1997 transformator dikatakan *overload* jika kapasitas pembebanannya lebih dari 80%. Selain hal tersebut *overload* pada transformator distribusi juga dapat menyebabkan terjadinya *drop voltage* (tegangan jatuh). Terdapat dua metode alternatif untuk mengatasi permasalahan transformator *overload*, yaitu dengan metode pemasangan transformator *sisipan* dan *uprating*

transformator. Metode *sisip trafo* merupakan salah satu metode untuk mengatasi *overload*.

1.2. Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah dijabarkan, rumusan masalah yang akan dipecahkan yaitu:

1. Bagaimana cara penanggulangan transformator yang mengalami *overload*?
2. Metode apa yang digunakan dalam penanganan transformator yang mengalami *overload* tersebut?
3. Berapa persentase pembebanan transformator distribusi tersebut sebelum dan sesudah ditangani ?

1.3. Batasan Masalah

Adapun batasan masalah yang dilakukan dalam penulisan penelitian ini agar memiliki arah dan tujuan yang jelas dan bermanfaat. Berikut adalah masalah yang dibahas:

1. Metode sisip trafo dalam mengatasi masalah *overload* pada Transformator Distribusi PG61-1 Jl. Siborongborong/Kantor Camat.
2. Penggunaan metode yang baik untuk menyelesaikan masalah transformator yang mengalami *overload*.
3. Perhitungan persentase pembebanan Transformator Distribusi PG61-1 Jl. Siborongborong/Kantor Camat.

1.4. Tujuan Tugas Akhir

Adapun tujuan tugas akhir ini adalah sebagai berikut:

1. Dapat mengetahui berapa besar pembebanan transformator sebelum dan sesudah ditangani.

2. Mengetahui cara penanggulangan transformator distribusi yang mengalami masalah *overload* agar tidak terjadi kerusakan dengan harapan dapat meminimalisir gangguan pada transformator distribusi sehingga konsumen/pelanggan dapat menikmati layanan listrik dengan baik.

1.5. Kontribusi Tugas Akhir

Adapun kontribusi tugas akhir ini adalah sebagai berikut:

1. Bagi Mahasiswa
 - a. Sebagai sarana dalam menyelesaikan suatu permasalahan sesuai bidang keahlian dan untuk mempersiapkan diri dalam dunia kerja.
 - b. Sebagai penerapan teori yang di dapat dari bangku kuliah untuk diterapkan di dunia kerja.
 - c. Menambah wawasan serta menambah pengetahuan tentang gangguan dan peemeliharaan transformator distribusi.
2. Bagi Perusahaan

Mempermudah pegawai PLN dalam menangani masalah gangguan *overload* khususnya pada transformator distribusi.

1.6. Metodologi Penulisan

Metodologi penulisan yang akan dilakukan adalah dengan melakukan langkah-langkah sebagai berikut:

1. Studi Litenatur

Studi litenatur adalah pendekatan penelitian yang dilakukan dengan cara mencari referensi atas landasan teori yang relevan dengan kasus atau permasalahan yang ditemukan. Referensi tersebut bisa dicari dari buku, jurnal, artikel, laporan penelitian dan situs-situs online di internet. Output yang dihasilkan dari studi litenatur adalah terkoleksinya referensi yang relevan dengan rumusan masalah.
2. Observasi Lapangan

Melakukan observasi lapangan dengan pengamatan secara langsung ke lapangan untuk meneliti kasus yang terjadi. Wawancara adalah teknik pengumpulan data dengan melakukan tanya jawab secara langsung.

3. Pengolahan Data dan Penulisan Laporan

Penulisan laporan disusun sesuai data yang di peroleh secara langsung dan dengan menggunakan rumus yang berkaitan dengan permasalahan, sehingga menjadi laporan penelitian yang dapat menggambarkan penelitian secara utuh

1.7. Sistematika Penulisan

Untuk mempermudah dalam pemahaman tugas akhir ini, maka diuraikan penulisan sebagai berikut:

BAB I PENDAHULUAN

Pembahasan yang berisi penjelasan tentang Latar Belakang, Rumusan Masalah, Batasan Masalah, Tujuan Tugas Akhir, Kontribusi Tugas Akhir, Metodologi Penelitian.

BAB II LANDASAN TEORI

Pembahasan yang berisikan penelitian yang relevan serta landasan teori dasar yang mendukung dalam penelitian.

BAB III METODE PENELITIAN

Pembahasan yang berisi penjelasan mengenai tempat dan waktu penelitian, metode pengumpulan data dan metode analisa data.

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

Berisi hasil dan pembahasan yang membahas tentang data hasil dan pembahasan.

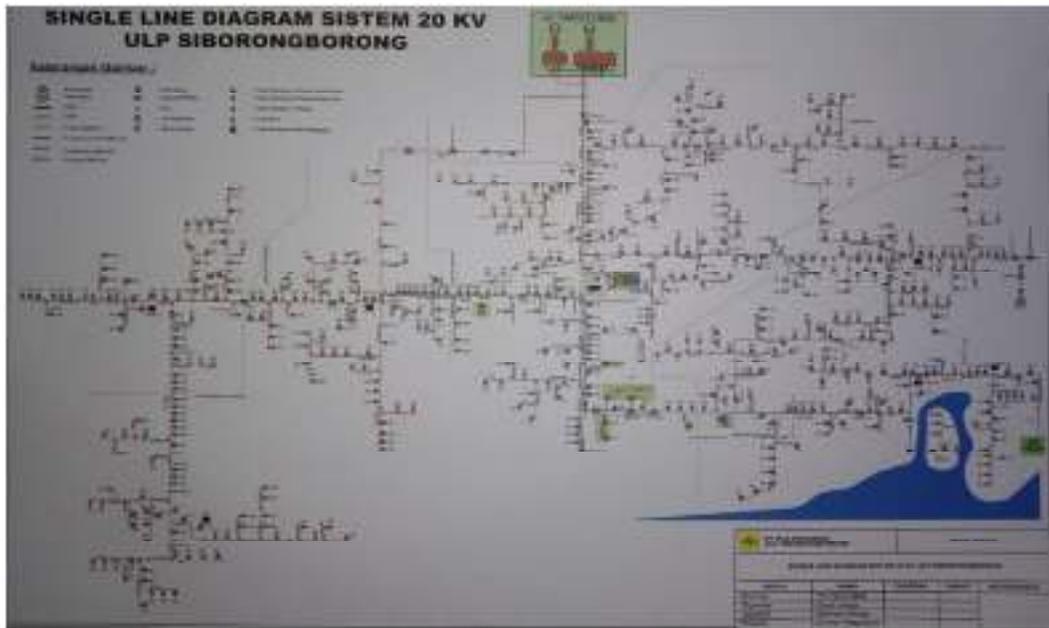
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

Berisi tentang simpulan dari hasil yang diperoleh selama penelitian.

BAB II LANDASAN TEORI

2.1. Sistem Tenaga Listrik

Sistem distribusi memiliki peranan penting dalam sistem tenaga listrik. Hal itu disebabkan karena sistem ini langsung berhubungan dengan pemakai energi listrik pelanggan di saluran tegangan menengah dan tegangan rendah. Sistem distribusi sendiri memiliki fungsi diantaranya yaitu menerima daya listrik dari sumber daya juga mendistribusikan daya tersebut ke konsumen.



Gambar 2.1: Single Line Diagram Sistem 20 kV ULP Siborongborong

Gardu Distribusi merupakan salah satu komponen dari suatu sistem distribusi tenaga listrik. Dalam gardu distribusi ini biasanya digunakan transformator distribusi yang berfungsi untuk menurunkan tegangan listrik dari jaringan distribusi tegangan tinggi menjadi tegangan terpakai pada jaringan distribusi tegangan rendah (*step down transformer*); misalkan tegangan 20 KV menjadi tegangan 400 Volt atau 220 Volt.

Transformator akan bekerja secara kontinu apabila transformator tersebut berada pada beban nominalnya.

2.2. Transformator Distribusi

Transformator distribusi adalah peralatan tenaga listrik yang berperan dalam menyalurkan tenaga listrik ke konsumen dari tegangan menengah ke tegangan rendah melalui saluran transmisi. Transformator distribusi ini terdiri dari dua sisi, yaitu sisi primer dan sisi sekunder. Sisi primer merupakan saluran yang menyuplai ke sisi sekunder. Unit peralatan yang termasuk sisi primer adalah:

1. Saluran sambungan dari SUTM ke unit transformator
2. *Fuse Cut Out* (FCO)
3. *Lightning Arrester* (LA)

Tujuan dari pemasangan suatu transformator distribusi adalah untuk mengurangi/menurunkan tegangan utama dari sistem distribusi listrik untuk tegangan pemanfaatan penggunaan konsumen. Transformator yang umum digunakan adalah transformator *step-down* 20 kV/400 V. Pada sistem distribusi ini, tegangan antar fasa ke fasa adalah 380 V, tetapi karena sering terjadi drop tegangan, maka pada tegangan rendahnya dibuat lebih dari 380 V agar tegangan yang diterima pelanggan/konsumen tidak kurang atau tidak lebih kecil dari 380 V.

2.2.1. Konstruksi Transformator

Transformator merupakan alat listrik statis yang digunakan untuk memindahkan daya dari satu rangkaian ke rangkaian yang lain dengan mengubah tegangan, tanpa mengubah daya dan frekuensi. Transformator memiliki konstruksi yang terdiri dari tiga bagian, yaitu belitan primer yang berfungsi untuk menerima energi listrik dari sumber tegangan yang diterapkan, belitan sekunder adalah bagian yang menerima energi listrik yang sudah terinduksi dan inti adalah bagian yang menyediakan rangkaian keengganan rendah untuk jalur gaya magnet.



