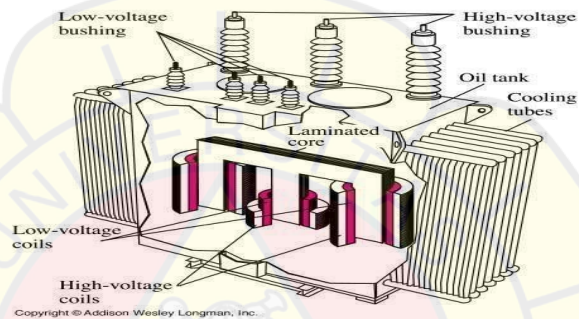


BAB II

TRANSFORMATOR DAN KOMPONEN SIMETRIS

2.1 Transformator

Trafo adalah suatu alat listrik statis yang berfungsi mengubah arus bolak – balik atau energi listrik dari tegangan rendah ke tegangan tinggi atau sebaliknya berdasarkan prinsip elektromagnetik pada frekuensi tertentu. Penggunaan transformator dalam jaringan listrik memungkinkan tegangan disesuaikan sesuai kebutuhan (Djufri, 2021).



Gambar 2.1 Transformator

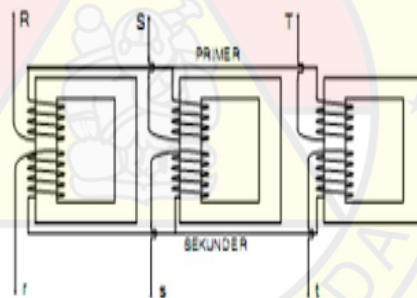
Transfer energi listrik antara dua sirkuit dapat terjadi ketika kebutuhan listrik antara sirkuit tersebut berbeda. Perbedaan ini disebabkan oleh perubahan tegangan arus dalam rangkaian. Oleh karena itu, peralihan harus digunakan untuk mengakomodasi impedansi yang ada antara sirkuit tak sinkron dalam suatu sirkuit. Pemindahan energi listrik ini pada akhirnya menghasilkan tegangan yang lebih stabil di dua sirkuit atau lebih. Oleh karena itu, transformator sangat penting dalam menyalurkan energi listrik dalam suatu rangkaian (Djufri, 2021).

2.2 Transformator Tiga Fasa

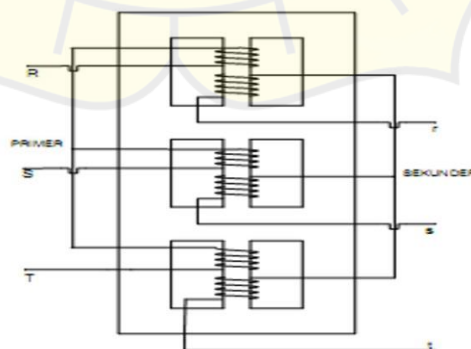
Pada prinsipnya trafo tiga fasa sama dengan trafo satu fasa, perbedaannya seperti sistem listrik satu fasa dengan listrik tiga fasa, yaitu mengenal sistem bintang (Y) dan segitiga (Δ), serta sistem zig-zag (Z), dan juga sistem angka jam yang sangat menentukan untuk kerja paralel trafo tiga fasa. Untuk menganalisa trafo daya tiga fasa, dilakukan dengan menganggap trafo tiga fasa sebagai trafo satu fasa. Teknik perhitungannya sama, hanya untuk nilai akhir biasanya parameter arus, tegangan dan daya trafo tiga fasa dikaitkan dengan $\sqrt{3}$. (Djufri, 2021)

Trafo tiga fasa dari segi konstruksi sama dengan trafo satu fasa yaitu terdiri dari jenis inti dan cangkang. Trafo tiga fasa digunakan karena pertimbangan ekonomis di mana penggunaan inti besi jauh lebih sedikit dibandingkan penggunaan tiga buah trafo satu fasa menjadi satu trafo tiga fasa yang tersusun dari tiga trafo satu fasa, ketiga trafo tersebut harus identic karena akan berakibat fatal. Apalagi kalau kapasitas trafo tersebut cukup besar.

Pada pembangkitan tenaga listrik dan distribusinya sampai ke konsumen dilakukan dalam sistem tiga fasa. Trafo tiga fasa dibutuhkan pada pembangkitan untuk menaikkan tegangan dari tegangan pembangkit menjadi tegangan transmisi. Pada sistem distribusi juga digunakan untuk menurunkan tegangan transmisi menjadi tegangan distribusi. Trafo tiga fasa digunakan untuk tegangan sistem di bawah 230 kV. Sedangkan untuk tegangan di atas 230 kV dapat menggunakan satu trafo tiga fasa yang tersusun dari tiga buah trafo satu fasa karena masalah pengangkutan dari pabrik ke lokasi pemasangan. (Djufri, 2021)



Gambar 2.2 Konstruksi Transformator Tiga Fasa Tipe Inti



Gambar 2.3 Transformator Tiga Fasa Tipe Cangkang

2.3 Konstruksi Transformator Tiga Fasa

Secara umum, semua jenis transformator memiliki komponen utama yang terdiri dari inti besi yang dililit oleh dua kumparan penghantar, yaitu kumparan primer dan kumparan sekunder. Namun, transformator dengan tegangan 150-20 kV dilengkapi dengan komponen tambahan, seperti peralatan bantu dan peralatan proteksi. Berikut ini adalah bagian-bagian utama dari transformator tiga fasa.