Gambar 2.2: Konstruksi Transformator

Kumparan ini terdiri dari lilitan konduktor berisolasi sehingga kedua kumparan tersebut terisolasi secara elektrik antara yang satu dengan yang lain. Ratio perubahan tegangan tergantung dari ratio perbandingan jumlah lilitan kedua kumparan itu. Kedua kumparan tersebut dililitkan pada suatu inti yang terbuat dari laminasi lembaran baja yang kemudian dimasukkan ke dalam tangki berisi minyak trafo.

Apabila kumparan primer dialiri arus bolak-balik, maka akan timbul fluks magnetik bolak-balik sepanjang inti yang akan menginduksi kumparan sekunder sehingga kumparan sekunder akan menghasilkan tegangan:

Apabila trafo diasumsi sebagai trafo ideal dimana tidak terjadi rugi-rugi daya pada trafo, maka daya pada kumparan primer (P1) sama dengan daya pada kumparan sekunder (P2). Besar tegangan dan arus pada kumparan sekunder diatur menggunakan perbandingan banyaknya lilitan antara kumparan primer dan kumparan sekunder berdasarkan rumus:

$$\frac{N_p}{N_s} = \frac{V_p}{V_s} = \frac{I_p}{I_s} \dots\dots\dots(2.1)$$

Dimana :

N_p = Banyaknya Lilitan Kumparan Sisi Primer

N_s = Banyaknya Lilitan Kumparan Sisi Sekunder

V_p = Tegangan Sisi Primer (V)
 V_s = Tegangan Sisi Sekunder (V)
 I_p = Arus Sisi Primer (A)
 I_s = Arus Sisi Sekunder (A)

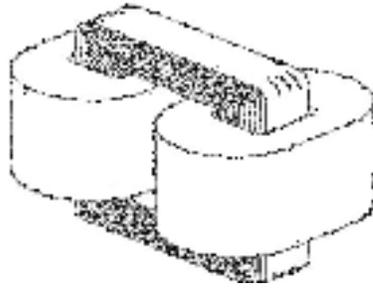
2.2.2. Prinsip Kerja Transformator

Transformator memiliki dua kumparan yaitu kumparan primer dan kumparan sekunder, kedua kumparan itu bersifat induktif dan kedua kumparan tersebut terpisah secara elektrik namun berhubungan secara magnetis melalui jalur yang memiliki reluktansi rendah. Apabila kumparan primer dihubungkan dengan sumber tegangan bolak-balik maka fluks bolak-balik akan muncul di dalam inti yang dilaminasi. 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 sebagai induksi bersama (*mutual induction*) yang menyebabkan timbulnya fluks magnetik di kumparan sekunder, maka mengalirlah arus sekunder jika rangkaian sekunder dibebani, sehingga energi listrik dapat dialirkan keseluruhan. Tujuan utama menggunakan inti pada transformator adalah untuk mengurangi reluktansi (tahanan magnetis) dari rangkaian magnetis.

2.2.3. Inti Transformator

Secara umum transformator dibedakan menjadi dua jenis, yaitu tipe inti (*core type*) dan tipe cangkang (*shell type*). Tipe inti dibentuk dari lapisan besi berisolasi berbentuk persegi panjang dan kumparan transformatornya dibelitkan pada dua sisi persegi. Sedangkan tipe cangkang dibentuk dari lapisan inti berisolasi dan kumparan transformatornya di belitkan di pusat inti.

Transformator dengan tipe konstruksi shell memiliki kehandalan yang lebih tinggi pada konstruksi core dalam menghadapi tekanan mekanis yang kuat pada saat terjadi hubung singkat. Kedua tipe inti transformator inti ditunjukkan pada gambar dibawah.



Gambar 2.3: Bagian Inti pada Transformator

2.2.4. Minyak Transformator

Minyak transformator memegang peranan penting dalam sistem isolasi trafo dan juga berfungsi sebagai pendingin untuk menghilangkan panas akibat rugi-rugi daya pada trafo. Kandungan utama minyak trafo adalah naftalin, parafin dan aromatik. Keuntungan minyak trafo sebagai isolator dalam trafo adalah:

- Isolasi cair memiliki kerapatan 1000 kali atau lebih dibandingkan dengan isolasi gas, sehingga memiliki kekuatan di elektrik yang lebih tinggi.
- Isolasi cair akan mengisi celah atau ruang yang akan di isolasi dan secara serentak melalui proses konversi menghilangkan panas akibat rugi daya.
- Isolasi cair cenderung dapat memperbaiki diri sendiri (*shell healing*) jika terjadi pelepasan muatan (*discharge*).

Kekuatan dielektrik adalah ukuran kemampuan elektrik suatu material sebagai isolator. Kekuatan dielektrik didefinisikan sebagai tegangan maksimum yang dibutuhkan untuk mengakibatkan *dielectric breakdown* pada material yang dinyatakan dalam suatu Volt/m. Semakin tinggi kekuatan dielektrik minyak trafo, maka semakin kualitas minyak tersebut sebagai isolator. Hasil uji kekuatan dielektrik yang rendah, menunjukkan adanya benda pengotor minyak seperti air atau partikel penghantar dalam minyak. Sebaiknya, apabila hasil uji kekuatan dielektrik tinggi, bukan berarti tidak terjadi pengotoran dalam minyak tersebut.

Untuk mencegah kemungkinan timbulnya kebakaran pada peralatan, dipilih minyak dengan titik nyala yang tinggi. Titik nyala minyak baru tidak boleh lebih kecil dari 135°C sedangkan minyak bekas tidak boleh kurang dari 130°C.

2.2.5. Bushing Transformator

Bushing merupakan sarana penghubung antara belitan dengan jaringan luar. Bushing terdiri dari sebuah konduktor yang diselubungi oleh isolator. Isolator tersebut berfungsi sebagai penyekat antara konduktor bushing dengan bodi main tank transformator. Sehingga bushing berfungsi untuk menghubungkan kumparan transformator dengan rangkaian luar yang diberi selubung isolator. Isolator juga berfungsi sebagai penyekat antara konduktor dengan tangki transformator. Bahan bushing adalah terbuat dari porselin yang tengahnya berlubang. Untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada gambar dibawah ini.



Gambar 2.4: Bushing Transformator

Bagian utama suatu bushing terdiri dari inti atau konduktor, bahan dielektrik dan flans yang terbuat dari logam. Inti berfungsi menyalurkan arus dari bagian dalam peralatan ke terminal luar dan bekerja pada tegangan tinggi. Dengan bantuan flans, isolator dikatkan pada badan peralatan yang dibumikan.

2.2.6. Sistem Pendingin Transformator

Sistem pendingin transformator dapat dikelompokkan sebagai berikut:

1. ONAN (*Oil Natural Air Natural*)

Sistem pendingin ini menggunakan sirkulasi minyak dan sirkulasi udara secara alamiah. Sirkulasi minyak yang terjadi disebabkan oleh perbedaan berat jenis antara minyak yang dingin dengan minyak yang panas.

2. ONAF (*Oil Natural Air Force*)

Sistem pendingin ini menggunakan sirkulasi minyak secara alami sedangkan sirkulasi udaranya secara buatan, yaitu dengan menggunakan hembusan kipas angin yang digerakkan oleh motor listrik. Pada umumnya operasi trafo dimulai dengan ONAN atau dengan ONAF tetapi hanya sebagian kipas angin berputar. Apabila suhu trafo sudah semakin meningkat, maka kipas angin yang lainnya akan berputar secara bertahap.

3. OFAF (*Oil Force Air Force*)

Pada sistem ini sirkulasi minyak digerakkan dengan menggunakan kekuatan pompa, sedangkan sirkulasi udara menggunakan kipas angin.

2.3. Proteksi Pada Transformator Distribusi

Pada sistem tenaga listrik, sistem proteksi adalah perlindungan atau isolasi pada bagian yang memungkinkan akan terjadi gangguan atau bahaya. Tujuan utama proteksi adalah untuk mencegah terjadinya gangguan atau memadamkan gangguan yang telah terjadi serta melokalisirnya dan membatasi pengaruh-pengaruhnya, biasanya dengan mengisolir bagian-bagian yang terganggu tanpa menggunakan bagian-bagian yang lain.

2.3.1. Fuse

Fuse adalah peralatan proteksi arus lebih yang bekerja dengan menggunakan prinsip melebur. Terdapat dua tipe fuse berdasarkan kecepatan melebur elemen fusernya (*fuse link*), yaitu tipe K (cepat) dan tipe T (lambat). Fuse yang didesain untuk digunakan pada tegangan diatas 600 V dikategorikan sebagai *Fuse Cut-Out*. *Fuse Cut-Out* jenis ekspulsi adalah jenis yang paling sering digunakan pada sistem distribusi saluran udara. Fuse jenis ini menggunakan elemen fuse yang relatif pendek yang dipasang di dalam *fuse cartridge*.

Pada umumnya *Fuse Cut-Out* dipasang antara trafo distribusi dengan saluran distribusi primer. Pada saat terjadi gangguan, elemen fuse akan melebur dan memutuskan rangkaian sehingga akan melindungi trafo distribusi dari kerusakan

akibat gangguan dan arus lebih pada daluran primer atau sebaliknya memutuskan saluran primer dari trafo distribusi apabila terjadi gangguan pada trafo atau jaringan sisi sekunder sehingga akan mencegah terjadinya pemadaman pada seluruh jaringan primer.

2.3.2. *Lightning Arrester*

Penggunaan lightning arrester pada sistem distribusi adalah untuk melindungi peralatan dari gangguan akibat sambaran petir. Arrester juga dipergunakan untuk melindungi saluran distribusi dari flashover. Arrester dipasang pada peralatan yang dihubungkan dari fasa konduktor ke tanah. Agar perlindungan saluran menjadi lebih efektif, arrester harus dipasang pada setiap fasa pada tiap tiang. Pada saat sistem bekerja keadaan normal, arrester memiliki sifat sebagai isolator. Apabila terjadi sambungan petir, arrester akan berubah menjadi konduktor dan membuat jalan pintas ke tanah yang mudah dilalui oleh arus petir, sehingga tidak menimbulkan tegangan lebih yang tinggi pada trafo. Jalur ke tanah tersebut harus sedemikian rupa sehingga tidak akan mengganggu aliran daya normal. Setelah petir hilang, harus menutup dengan cepat kembali menjadi isolator, sehingga tidak mengakibatkan pemutus daya terbuka. Pada kondisi operasi normal, arus bocor pada arrester tidak boleh melebihi 2 mA. Apabila arus bocor melebihi angka tersebut, kemungkinan besar arrester mengalami kerusakan.

Pada saluran distribusi, arrester yang biasanya digunakan adalah arrester jenis katub (*valve type*). Arrester jenis katub terdiri dari sela percik dan sela seri yang terhubung dengan elemen tahanan yang mempunyai karakteristik tidak linear. Tegangan frekuensi dasar tidak dapat menimbulkan tembus pada sela seri.

Apabila sela seri tembus pada saat tibanya suatu surja yang cukup tinggi, sela tersebut berfungsi menjadi penghantar. Sela seri tidak bisa memutuskan arus susulan. Dalam hal ini sela seri di bantu oleh tahanan non linier yang mempunyai karakteristik tahanan kecil untuk arus besar dan tahanan besar untuk arus susulan dari frekuensi dasar.

2.4.. Pembumian (*Grounding*) pada Tranformator Distribusi

Sistem pentanahan pada jaringan distribusi digunakan sebagai pengamanan langsung terhadap peralatan dan manusia bila terjadinya gangguan tanah atau kebocoran arus akibat kegagalan isolasi dan tegangan lebih pada peralatan jaringan distribusi yang diakibatkan sambaran petir.

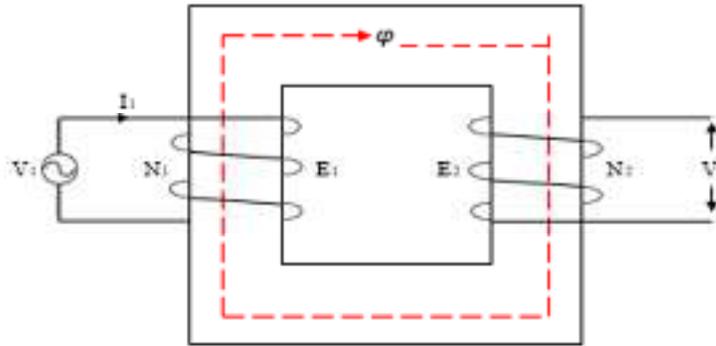
Sistem pembumian dilaksanakan dengan menghubungkan ke tanah salah satu konduktor-konduktor pembawa arus dari sistem distribusi atau biasanya dikatakan menghubungkan ke tanah titik netral dari trafo dan generator. Pada sistem pentanahan peralatan harus diperhatikan mengenai elektroda dan tahanan pentanahan. Tugas utama dari sistem pembumian peralatan adalah :

- a. Memberi jaminan keselamatan kerja bagi operator ataupun orang lain yang berada di sekitar peralatan tersebut.
- b. Membatasi tegangan antara bagian-bagian peralatan yang tidak dialiri arus listrik terhadap bumi pada batas tegangan yang aman pada segala keadaan.
- c. Sebagai saluran kembali dengan impedansi yang rendah untuk arus gangguan ke tanah.

2.5. Keadaan Transformator Tanpa Beban

Bila kumparan primer suatu transformator dihubungkan dengan sumber tegangan V_1 yang sinusoidal akan mengalirkan arus primer I_0 yang juga sinusoidal dan tegangan mengangap belitan reaktif murni I_0 akan tertinggal 90° dari V_1 .

Arus primer I_0 menimbulkan fluks (\emptyset) yang sefasa dan juga berbentuk sinusoid. Arus primer I_0 menimbulkan flusk (\emptyset) yang sephasa dan juga membentuk sinusoidal. Fluks bolak-balik ini akan memotong kumparan primer dan kumparan sekunder dan harganya turun dalam harga bolak-balik, sehingga menginduksikan GGL pada kedua lilitan tersebut. GGL yang diinduksikan dalam kumparan primer akan melawan tegangan V_1 yang dikenakan.



Gambar 2.5: Trafo Dalam Keadaan Tanpa Beban

$$\phi = \phi_{\max} \sin \omega t \text{ (weber)} \dots \dots \dots (2.2)$$

Fluks yang sinusoidal ini akan menghasikan tegangan induksi e_1 (Hukum Faraday).

$$e_1 = - N_1 \frac{d\phi}{dt} \dots \dots \dots (2.3)$$

$$e_1 = - N_1 \frac{d\phi_{\max} \sin \omega t}{dt} \dots \dots \dots (2.4)$$

$$e_1 = - N_1 \omega \phi_{\max} \cos \omega t \text{ (tertinggal } 90^\circ \text{ dari } \phi) \dots \dots (2.5)$$

$$e_1 = - N_1 \omega \phi_{\max} \sin (\omega t - 90^\circ) \dots \dots \dots (2.6)$$

Dimana:

e_1 = Gaya Gerak Listrik (Volt)

N_1 = Jumlah Belitan Di Sisi Primer (Turn)

ω = Kecepatan Sudut Putar (Rad/ Sec)

ϕ = Fluks Magnetik (Weber)

Harga efektifnya:

$$E_1 = \frac{N_1 \omega \phi_{\max}}{\sqrt{2}} \dots \dots \dots (2.7)$$

$$E_1 = \frac{N_1 2\pi f \Phi \max}{\sqrt{2}} \dots\dots\dots (2.8)$$

$$E_1 = \frac{N_1 2 \times 3,14 f \Phi \max}{\sqrt{2}} \dots\dots\dots (2.9)$$

$$E_1 = \frac{N_1 6,28 f \Phi \max}{\sqrt{2}} \dots\dots\dots (2.10)$$

$$E_1 = 4,44 N_1 f \Phi \max (volt) \dots\dots\dots (2.11)$$

Pada rangkaian sekunder, fluks (Φ) berssama tadi juga menimbulkan:

$$e_2 = -N_2 \frac{d\Phi}{dt} \dots\dots\dots (2.12)$$

$$e_2 = - N_2 \omega \Phi \max \omega t \dots\dots\dots (2.13)$$

Harga efektifnya:

$$E_2 = 4,44 N_2 f \Phi \max (volt) \dots\dots\dots (2.14)$$

Karena kedua kumparan dipotong oleh fluks yang sama, maka ggl yang diinduksikan dalam setiap lilit dari kumparan adalah sama. Maka tegangan setiap lilit dalam kedua kumparan berturut-turut adalah $\frac{E_1}{N_1}$ dan $\frac{E_2}{N_2}$, sehingga:

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2} \dots\dots\dots (2.15)$$

Dengan mengabaikan rugi tahanan dan adanya fluks bocor, maka:

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{V_1}{V_2} = \frac{N_1}{N_2} = a \dots\dots\dots (2.16)$$

Dimana:

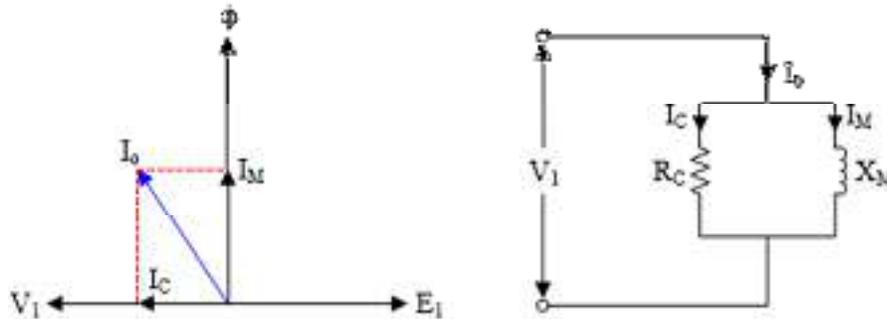
E_1 = GGL Induksi Di Sisi Primer (Volt)

E_2 = GGL Induksi Di Sisi Sekunder (Volt)

- V_1 = Tegangan Terminal Sisi Primer (Volt)
- V_2 = Tegangan Terminal Sisi Sekunder (Volt)
- N_1 = Jumlah Belitan Sisi Primer (Turn)
- N_2 = Jumlah Belitan Sisi Sekunder (Turn)
- a = Faktor Transformasi

Dalam kenyataannya, arus primer I_0 bukanlah merupakan arus induktif murni, sehingga terdiri dari dua komponen:

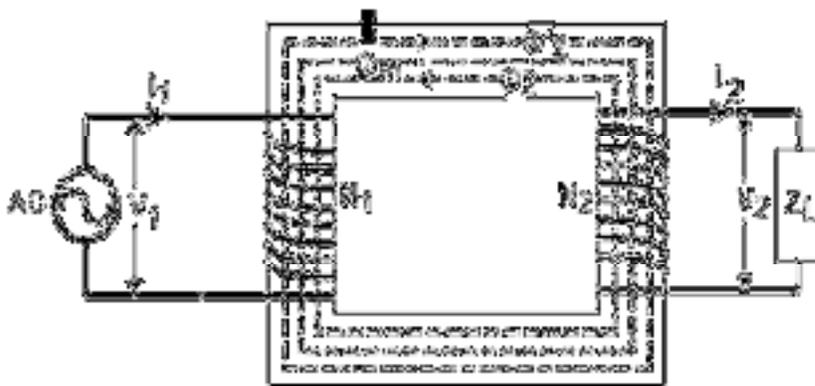
1. Komponen arus pemagneta I_M , yang menghasilkan fluks (Φ). Karena sifat inti besi yang nonlinear, maka arus pemagnetan I_M dan juga fluks (Φ) dalam kenyataannya tidak berbentuk sinusoidal.
2. Komponen arus rugi tembaga I_C , menyatakan adanya daya yang hilang akibat adanya rugi *hysteresis* dan *eddy current*. I_C Sephasa dengan V_1 , dengan demikian hasil perkaliannya ($I_C \times V_1$) merupakan daya yang hilang.