2.3.1 Inti Besi Transformator

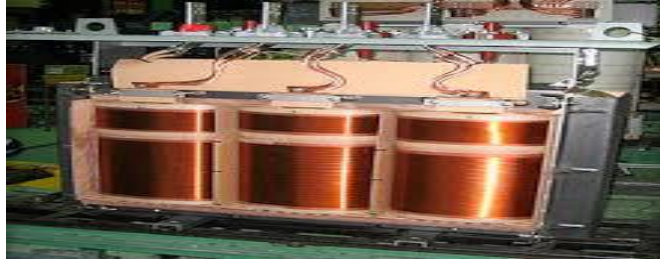
Inti besi berfungsi mempermudah jalan fluks yang ditimbulkan oleh arus listrik yang melalui kumparan. Inti besi dibuat dari lempengan – lempengan besi tipis yang berisolasi untuk mengurangi panas sebagai rugi – rugi besi yang ditimbulkan oleh arus Eddy. (Hastungkoro, Wicaksono, & Widodo, 2019)



Gambar 2.4 Inti Besi Transformator Tiga Fasa

2.3.2 Kumparan Transformator

Beberapa lilitan kawat berisolasi membentuk sebuah kumparan yang kemudian diberikan isolasi, baik terhadap inti besi maupun kumparan lainnya, menggunakan bahan isolasi padat seperti karton dan pertinax. Pada trafo umumnya terdapat dua jenis kumparan, yaitu kumparan primer dan sekunder. Ketika kumparan primer dialiri tegangan atau arus bolak-balik, akan terbentuk fluks magnetik yang menginduksi tegangan pada kumparan sekunder. Jika rangkaian sekunder tertutup, arus akan mengalir melalui kumparan ini. Dengan demikian, kumparan tersebut berfungsi sebagai media untuk mentransformasikan tegangan dan arus. (Hastungkoro, Wicaksono, & Widodo, 2019)



Gambar 2.5 Kumparan Transformator Tiga Fasa

2.3.3 Minyak Trafo

Minyak transformator merupakan salah satu jenis isolasi cair yang berfungsi sebagai bahan isolasi sekaligus pendingin pada transformator. Sebagai bahan isolasi, minyak trafo memiliki kemampuan untuk menahan tegangan tembus, sedangkan sebagai pendingin, minyak ini harus dapat menyerap dan meredam panas yang dihasilkan selama operasi. Dengan demikian, minyak transformator berperan penting dalam melindungi transformator dari gangguan dan menjaga kinerjanya tetap optimal. (Hastungkoro, Wicaksono, & Widodo, 2019)

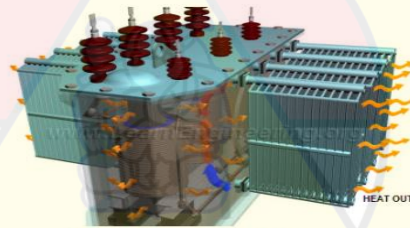
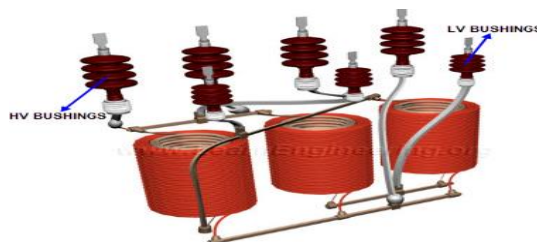


Fig.10 Coolant oil circulation in the transformer is depicted in this figure

Gambar 2.6 Minyak Transformator Tiga Fasa

2.3.4 Bushing

Kumparan trafo dihubungkan ke jaringan luar melalui bushing, yaitu konduktor yang diselimuti oleh isolator. Bushing berfungsi sebagai jalur konduksi antara kumparan dan tangki transformator, sekaligus sebagai pelindung hubungan singkat antara kawat bertegangan dengan tangki trafo. (Hastungkoro, Wicaksono, & Widodo, 2019)



Gambar 2.7 Bushing Transformator Tiga Fasa

2.3.5 Konservator

Secara umum, komponen transformator yang terendam minyak berada di dalam tangki. Untuk mengakomodasi pemuaian minyak akibat perubahan suhu, tangki dilengkapi dengan konservator yang berfungsi sebagai wadah cadangan minyak trafo. (Hastungkoro, Wicaksono, & Widodo, 2019)



Gambar 2.8 Konservator Transformator Tiga Fasa

2.3.6 Peralatan Bantu Transformator Tiga Fasa

Peralatan bantu trafo berfungsi membantu kinerja trafo agar semakin efisien dan andal. Berikut alat bantu pada transformator.