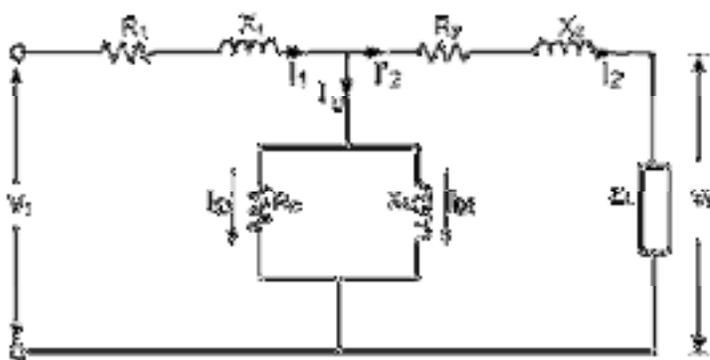
Gambar 2.6: Arus Penetralan dalam Rangkaian Vektoris dan Skematis

2.6. Keadaan Transformator Berbeban

Apabila kumparan sekunder dihubungkan dengan beban Z_L , I_2 mengalir pada kumparan sekunder, dimana: $I_2 = \frac{V_2}{Z_L}$ dengan $\Phi_2 =$ faktor kerja beban.



Gambar 2.7: Transformator dalam Keadaan Berbeban



Gambar 2.8: Rangkaian Ekuivalen Transformator dalam Keadaan Berbeban

Arus beban I_2 ini akan menimbulkan gaya gerak magnet (GGM) $N_2 I_2$ yang cenderung menentang fluks (Φ) bersama yang telah ada akibat arus pemagnetan I_M .

Agar fluks bersama itu tidak berubah nilainya, pada kumparan primer harus mengalir arus I'_2 , yang menentang fluks yang dibangkitkan oleh arus beban I_2 , hingga keseluruhan arus yang mengalir pada kumparan primer menjadi:

$$I_1 = I_0 + I'_2 \text{ (ampere)} \dots \dots \dots (2.17)$$

Bila rugi besi diabaikan (I_C diabaikan), maka $I_0 = I_M$, sehingga:

$$I_1 = I_M + I'_2 \text{ (ampere)} \dots \dots \dots (2.18)$$

Dimana:

- I_1 = Arus Pada Sisi Primer (Ampere)
- I'_2 = Arus Yang Menghasilkan Φ'_2 (Ampere)
- I_0 = Arus Penguat (Ampere)
- I_M = Arus Pemagnetan (Ampere)
- I_C = Arus Rugi-Rugi Inti (Ampere)

Untuk menjaga agar fluks tetap tidak berubah sebesar GGM yang dihasilkan oleh arus pemagnetan I_M , maka berlaku hubungan:

$$N_1 I_M = N_1 I_1 - N_2 I_2 \dots \dots \dots (2.19)$$

$$N_1 I_M = N_1 (I_M + I'_2) - N_2 I_2 \dots \dots \dots (2.20)$$

Sehingga:

$$N_1 I'_2 = N_2 I_2$$

Karena I_M dianggap kecil, maka $I'_2 = I_1$.

Sehingga:

$$N_1 I_1 = N_2 I_2 = \text{atau } \frac{I_1}{I_2} = \frac{N_2}{N_1} \dots \dots \dots (2.21)$$

2.7. Rangkaian Ekuivalen Transformator

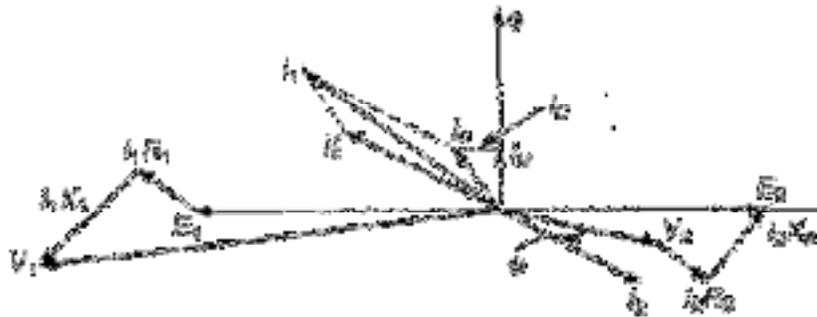
Dalam pembahasan terdahulu kita mengabaikan adanya tahanan dan fluks bocor. Analisa selanjutnya akan mempehitungkan kedua hal tersebut. Tidak seluruh fluks (Φ) yang dihasilkan oleh arus pemagnetan I_M merupakan fluks bersama (Φ_M), sebagian daripadanya hanya mencakup kumparan-kumparan primer (Φ_1) atau kumparan sekunder (Φ_2). Dalam model rangkaian (rangkaian ekuivalen) yang dipakai untuk menganalisis kerja suatu trafo, adanya fluks bocor Φ_1 dan Φ_2 ditunjukkan

sebagai reaktansi X_1 dan X_2 . Sedangkan rugi tahanan ditunjukkan dengan R_1 dan R_2 . Dengan demikian model rangkaian dapat dituliskan seperti gambar dibawah ini.



Gambar 2.9: Rangkaian Ekivalen Transformator

Dari Gambar 2.9 dapat dibuat vektor diagramnya sebagai berikut:



Gambar 2.10: Diagram Vektor Transformator

Dari model diagram vektor diatas, dapat pula diketahui hubungan penjumlahan vektor:

$$V_1 = E_1 + I_1 R_1 + I_1 X_1 \dots\dots\dots (2.22)$$

$$E_2 = V_2 + I_2 R_2 + I_2 X_2 \dots\dots\dots (2.23)$$

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2} \alpha \text{ atau } E_1 = \alpha E_2 \dots\dots\dots (2.24)$$

Hingga:

$$E_1 = \alpha(I_2 Z_L + I_2 R_2 + I_2 X_2) \dots \dots \dots (2.25)$$

Karena:

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{N_2}{N_1} = \frac{1}{\alpha} \text{ atau } I_2 = \alpha I_1' \dots \dots \dots (2.26)$$

Maka:

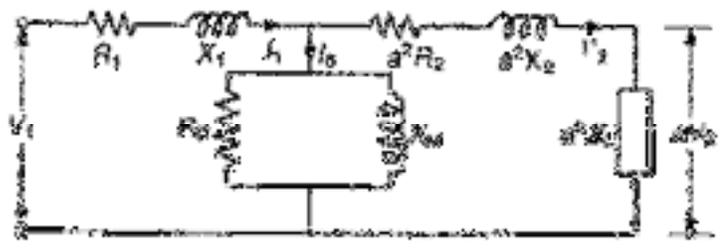
$$E_1 = \alpha^2 I_1' Z_L + \alpha^2 I_1' R_2 + \alpha^2 I_1' X_2 \dots \dots \dots (2.27)$$

Dan:

$$V_1 = \alpha^2 I_1' Z_L + \alpha^2 I_1' R_2 + \alpha^2 I_1' X_2 + I_1 R_1 + I_1 X_1 \dots \dots \dots (2.28)$$

Persamaan terakhir mengandung pengertian, apabila parameter rangkaian sekunder dinyatakan dalam harga rangkaian primer harganya perlu dikalikan dengan faktor α^2 .

Sekarang model rangkaian menjadi seperti gambar dibawah ini:



Gambar 2.11: Hasil Penyederhanaan Rangkaian Ekvivalen Transformator

BAB III METODE PENELITIAN

Jenis Penelitian

Penelitian tentang “Studi Analisis *Overload* suatu Transformator Distribusi Aplikasi di PT PLN (Persero) ULP Siborongborong” penulis menggunakan jenis penelitian kuantitatif dan kualitatif. Kuantitatif adalah melakukan pengumpulan data berdasarkan pengukuran yang dilakukan dalam penelitian ini yang hasil dari pengukuran itu diselesaikan dalam bentuk matematis sedangkan jenis penelitian kualitatif adalah melakukan analisis penelitian berdasarkan data pengukuran kuantitatif.

Waktu dan Tempat Penelitian

1. Waktu

Penelitian ini dilakukan pada bulan Mei s/d Juni 2022

2. Tempat/ Lokasi

- Tempat : ULP Siborongborong
- Lokasi : Jln. Siliwangi No.2 Pasar Siborongborong.

Perencanaan Penelitian

Perencanaan penelitian adalah suatu rencana yang terperinci dan spesifik tentang bagaimana menganalisis dan menginterpretasi data. Dalam perancangan penelitian ini metode yang digunakan adalah metode kuantitatif. Metode kuantitatif adalah suatu metode penelitian dimana datanya berupa angka-angka dan analisa statistik. Sedangkan, dalam proses pengambilan data metode yang digunakan adalah metode observasi. Metode observasi adalah suatu metode dimana peneliti terlibat langsung dalam pengambilan data. Berikut ini adalah tahapan-tahapan dalam penelitian :

i. Studi Literatur

Penulis melakukan kegiatan dengan studi literatur untuk mencari teori-teori yang relevan dengan permasalahan yang ditemukan. Pencarian dilakukan dari berbagai sumber yaitu buku referensi, jurnal-jurnal dan internet yang berhubungan atau yang dapat mendukung teori penyelesaian penelitian “Studi Analisis Overload Suatu Transformator Distribusi Aplikasi di PT PLN (Persero)”.

ii. Observasi Lapangan

Observasi adalah metode pengumpulan data melalui pengamatan langsung atau peninjauan secara cermat dan langsung dilapangan atau lokasi penelitian. Dalam hal ini peneliti dengan berpedoman kepada desain penelitiannya perlu mengunjungi lokasi penelitian untuk mengamati langsung berbagai hal atau kondisi yang ada dilapangan. Penemuan ilmu pengetahuan selalu dimulai dengan observasi dan kembali kepada observasi untuk membuktikan kebenaran ilmu pengetahuan tersebut.