2.3.6.1 Pendingin

Panas akan timbul pada inti besi dan kumparan transformator akibat rugi-rugi tembaga. Jika panas ini menyebabkan kenaikan suhu yang berlebihan, isolasi di dalam transformator dapat mengalami kerusakan. Oleh karena itu, transformator dilengkapi dengan sistem pendingin untuk membuang panas ke lingkungan. Media pendingin yang digunakan dapat berupa udara, gas, minyak, atau air, tergantung pada jenis dan kapasitas trafo. (Hastungkoro, Wicaksono, & Widodo, 2019)



Gambar 2.9 Pendingin Transformator

2.3.6.2 Tap Charger

Tap changer adalah perangkat yang digunakan untuk mengubah perbandingan transformasi guna menyesuaikan tegangan sekunder agar tetap stabil meskipun terjadi fluktuasi pada tegangan primer. *Tap changer* hanya dapat beroperasi saat transformator dalam kondisi tanpa beban disebut *Off Load Tap Changer*, sedangkan yang dapat beroperasi saat transformator masih beroperasi disebut *On Load Tap Changer*. (Hastunggoro, Wicaksono, & Widodo, 2019)



Gambar 2.10 Tap Charger Transformator

2.3.6.3 Alat pernapasan

Oleh karena pengaruh naik turunnya baik beban trafo maupun suhu udara luar, suhu minyak pun akan berubah – ubah mengikuti keadaan tersebut. Apabila suhu minyak tinggi, minyak akan memuai dan mendesak udara di atas permukaan minyak keluar dari dalam tangki. Sebaliknya, apabila suhu minyak turun, minyak akan menyusut dan udara luar akan masuk ke dalam tangki.

Kedua proses tersebut disebut pernapasan trafo. Permukaan minyak trafo akan selalu bersinggungan dengan udara luar yang menurunkan nilai tegangan tembus minyak trafo. Untuk mencegah hal tersebut, pada ujung pipa penghubung udara luar dilengkapi tabung berisi kristal zat *hygroskopis*. (Hastunggoro, Wicaksono, & Widodo, 2019)



Gambar 2.11 Silicagel Transformator

2.3.6.4 Indikator

Untuk mengawasi selama trafo beroperasi, perlu adanya indikator pada trafo. Pada trafo terdapat indikator suhu minyak, indikator permukaan minyak, indikator sistem pendingin, dan indicator kedudukan tap. (Hastunggoro, Wicaksono, & Widodo, 2019)



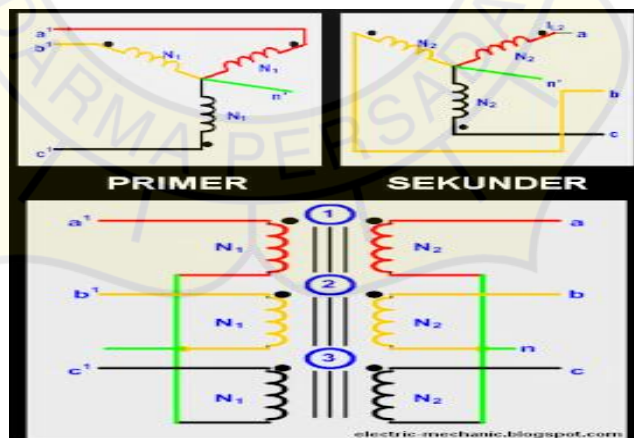
Gambar 2.12 Indikator Minyak Transformator

2.4 Konfigurasi Transformator Tiga Fasa

Pada prinsipnya metode atau cara merangkai belitan kumparan di sisi primer dan sekunder trafo umumnya dikenal tiga cara untuk merangkainya, yaitu hubungan bintang, hubungan delta, dan hubungan zig – zag. (Djufri, 2021)

2.4.1 Trafo Hubung Bintang – Bintang (Y-Y)

Pada jenis ini ujung pada masing – masing terminal dihubungkan secara bintang. Titik netral dijadikan satu. Hubungan dari tipe ini lebih ekonomis untuk arus nominal yang kecil pada trafo tegangan tinggi. (Djufri, 2021)



Gambar 2.13 Trafo Hubungan Bintang Bintang

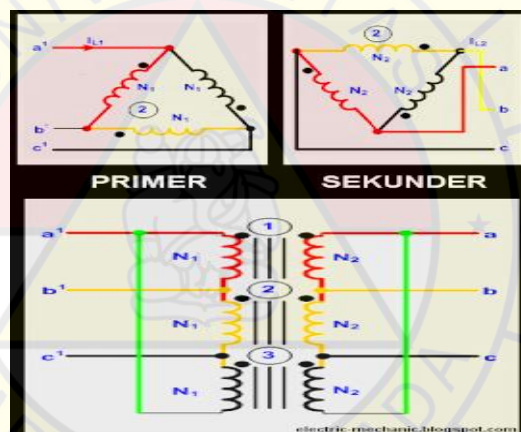
Pada hubungan bintang – bintang, rasio tegangan fasa – fasa (L-L) pada primer dan sekunder adalah sama dengan rasio setiap trafo. Sehingga, terjadi

pergeseran fasa sebesar 30 antara tegangan fasa – netral (L-N) dan tegangan fasa – fasa (L-L) pada sisi primer dan sekundernya. (Djufri, 2021)

Hubungan bintang – bintang ini akan sangat baik jika pada kondisi beban seimbang. Karena, pada kondisi beban seimbang menyebabkan arus netral akan sama dengan nol. Dan apabila terjadi kondisi tidak seimbang maka akan ada arus netral yang kemudian dapat menyebabkan timbulnya rugi. (Djufri, 2021)

2.4.2 Trafo Hubung Delta – Delta ($\Delta - \Delta$)

Pada jenis ini ujung fasa dihubungkan dengan ujung netral kumparan lain yang secara keseluruhan akan terbentuk hubungan delta – delta. Hubungan ini umumnya digunakan pada sistem yang menyalurkan arus besar pada tegangan rendah dan yang paling utama saat keberlangsungan dari pelayanan harus dipelihara meskipun salah satu fasa mengalami kegagalan (Djufri, 2021).



Gambar 2.14 Trafo Hubungan Delta Delta

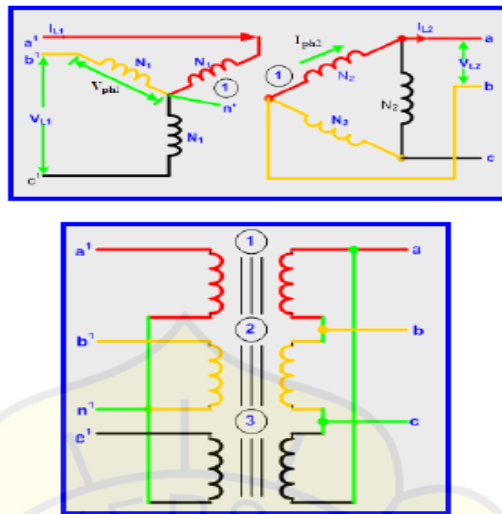
Pada trafo hubungan delta – delta, tegangan kawat ke kawat dan tegangan fasa sama untuk sisi primer dan sekunder trafo ($V_{rs} = V_{st} = V_{tr} = V_{LN}$). (Djufri, 2021).

2.4.3 Trafo Hubung Bintang – Delta (Y- Δ)

Pada hubung ini, kumparan fasa sisi primer dirangkai secara Bintang (wye) dan sisi sekundernya dirangkai delta. Umumnya digunakan pada trafo untuk jaringan transmisi di mana tegangan nantinya diturunkan.

Perbandingan tegangan jala – jala $1/\sqrt{3}$ kali perbandingan lilitan trafo. Tegangan sekunder tertinggal 300 dari tegangan primer. Tegangan kawat ke kawat

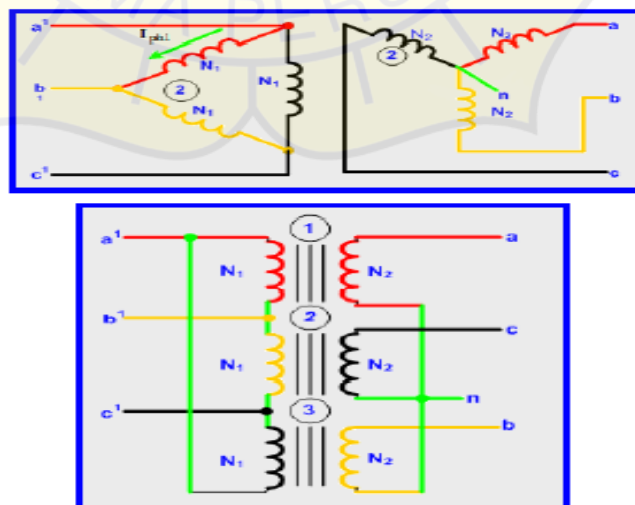
primer sebanding dengan tegangan fase primer, dan tegangan kawat ke kawat sekunder sama dengan tegangan fase. (Djufri, 2021)



Gambar 2.15 Trafo Hubungan Bintang Delta

2.4.4 Trafo Hubung Delta – Bintang

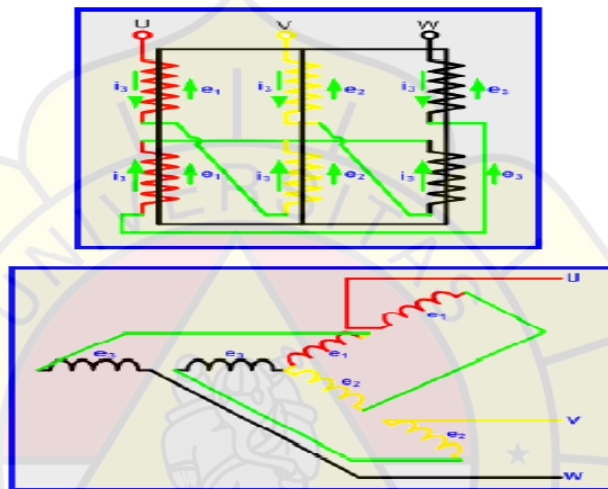
Pada hubung iini, sisi primer trafo dirangkai secara delta sedangkan pada sisi sekundernya merupakan rangkaian bintang segitiga pada sisi sekundernya terdapat titik netral. Biasanya digunakan untuk menaikkan tegangan pada awal sistem transmisi tegangan tinggi. Dalam hubungan ini perbandingan tegangan 3 kali perbandingan lilitan trafo dan tegangan sekunder sebesar 30° dari tegangan primernya. (Djufri, 2021)