Penelitian harus dilakukan dengan pengamatan secara langsung ke lapangan tempat peneliti melakukan atau melaksanakan penelitian dalam hal ini penulis melakukan penelitian yaitu di PT PLN (Persero) ULP Siborongborong.

iii. Fokus Penelitian

Yang menjadi fokus penelitian yang dilakukan peneliti pada proyek ini adalah yaitu tentang studi analisis *overload* suatu transformator distribusi aplikasi di PT PLN (Persero).

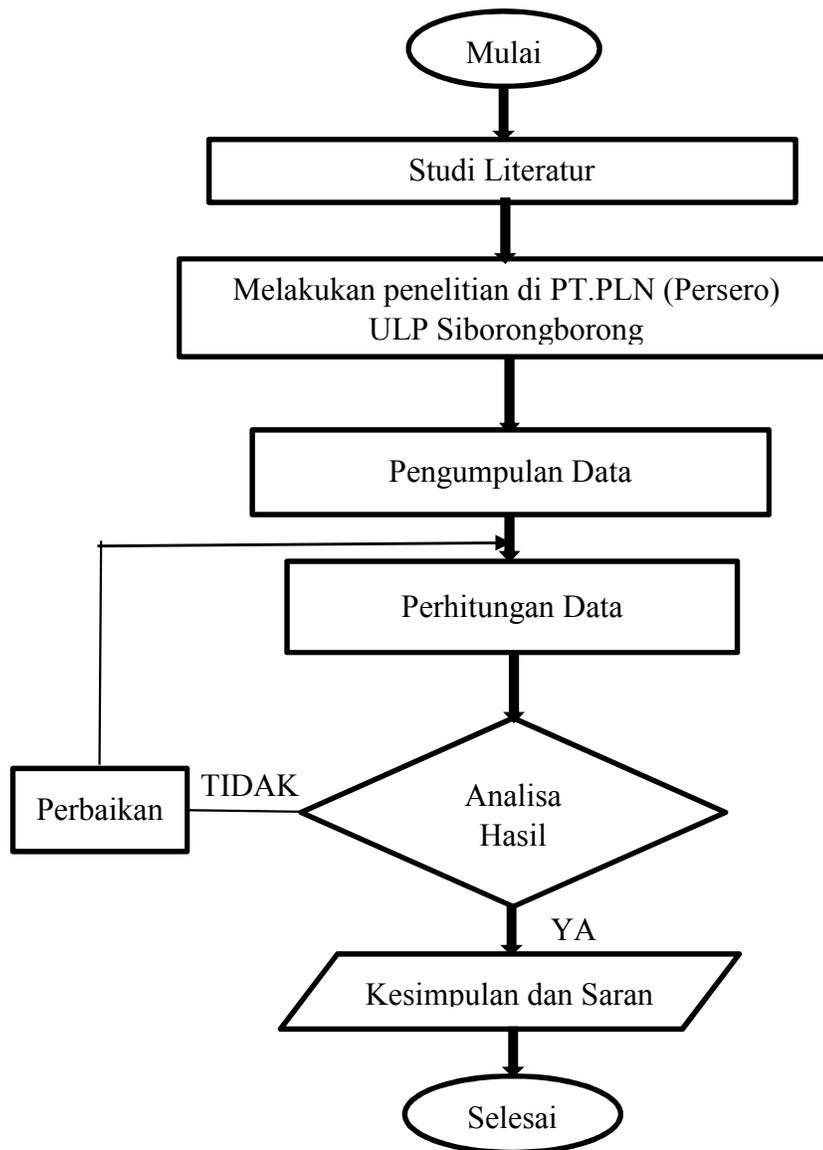
iv. Pengumpulan Data

Dalam penelitian ini, terlebih dahulu peneliti meminta izin pada pihak PLN tempat lokasi penelitian dengan cara mengirimkan surat izin penelitian dari pihak universitas. Setelah ada surat balasan dari pihak PLN, peneliti melakukan penelitian sesuai dengan judul yang akan di presentasikan. Kegiatan yang dilakukan peneliti dalam penelitian ini adalah pengambilan data-data transformator yang ada di PT PLN (Persero) ULP Siborongborong sesuai dengan yang di perlukan.

v. **Penulisan Laporan**

Penulisan laporan disusun sesuai data yang diperoleh selama penelitian secara langsung dan dan secara tidak langsung dengan menggunakan rumus yang berkaitan dengan yang diteliti, sehingga menjadi laporan yang dapat memberikan gambaran penelitian secara utuh dandapat dipertanggung jawabkan.

vi. **Diagram Alir (Flowchart)**

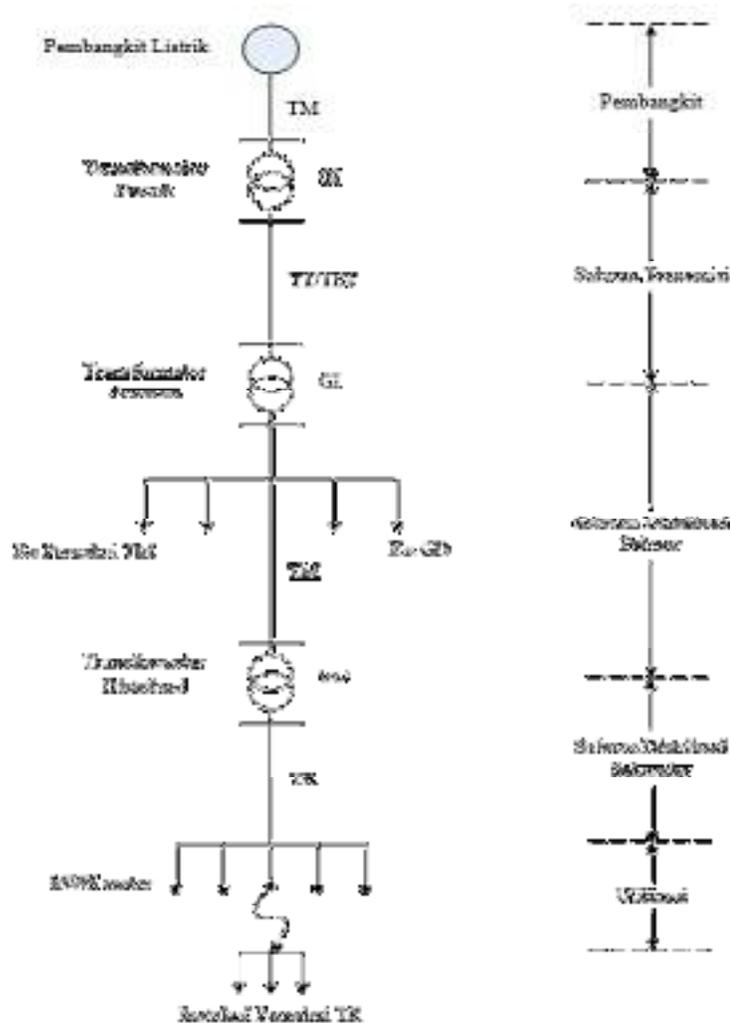


Metode Analisa

Dalam menganalisa data yang telah di dapat dari PT. PLN (Persero) ULP Siborongborong ini dilakukan secara perhitungan manual karena persamaan matematis yang digunakan hanya persamaan biasa yang bisa diselesaikan dengan cara manual tanpa menggunakan metode terbaru.

Sistem Jaringan Distribusi

Pada sistem distribusi ini, ada tiga bagian penting dalam penyaluran tenaga listrik, yaitu: Pembangkitan, Penyaluran (Transmisi), dan Distribusi seperti yang ada pada gambar dibawah ini:



Gambar 3.1: Gambaran Umum Sistem Tenaga Listrik

Tegangan pada sistem distribusi dapat dikelompokkan menjadi dua bagian yaitu: Distribusi Primer (20KV), dan Distribusi Sekunder (400/220V). Jaringan distribusi 20kV sering disebut Jaringan Tegangan Menengah (JTM) dan jaringan distribusi 400/220V sering disebut dengan Jaringan Tegangan Rendah.

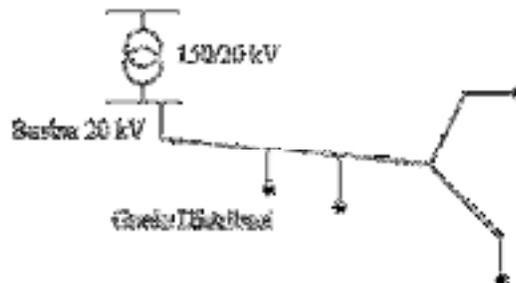
Jaringan Pada Sistem Distribusi Primer

Jaringan distribusi primer adalah jaringan distribusi daya listrik bertegangan menengah (20 kV). Jaringan distribusi primer tersebut merupakan jaringan penyulang. Jaringan ini berawal dari sisi sekunder trafo daya yang terpasang pada induk hingga ke sisi primer trafo distribusi yang terpasang pada tiang-tiang saluran.

Jaringan pada Sistem Distribusi tegangan menengah (Primer 20 kV) dapat dikelompokkan menjadi lima model, yaitu jaringan radial, jaringan hantaran penghubung, jaringan lingkaran, jaringan spindel dan sistem gugus atau kluster.

a. Jaringan Radial

Sistem distribusi dengan jaringan radial adalah sistem distribusi yang paling sederhana dan ekonomis. Pada sistem ini terdapat beberapa penyulang yang menyuplai beberapa gardu distribusi secara radial.



Gambar 3.2: Jaringan Sistem Radial

Dalam penyulang tersebut dipasang gardu-gardu distribusi untuk konsumen. Gardu distribusi adalah tempat dimana transformator untuk konsumen dipasang. Bisa di dalam bangunan beton atau diletakkan diatas tian. Keuntungan dari sistem ini adalah sistem ini tidak rumit dan lebih murah dibanding dengan sistem yang lain.