Gambar 2.16 Trafo Hubungan Delta Bintang

2.4.5 Trafo Hubung Zig – Zag

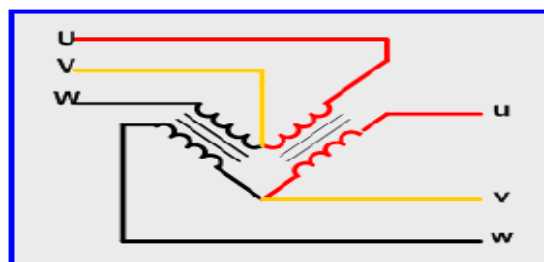
Kebanyakan trafo distribusi selalu dihubungkan bintang, salah satu syarat yang harus dipenuhi oleh trafo tersebut adalah ketiga fasanya harus diusahakan seimbang. Apabila beban tidak seimbang akan menyebabkan timbulnya tegangan titik bintang yang tidak diinginkan, karena tegangan pada peralatan yang digunakan pemakai akan berbeda – beda. Untuk menghindari terjadinya tegangan titik bintang, diantaranya adalah dengan menghubungkan sisi sekunder dalam hubungan zig – zag. (Djufri, 2021)



Gambar 2.17 Trafo Hubungan Zig Zag

2.4.6 Trafo Hubung Open Delta

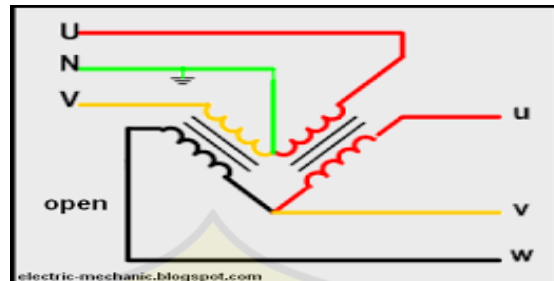
Ini dimungkinkan untuk mentransformasi sistem tegangan tiga fasa hanya menggunakan dua buah trafo yang terhubung secara open delta. Hubungan open delta identic dengan hubungan delta – delta tetapi salah satu trafo tidak dipasang. Hubungan ini jarang digunakan karena *load capacity* nya hanya 86.6% dari kapasitas terpasangnya. (Djufri, 2021)



Gambar 2.18 Trafo Hubungan Open Delta

2.4.7 Trafo Hubung Open Y – Open Delta

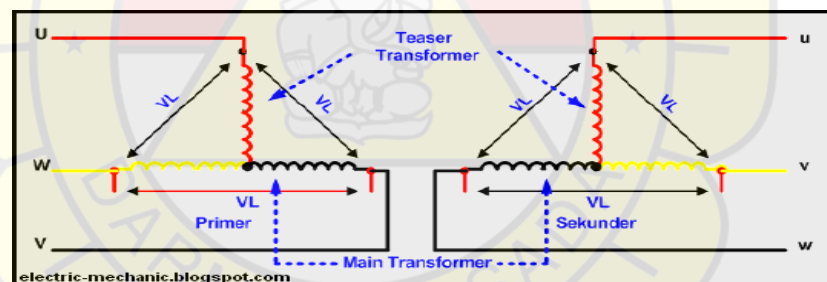
Hubungan open Y – open delta terdapat perbedaan dari hubungan V-V karena penghantar titik Tengah pada sisi primer dihubungkan ke netral. Hubungan ini bisa digunakan pada trafo distribusi. (Djufri, 2021)



Gambar 2.19 Trafo Hubungan Open Y Open Delta

2.4.8 Trafo Hubung Scott atau T – T

Hubungan ini merupakan transformasi tiga fasa ke tiga fasa dengan bantuan dua buah trafo. Salah satu trafo mempunyai *Centre Taps* pada sisi primer dan sekundernya disebut *Main Transformers*. (Djufri, 2021)

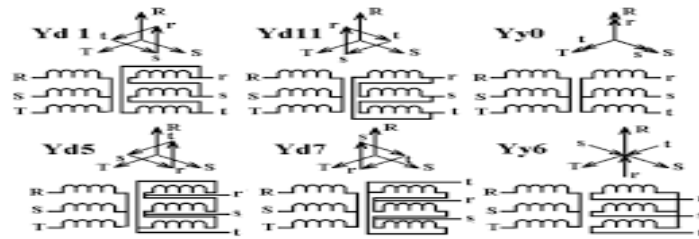


Gambar 2.20 Trafo Hubungan Scott

2.5 Vektor Grup Transformator Tiga Fasa

Vektor grup trafo dinyatakan dalam bilangan jam (searah jarum jam). Tiap satu bilangan jam mewakili beda sudut 30° . Vektor grup menentukan pergeseran sudut arus pada belitan primer dan sekunder. (Djufri, 2021)

Trafo tiga fasa memiliki beberapa macam konfigurasi belitan. Apabila dilihat dari jenis penyusunan belitan antarfasa maka ada dua macam tipe belitan yaitu belitan wye (star) dan belitan delta. Sedangkan berdasarkan pergeseran sudut fasa antara arus pada kumparan primer dan kumparan sekunder maka ada beberapa macam tipe jenis belitan. (Djufri, 2021)



Gambar 2.21 Tipe Belitan Trafo Tiga Fasa Berdasarkan Pergeseran Fasa

2.6 Sistem Tiga-Fasa Tidak Seimbang

Dalam sistem tiga-fasa seimbang, besar tegangan adalah sama disemua fasa dan antara fasa yang berurutan terdapat 120°. Demikian pula halnya dengan arus; keadaan ini membuat arus di penghantar netral bernilai nol. Tidak demikian halnya dengan keadaan tidak seimbang; tegangan dan arus di setiap fasa tidak sama dan beda fasa antar tegangan fasa-netral tidak 120°. Berikut kemungkinan keadaan tidak seimbang pada transformator yaitu. (Sudirham, 2012)

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

2.6.1 Komponen Simetris

Komponen simetris untuk menganalisis terutama sistem yang tidak seimbang, saat terjadi hubung singkat tiga fasa, dua fasa dan satu fasa ke tanah. Dimana sebuah sistem tak seimbang diubah menjadi tiga rangkaian persamaan yaitu rangkaian urutan positif, negatif, dan nol. (Suswanto, 2009)

Suatu sistem tak seimbang yang terdiri dari *n* fasor yang berhubungan dapat diuraikan menjadi *n* buah sistem dengan fasor seimbang yang dinamakan komponen-komponen simetris dari fasor aslinya. *n* buah fasor pada setiap himpunan komponennya adalah sama panjang dan sudut di antara fasor yang bersebelahan dalam himpunan itu sama besarnya. Tegangan di setiap fasa sistem tak-seimbang dapat ditulis sebagai.

$$V_a = V_a \angle \alpha_a \dots\dots\dots(2-1a)$$

$$V_b = V_b \angle \alpha_b \dots\dots\dots(2-1b)$$

$$V_c = V_c \angle \alpha_c \dots\dots\dots(2-1c)$$

Dimana:

V_a = fasa R

V_b = fasa S

V_c = fasa T

α_a = sudut fasa R

α_b = sudut fasa S

α_c = sudut fasa T

Menurut teorema Fortescue, tiga fasor tak seimbang dari sistem tiga fasa dapat diuraikan menjadi tiga sistem fasor yang seimbang. Himpunan seimbang itu adalah:

1. Komponen Urutan Positif

Fasor tiga-fasa seimbang dengan selisih sudut fasa 120° . Tiga fasor yang sama besarnya, terpisah satu dengan yang lain dalam fasa sebesar 120° , dan mempunyai urutan fasa yang sama seperti fasor aslinya, dimana fasa b tertinggal 120° terhadap fasa a , dan fasa c tertinggal 240° terhadap fasa a .

Komponen positif dari fasor tak seimbang itu adalah abc , dan diberi indeks

1. Komponen positif dari V_a, V_b, V_c adalah V_{a1}, V_{b1}, V_{c1} . (Sudirham, 2012)

2. Komponen Urutan Negatif

Fasor tiga-fasa seimbang dengan selisih sudut fasa 120° . Terdiri dari tiga fasor yang sama besarnya, terpisah satu sama dengan yang lain dalam fasa sebesar 120° , dan mempunyai urutan fasa yang berlawanan dengan fasor aslinya, dimana fasa c tertinggal 120° terhadap fasa a , dan fasa b tertinggal 240° . Urutan negatif dari fasor tak seimbang itu adalah acb , dan diberi indeks

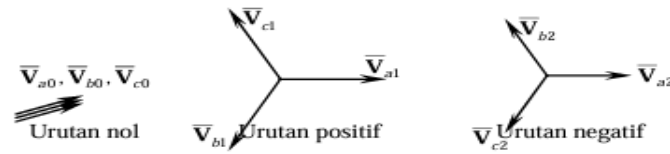
2. Komponen negatif dari V_a, V_b, V_c adalah V_{a2}, V_{b2}, V_{c2} . (Sudirham, 2012)

3. Komponen Urutan Nol

Komponen urutan nol adalah fasor tiga-fasa tanpa selisih sudut fasa. Terdiri dari tiga fasor yang sama besarnya, terpisah satu dengan yang lain dalam fasa sebesar 0° atau 360° , dimana fasa b dan c sefasa dengan fasa a . Komponen urutan nol diberi indeks 0. Jadi, V_{a0}, V_{b0}, V_{c0} . (Sudirham, 2012)

Dengan komponen simetris ini maka pernyataan tegangan semula (yang tidak seimbang) menjadi;