Namun, keandalan sistem ini lebih rendah dibanding dengan sistem lainnya. Kurangnya keandalan disebabkan karena hanya terdapat satu jalur utama yang meyuplai gardu distribusi sehingga apabila jalur utama tersebut mengalami gangguan, maka seluruh gardu akan ikut padam.

Kerugian lain yaitu mutu tegangan pada gardu distribusi yang paling ujung kurang baik, hal ini dikarenakan jatuh tegangan terbesar ada di ujung saluran.

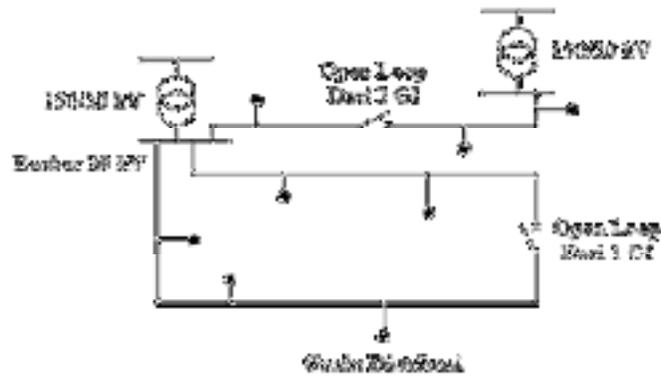
b. Jaringan Hantaran Penghubung (*Tie Line*)

Gangguan beban lebih dapat terjadi pada transformator distribusi karena bahan yang terpasang pada transformator melebihi kapasitas normal yang mampu dipikul oleh transformator dimana arus beban lebih besar daripada arus beban penuh (*full load*) atau arus normal transformator distribusi tersebut.

Pembebanan yang berlebihan akan mengakibatkan kenaikan suhu pada lilitan transformator sehingga mengakibatkan kenaikan suhu juga pada minyak transformator. Beban lebih yang terjadi menyebabkan kualitas isolasi transformator semakin buruk. Dan apabila terus menerus terjadi, maka akan menyebabkan gagalnya/rusaknya isolasi yang dapat mengakibatkan hubung singkat dan rusaknya transformator tersebut. Di sisi pelanggan, beban lebih adalah efek buruk bagi pengguna listrik.

c. Jaringan Sistem Open Loop

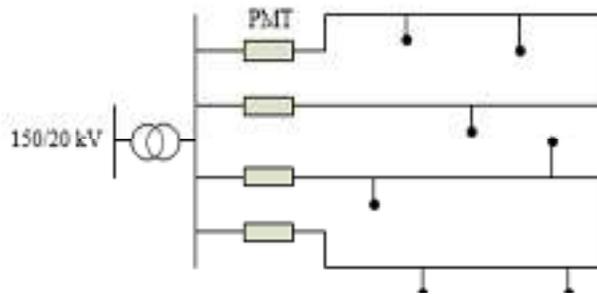
Merupakan pengembangan dari sistem radial sebagai akibat diperlukannya keandalan yang lebih tinggi dan umumnya sistem ini dapat dipasok dalam satu gardu induk. Dimungkinkan juga dari gardu induk lain tetapi harus dalam satu sisi tegangan tinggi karena hal ini diperlukan untuk manufer beban pada saat terjadi gangguan.



Gambar 3.3: Jaringan Sistem Open Loop

d. Jaringan Sistem *Close Loop*

Jaringan sistem *close loop* ini layak digunakan untuk jaringan yang dipasang dari satu gardu induk. Sistem ini memerlukan sistem proteksi yang lebih rumit dan biasanya menggunakan rele arah (*bidirectional*). Sistem ini mempunyai keandalan yang lebih tinggi dibandingkan sistem lain.



Gambar 3.4: Jaringan Sistem Close Loop

e. Jaringan Spindel

Sistem Spindel seperti pada Gambar di bawah ini adalah suatu pola kombinasi jaringan dari pola Radial dan Ring.

Spindel terdiri dari beberapa penyulang (*feeder*) yang tegangannya di berikan dari Gardu Induk dan tegangan tersebut berakhir pada sebuah Gardu Hubung (GH).

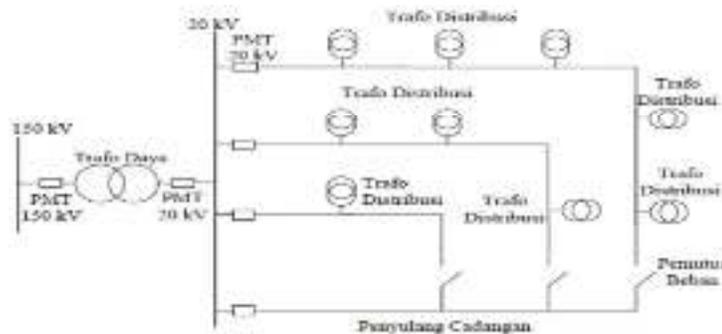


Gambar 3.5: Jaringan Spindel

Pada sebuah spindel biasanya terdiri dari beberapa penyulang aktif dan sebuah penyulang cadangan (express) yang akan di hubungkan melalui Gardu Hubung (GH). Pola spindel biasanya digunakan pada Jaringan Tegangan Menengah (JTM) yang menggunakan kabel tanah/ Saluran Kabel tanah Tegangan Menengah (SKTM). Namun pada pengoperasiannya, sistem spindel berfungsi sebagai *Sistem Radial*. Di dalam sebuah penyulang aktif terdiri dari Gardu Distribusi yang berfungsi untuk mendistribusikan tegangan kepada konsumen baik konsumen Tegangan Rendah (TR) atau Tegangan Menengah (TM).

f. Jaringan Kluster

Pada sistem Jaringan Kluster seperti pada gambar dibawah ini banyak digunakan untuk kota besar yang mempunyai kerapatan beban yang tinggi. Dalam sistem ini terdapat Saklar Pemutus Beban, dan Penyulang Cadangan.



Gambar 3.6: Jaringan Kluster

Dimana penyulang ini berfungsi bila ada gangguan yang terjadi pada salah satu penyulang konsumen maka penyulang cadangan inilah yang menggantikan fungsi suplai ke konsumen.

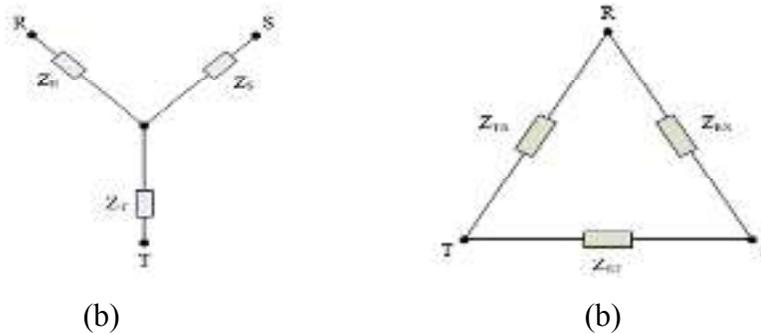
Beban Lebih (*Overload*)

Gangguan beban lebih dapat terjadi pada transformator distribusi karena beban yang terpasang pada transformator melebihi kapasitas normal yang mampu dipikul oleh transformator dimana arus beban lebih besar dari pada arus beban penuh (full load) atau arus normal transformator distribusi tersebut. Menurut SPLN Nomor 50 Tahun 1997, transformator dikatakan overload apabila besar pembebanannya melebihi 80 %, atau dalam arti pembebanan trafo yang di izinkan adalah sebesar 80 % dari kapasitasnya. Beban lebih ini terjadi karena adanya pemakaian energi listrik yang tidak sah (penyuntikan/pencurian arus), sambaran petir, dan juga terjadi karena pembebanan yang tidak simetris di tiap fasa.

Pembebanan yang berlebihan akan mengakibatkan kenaikan suhu pada lilitan transformator sehingga mengakibatkan kenaikan suhu juga pada minyak transformator. Beban lebih yang terjadi menyebabkan kualitas isolasi transformator semakin buruk. Dan apabila terus-menerus terjadi dalam jangka panjang, maka akan menyebabkan gagalnya isolasi transformator yang dapat mengakibatkan hubung singkat dan rusaknya transformator. Disisi pelanggan, beban lebih adalah efek buruk bagi pelanggan pengguna listrik.

Sistem Hubungan Wye (Y) dan Delta (Δ)

Sistem Y merupakan sistem sambungan sistem tiga phasa yang menggunakan empat kawat, yaitu R, S, T, dan N. Sistem sambungan tersebut akan menyerupai huruf Y yang memiliki titik empat sambungan, yaitu pada ujung-ujung huruf dan titik pertemuan antara tiga garis pembentuk huruf. Sistem Y dapat dilihat seperti pada gambar 3 bagian (a) dibawah ini.



Gambar 3.7: Sistem Hubungan Y dan Sistem Hubungan Δ

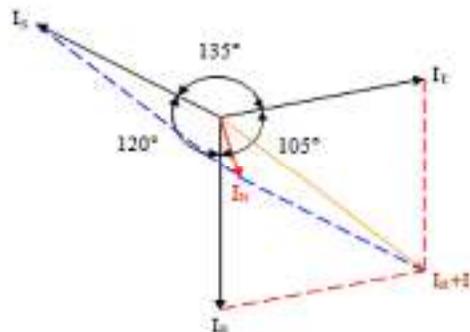
Sistem hubungan atau hubungan Y sering juga disebut sebagai hubungan Bintang. Sedangkan pada sambungan yang lain atau seperti pada gambar diatas bagian (b) disebut dengan Delta (Δ), hanya menggunakan fasa R, S, dan T untuk hubungan dari sumber ke beban, sebagaimana gambar bagian (b) diatas. Tegangan efektif antara fasa umumnya adalah 380 V dan tegangan efektif fasa adalah 220 V.

Ketidakseimbangan Beban

Yang dimaksud dengan keadaan tidak seimbang adalah keadaan dimana salah satu atau kedua syarat keadaan seimbang tidak terpenuhi.

Keadaan tidak seimbang ada tiga yaitu:

1. Ketiga vektor sama besar tetapi tidak membentuk suhu 120° satu sama lain.
2. Ketiga vektor tidak sama besar tetapi membentuk sudut 120° satu sama lain.
3. Ketiga vektor tidak sama dan tidak membentuk sudut 120° satu sama lain.



Gambar 3.8: Vektor Arus Dalam Keadaan Tidak Seimbang

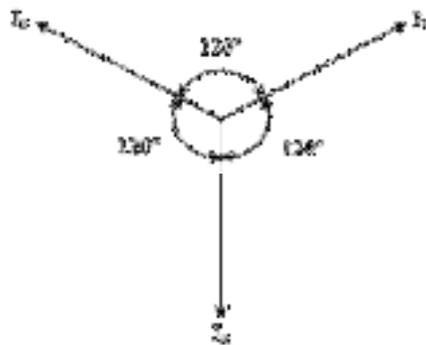
Dari gambar diatas menunjukkan vektor diagram arus dalam keadaan tidak seimbang. Disini terlihat bahwa penjumlahan ketiga vektor arusnya (I_R , I_S , I_T) adalah tidak sama dengan nol sehingga muncul suatu besaran yaitu arus netral (I_N) yang besarnya bergantung pada seberapa besar faktor ketidakseimbangannya.

Pada instalasi listrik yang sudah terpasang terdapat empat kabel (R, S, T dan N) dengan standar warna fasa R (merah), S (kuning), T (hitam), N (biru). Seperti yang terlihat pada gambar dibawah ini:



Gambar 3.9: Panel Transformator

Sedangkan yang dimaksud dengan keadaan seimbang adalah suatu keadaan dimana ketiga vektor arus/ tegangan adalah sama besar. Ketiga vektor saling membentuk sudut 120° satu sama lain, seperti yang terlihat pada gambar dibawah ini.



Gambar 3.10: Vektor Arus Dalam Keadaan Seimbang

Dari gambar di atas menunjukkan vektor diagram arus dalam keadaan seimbang. Disini terlihat bahwa penjumlahan ketiga vektor arusnya (I_R I_S I_T) adalah sama dengan nol, sehingga tidak muncul arus netral.

Arus Netral

Arus netral pada sistem distribusi merupakan arus yang mengalir pada penghantar netral pada sistem tiga fasa empat kawat. Munculnya arus netral dapat disebabkan karena ketidakseimbangan beban dan juga karena adanya arus harmonisa sebagai akibat banyaknya penggunaan beban nonlinear, seperti minyaknya Inverter, Mesin Las dan lain sebagainya.

Arus Netral Karena Beban Tidak Seimbang

Indikator beban tidak seimbang pada sistem tiga fasa adalah adanya arus yang mengalir pada penghantar netral. Arus tersebut merupakan hasil penjumlahan dari arus setiap fasa dengan pembebanan sudur 120 dan sudut yang timbul oleh faktor daya beban. Besarnya arus yang mengalir pada penghantar netral adalah:

$$I_N = \sum I \cos\phi \dots\dots\dots (3.1)$$

$$I_N = I_r \cos\phi_r + I_s \cos(\phi_s + 120^\circ) + I_t \cos(\phi_t + 240^\circ) \dots\dots\dots (3.2)$$

Pada gardu distribusi yang pelanggannya menggunakan motot-motor listrik tiga fasa keseimbangan beban tidaklah menjadi masalah, tetapi pada pelanggan yang mayoritas adalah beban satu fasa maka masalah keseimbangan beban tidak dapat dihindari sama sekali.

Penyaluran dan Losses Daya pada Keadaan Arus Seimbang

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

$$P = 3 [V][I] \cos \varphi \dots\dots\dots (3.3)$$

Daya yang sampai ujung terima akan lebih kecil dari P karena terjadi *losses* dalam saluran. Model ini dibuat dengan asumsi arus pemusatan kapasitif pada saluran cukup kecil sehingga dapat diabaikan. Dengan demikian besarnya arus ujung kirim sama dengan arus di ujung terima.

Losses Akibat Keadaan Arus Tidak Seimbang

Akibat pembebanan di tiap phasa yang tidak seimbang, maka akan mengalir arus pada penghantar netral. Jika di hantaran penghantar netral terdapat nilai tahanan dan dialiri arus maka penghantar netral akan bertegangan yang menyebabkan tegangan pada transformator menjadi tidak seimbang.

Arus yang mengalir disepanjang kawat netral akan menyebabkan rugi-rugi daya besar:

$$\Delta P = I_N^2 R_N \dots\dots\dots (3.4)$$

Faktor Daya

Faktor daya adalah perbandingan antara daya aktif dengan daya semu. Faktor daya atau faktor kerja menggambarkan sudut phasa antara daya aktif dan daya semu. Daya aktif digunakan untuk mengoperasikan beban-beban pelanggan listrik. Daya semu dihasilkan oleh generator pembangkit yang ditransmisikan ke pelanggan listrik. Daya reaktif yang bertambah akan menyebabkan turunnya faktor daya listrik dapat dilakukan dengan memilih beban-beban yang mempunyai faktor daya besar juga dapat dilakukan dengan memasang kapasitor.

Kapasitor adalah komponen listrik yang justru menghasilkan daya reaktif pada jaringan dimana dia tersambung. Pemasangan kapasitor dapat memperbaiki faktor daya, jika faktor daya diperbaiki maka daya reaktif dapat berkurang dan mendekati daya aktif. Suatu beban dengan faktor daya 1.0 merupakan beban yang hanya mengandung nilai resistansi murni dan merupakan pembebanan yang paling efisiensi. Beban dengan faktor daya yang rendah (0.5) merupakan beban yang

mengandung nilai induktansi yang menyebabkan kerugian yang lebih tinggi dalam sistem suplai tenaga listrik.

Faktor daya yang rendah berhubungan dengan beda fasa antara arus dan tegangan pada terminal beban. Sudut fasa arus beban yang rendah biasanya diakibatkan oleh penggunaan beban induksi seperti transformator, motor induksi, lampu TL dan beban elektronik lainnya.

a. Kualitas Daya Listrik (*Power Quality*)

Listrik yang berkualitas adalah listrik yang mempunyai tegangan dan frekuensi yang konstan sesuai dengan nilai nominalnya. Dalam kisaran yang ditentukan frekuensi yang stabil dan sangat dekat dengan nilai nominalnya (dalam sepersekian persen). Permasalahan yang sering terjadi pada kualitas daya listrik (*power quality*) yaitu permasalahan daya listrik yang mengalami penyimpangan baik tegangan, arus dan frekuensi sehingga menimbulkan kegagalan atau kesalahan operasi pada peralatan.

Suplai daya listrik dari generator pembangkit sampai ke beban dioperasikan dalam batas toleransi parameter kelistrikannya seperti tegangan, arus, frekuensi dan bentuk gelombang. Perubahan dan deviasi di luar batas toleransi parameter tersebut sangat berpengaruh terhadap kualitas daya yang menyebabkan operasi tidak efisien dan dapat merusak pangkat.

Kualitas daya dapat dipengaruhi antara oleh jenis beban yang tidak linear, ketidakseimbangan pembebanan, distorsi gelombang harmonik yang melebihi standar dan lain-lain. Perubahan kualitas daya dapat menyebabkan peningkatan rugi-rugi pada sisi beban bahkan menyebabkan penurunan kapasitas daya pada sumber pembangkit (generator).

b. Pengertian Daya Listrik

Daya memiliki adalah energi per satuan waktu. Daya merupakan jumlah energi listrik yang digunakan untuk melakukan usaha di dalam sistem tenaga listrik. Satuan untuk daya listrik umumnya adalah Watt (W). Daya

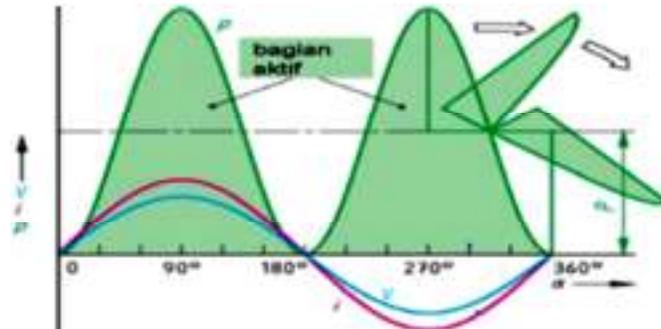
pada suatu sistem tegangan bolak-balik (AC) dikenal dengan tiga macam yaitu daya aktif (nyata) dengan simbol P satuannya adalah Watt (W), daya reaktif dengan simbol (Q), satuannya adalah Volt Ampere Reaktif (VAR) dan daya semu dengan simbol (S) dan satuannya adalah Volt Ampere (VA).

c. Macam-macam Jenis Daya Listrik

1. Daya Aktif (P)

Daya aktif adalah daya yang sesungguhnya dibutuhkan oleh beban. Satuan daya reaktif adalah W (*Watt*) dan dapat diukur dengan menggunakan alat ukur *Wattmeter*.

Daya aktif pada beban yang bersifat *resistansi* (R), dimana tidak mengandung induktor grafik gelombang *tegangan* (V) dan arus se fasa, sehingga besar daya sebagai perkalian tegangan dan arus menghasilkan dua gelombang yang keduanya bernilai positif. Besarnya daya aktif adalah P. Sisa puncak dibagi menjadi dua untuk mengisi celah-celah kosong sehingga kedua rongga terisi oleh dua puncak yang mengisinya.