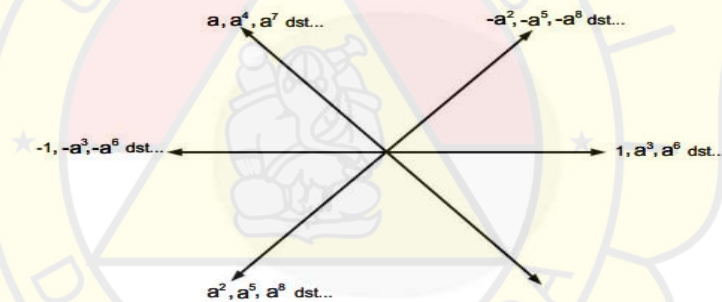
$$\left. \begin{aligned} V_a &= V_{a0} + V_{a1} + V_{a2} \\ V_b &= V_{b0} + V_{b1} + V_{b2} \\ V_c &= V_{c0} + V_{c1} + V_{c2} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(2.2)$$



Gambar 2.22 Komponen Seimbang Dari Fasor Tegangan 3 Fasa Tak-Seimbang

2.6.2 Operator α

Karena adanya pergeseran fasa pada komponen simetris tegangan dalam sistem tiga – fasa, huruf α digunakan untuk menunjukkan operator yang menyebabkan perputaran sebesar 120° dalam arah yang berlawanan dengan arah jarum jam. Operator semacam ini adalah bilangan kompleks yang besarnya satu dan sudutnya 120° dan didefinisikan sebagai berikut. (Sudirham, 2012)



Gambar 2.23 Diagram Fasor Berbagai Pangkat Dari Operator α

Penulisan komponen urutan dilakukan dengan memanfaatkan operator α , fasor satuan tersebut berbentuk.

$$\alpha = 1\angle 120^\circ = \cos 120^\circ + j\sin 120^\circ = -0,5 + j0,866 \dots\dots\dots(2-3a)$$

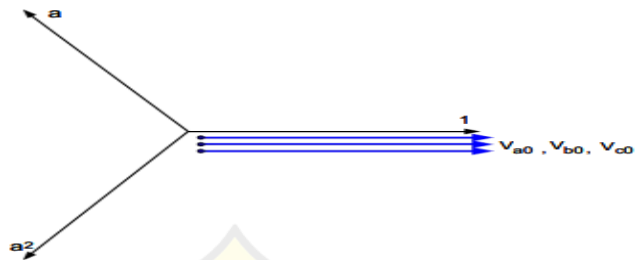
$$\alpha^2 = 1\angle 240^\circ = \cos 240^\circ + j\sin 240^\circ = -0,5 - j0,866 \dots\dots\dots(2-3b)$$

$$\alpha^3 = 1\angle 360^\circ = \cos 360^\circ + j\sin 360^\circ = 1 + j0 \dots\dots\dots(2-3c)$$

Suatu fasor apabila dikalikan dengan α akan menjadi fasor lain yang berputar ke arah positif sebesar 120° dan jika dikalikan dengan α^2 akan berputar ke arah positif sebesar 240° , operator ini yaitu operator $j = 1\angle 90^\circ$. Kemudian memanfaatkan operator α untuk menuliskan urutan positif dan negatif. (Sudirham, 2012)

Untuk menentukan tegangan fasa terhadap ketiga komponen simetris dengan bantuan operator maka dapat dibuat suatu vektor hubungan antara komponen simetris dan operator yaitu. (Sudirham, 2012)

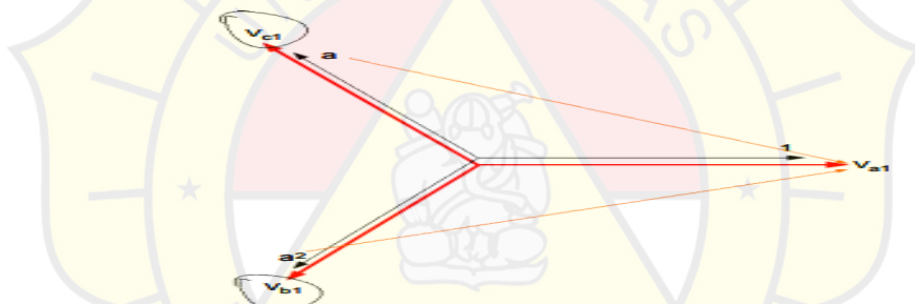
1. Komponen Urutan Nol



Gambar 2.24 Vektor Hubungan Terhadap Urutan Nol

$$\left. \begin{matrix} V_{b0} = V_{a0} \\ V_{c0} = V_{a0} \end{matrix} \right\} \dots\dots\dots(2-4)$$