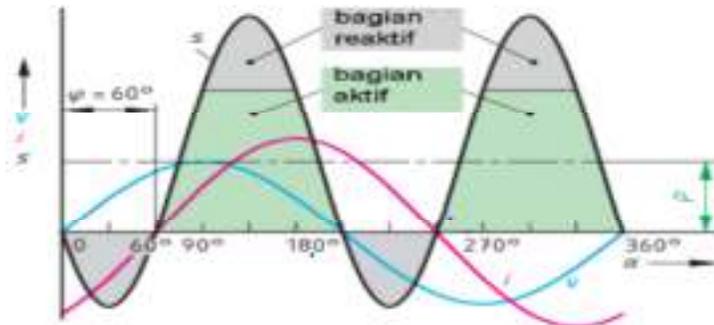
Gambar 3. 11: Gelombang Daya Aktif Pada Beban Yang Bersifat Resistansi

$$\begin{aligned}
 P &= \frac{1}{2} \times P_m \dots\dots\dots (3.5) \\
 &= \frac{1}{2} \times V_m \times I_m \\
 &= \frac{1}{2} \times \sqrt{2} \times V \times \sqrt{2} \times I \\
 P &= V \times I \dots\dots\dots (3.6)
 \end{aligned}$$

Dimana:

- P = Daya Aktif (W)
- P_m = Daya maksimum (W)
- I_m = Arus listrik maksimum (A)
- V_m = Tegangan maksimum (V)
- V = Tegangan (V)
- I = Arus (A)

Daya aktif pada beban *impedansi* (Z), beban impedansi pada suatu rangkaian disebabkan oleh beban yang bersifat *resistansi* (R) dan *induktansi* (L). Maka gelombang mendahului gelombang arus sebesar φ . Perkalian gelombang tegangan dan gelombang arus menghasilkan dua puncak positif yang besar dan dua puncak negatif yang kecil. Pergeseran sudut fasa bergantung seberapa besar nilai dari komponen induktornya.



Gambar 3.12 : Gelombang Daya Aktif Dengan Beban Impedansi (Gelombang Tegangan Mendahului Arus Sebesar $\varphi = 60^\circ$)

Persamaan daya aktif (P) pada beban yang bersifat impedansi:

$$P = V \times I \times \cos \varphi \dots\dots\dots (3.7)$$

Dimana:

- P = Daya Aktif (W)
- V = Tegangan (V)
- I = Arus (A)
- $\cos \varphi$ = Faktor daya

2. Daya Reaktif (Q)

Daya reaktif adalah daya yang dibutuhkan untuk pembentukan medan magnet atau daya yang ditimbulkan oleh beban yang bersifat *induktif*. Satuannya daya reaktif adalah VAR (*Volt Ampere Reaktif*). Untuk menghemat daya reaktif dapat dilakukan dengan memasang kapasitor pada rangkaian yang memiliki beban bersifat *induktif*. Hal serupa sering dilakukan pada pabrik-pabrik yang menggunakan motor banyak menggunakan beban berupa motor-motor listrik.

Persamaan daya reaktif adalah:

$$Q = V \times I \times \sin \varphi \dots\dots\dots (3.8)$$

Dimana :

Q = Daya Reaktif (VAR)

V = Tegangan (V)

I = Arus (A)

$\sin \varphi$ = Faktor reaktif

3. Daya Semu (S)

Daya semu adalah daya yang dihasilkan oleh perkalian antara tegangan dan arus dalam suatu jaringan atau daya yang merupakan hasil penjumlahan trigonometri daya aktif dan reaktif. Daya semu adalah daya yang dikeluarkan sumber tegangan bolak-balik (AC) atau di serap oleh beban. Satuan dari daya semu adalah Volt Ampere (VA). Berikut persamaan dari daya semu:

$$S = V \times I \dots\dots\dots (3.9)$$

Dimana:

S = Daya Semu (VA)

V = Tegangan (V)

I = Arus (A)

Tabel 3.1: Persamaan Segitiga Daya			
No	Nama Daya	Rumus	Satuan
1	Daya Aktif (P)	$P = V \cdot I \cdot \cos\phi$	Watt
2	Daya Reaktif (Q)	$Q = V \cdot I \cdot \sin\phi$	VAR
3	Daya Semu (S)	$S = V \cdot I$	VA

Losses Pada Jaringan Distribusi

Yang dimaksud *losses* adalah perbedaan antara energi listrik yang disalurkan (P_S) dengan energi listrik yang terpakai (P_P)

$$Losses = (P_S - P_P) / P_S \dots\dots\dots (3.10)$$

Dimana :

P_S = Energi yang disalurkan (Watt)

P_P = Energi yang dipakai (Watt)

Losses Pada Penghantar Phasa

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

$$\Delta V = \sqrt{3} \cdot I (R \cos \varphi + X \sin \varphi) l \dots\dots\dots (3.11)$$

$$\Delta P = 3 \cdot I^2 \cdot R l \dots\dots\dots (3.12)$$

Dengan:

- I = Arus Per Phasa (Ampere)
- R =Tahanan Pada Penghantar (Ohm/ km)
- X = Reaktansi Pada Penghantar (Ohm/ km)
- cos φ = Faktor Daya Beban
- l = Panjang Penghantar (km)

Losses Akibat Adanya Arus Netral Pada Penghantar Netral

Akibat pembebanan di tiap phasa yang tidak seimbang, maka akan mengalir arus pada penghantar netral. Jika dihantaran pembebanan netral terdapat nilai tahanan dan dialiri arus, maka kawat netral akan bertegangan yang menyebabkan tegangan pada transformator tidak seimbang. Arus yang mengalir disepanjang kawat netral, akan menyebabkan rugi daya di sepanjang kawat netral sebesar:

$$P_N = I_N R_N \dots\dots\dots (3.13)$$

Dimana:

- P_N = Losses Yang Timbul Pada Penghantar Netral (Watt)
- I_N = Arus Yang Mengalir Melalui Kawat Netral (Ampere)
- R_N = Tahanan Pada Kawat Netral (Ohm)

Losses Akibat Arus Netral Ke Tanah

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

$$P_G = I_G^2 R_G \dots\dots\dots (3.14)$$

Dimana:

- 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 (Ohm)

Persamaan-persamaan yang Digunakan dalam Perhitungan

Persamaan-persamaan yang digunakan untuk menganalisa pengaruh ketidakseimbangan beban terhadap arus netral dan *losses* pada transformator distribusi adalah sebagai berikut:

Perhitungan Arus Beban Penuh dan Arus Hubung Singkat

Telah diketahui bahwa daya transformator distribusi bila ditinjau dari sisi tegangan tinggi (*primer*) dapat diketahui sebagai berikut:

$$S = \sqrt{3} \cdot V \cdot I \dots\dots\dots (3.15)$$

Dimana:

- S = Daya Transformator (kVA)
- V = Tegangan Sisi *Primer* Transformator (kV)
- I = Arus Jala-Jala (A)

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

$$I_{FL} = \frac{S}{\sqrt{3}V} \dots\dots\dots (3.16)$$

Dimana:

- I_{FL} = Arus Beban Penuh (A)
- S = Daya Transformator (kVA)
- V = Tegangan Sisi *Sekunder* Transformator (kV)

Dengan demikian untuk menghitung persentase pembebanannya adalah sebagai berikut:

$$\%b = \frac{I_{ph}}{I_{FL}} \times 100\% \dots\dots\dots (3.17)$$

Dimana:

- %b = Persentase Pembebanan (%)
- I_{ph} = Arus Fasa (A)
- I_{FL} = Arus Beban Penuh (A)

Perhitungan Ketidakseimbangan Beban pada Tiap Fasa

Analisa ketidakseimbangan beban yang ada pada transformator dengan menggunakan persamaan koefisien a, b, dan c dapat diketahui besarnya, dimana arus fasa dalam keadaan seimbang (I) dengan besarnya rata-rata ($I_{rata-rata}$):

$$I_{rata-rata} = \frac{IR+IS+IT}{3} \dots\dots\dots (3.18)$$

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

$$a = \frac{IR}{I} \dots\dots\dots (3.19)$$

$$b = \frac{IS}{I} \dots\dots\dots (3.20)$$

$$c = \frac{IT}{I} \dots\dots\dots (3.21)$$

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

$$U_L = \frac{[(a-1)+(b-1)+(c-1)]}{3} 100\% \dots\dots\dots (3.22)$$

Saluran Udara Tegangan Rendah (SUTR)

Saluran ini merupakan penghantar yang ditempatkan diatas tiang. Ada dua jenis penghantar yang digunakan, yaitu penghantar tidak berisolasi (Kawat/Tembaga) dan penghantar berisolasi (Kabel).

Penghantar tidak berisolasi mempunyai kelemahan, seperti rawan pencurian dan dan rawan terjadi gangguan fasa ke fasa maupun fasa ke netral. Tetapi memiliki keunggulan harga yang relatif murah dan mudah dalam pengusutan gangguan. Sedangkan penghantar berisolasi memiliki keuntungan dan kerugian yang saling berlawanan dengan penghantar tidak berisolasi.

Pada umumnya PT. PLN (Persero) menggunakan SUTR dengan isolasi (kabel pilin) dengan inti aluminium. Standar ukuran kabel yang digunakan adalah $3 \times 70 + 1 \times 50 \text{ mm}^2$.

3.12. Metode yang Digunakan dalam Penanganan Masalah Overload pada Transformator Distribusi PG61-1 Jl. Siborongborong/Kantor Camat

Pada pembahasan ini, peneliti akan membahas tentang salah satu transformator distribusi yang mengalami *overload* (beban lebih). Penelitian dilakukan dengan survei ke lapangan secara langsung dan mengambil data serta mencatat data yang dianggap perlu oleh pihak PLN Siborong-borong.

Dalam penanganan masalah *overload* kali ini metode yang digunakan oleh pihak PT. PLN (Persero) ULP Siborongborong adalah *Metode Penyisipan* Trafo, yaitu dengan menambah sebuah Trafo dengan kapasitas 100 kVA untuk membantu Trafo sebelumnya agar tidak terjadi lagi *Overload*.