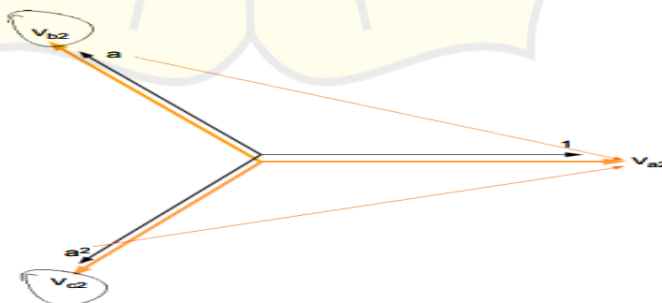
2. Komponen Urutan Positif



Gambar 2.25 Vektor Hubungan Terhadap Urutan Positif

$$\left. \begin{matrix} V_{b1} = \alpha^2 \cdot V_{a1} \\ V_{c1} = \alpha \cdot V_{a1} \end{matrix} \right\} \dots\dots\dots(2-5)$$

3. Komponen Urutan Negatif



Gambar 2.26 Vektor Hubungan Terhadap Urutan Negatif

$$\left. \begin{matrix} V_{b2} = \alpha \cdot V_{a2} \\ V_{c2} = \alpha^2 \cdot V_{a2} \end{matrix} \right\} \dots\dots\dots(2-6)$$

Dengan mensubstitusikan persamaan (2-5) sampai (2-7) diatas ke dalam persamaan awal didapatkan.

$$V_a = V_{a0} + V_{a1} + V_{a2} \dots \dots \dots (2-7a)$$

$$V_b = V_{a0} + a^2 V_{a1} + a V_{a2} \dots \dots \dots (2-7b)$$

$$V_c = V_{a0} + a V_{a1} + a^2 V_{a2} \dots \dots \dots (2-7c)$$

Persamaan (2-7) dalam bentuk matriks;

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{a0} \\ V_{a1} \\ V_{a2} \end{bmatrix} \dots \dots \dots (2-8)$$

2.6.3 Mencari Komponen Simetris

Komponen simetris adalah besaran – besaran hasil olah matematik, komponen simetris tidak diukur dalam praktek, yang terukur adalah besaran – besaran yang tak seimbang yaitu V_a, V_b, V_c . Komponen simetris dapat dicari persamaan (2-8) dengan menjumlahkan fasor – fasor dengan $(1 + \alpha + \alpha^2) = 0$, yaitu. (Sudirham, 2012)

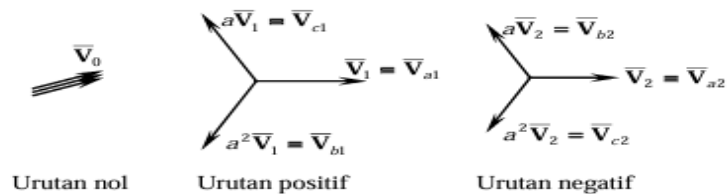
$$V_{a0} = \frac{1}{3} (V_a + V_b + V_c) \dots \dots \dots (2-9a)$$

$$V_{a1} = \frac{1}{3} (V_a + \alpha V_b + a^2 V_c) \dots \dots \dots (2-9b)$$

$$V_{a2} = \frac{1}{3} (V_a + a^2 V_b + \alpha V_c) \dots \dots \dots (2-9c)$$

Persamaan (2-9) dalam bentuk matriks;

$$\begin{bmatrix} V_{a0} \\ V_{a1} \\ V_{a2} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_A \\ V_B \\ V_C \end{bmatrix} \dots \dots \dots (2-10)$$



Gambar 2.27 Penulisan komponen urutan dengan menggunakan operator a

2.6.4 Magnitude Komponen Simetris

Magnitude komponen simetris merupakan modulus atau nilai mutlak dari bilangan kompleks atau nilai besar vektor tegangan dan arus pada masing – masing komponen simetris, yaitu komponen positif, negatif, dan nol. Magnitude dihitung menggunakan rumus:

$$|V| = \sqrt{(Re)^2 + (Im)^2} \dots\dots\dots(2-11)$$

Dimana:

$|V|$ = Magnitude

Re = Bagian Real dari bilangan kompleks

Im = Bagian Imaginer dari bilang kompleks

2.6.5 Argument Komponen Simetris

Argument komponen simetris menggambarkan posisi fasa dari tegangan atau arus pada masing – masing komponen simetris terhadap acuan tertentu dalam sistem koordinat polar. Sudut ini dihitung dari bagian real dan imajiner dari tegangan atau arus kompleks menggunakan persamaan:

$$\theta = \tanh^{-1} \left(\frac{Im}{Re} \right) \dots\dots\dots(2-12)$$

Dimana:

θ = Sudut atau argument dari bilangan kompleks

Re = Bagian Real dari bilangan kompleks

Im = Bagian Imaginer dari bilang kompleks

2.7 Ketidakseimbangan Tegangan

Ketidakseimbangan tegangan hanya terjadi pada jaringan distribusi tiga fasa, yaitu adanya selisih tegangan antar fasa yang cukup besar. Ketidakseimbangan tegangan ini umumnya terjadi karena pembebanan masing – masing fasa yang tidak merata. Ketidakseimbangan tegangan dapat mengakibatkan kerja motor tiga fasa menjadi tidak optimal, panas berlebihan karena rugi dayanya bertambah, bahkan bisa terbakar. Dengan demikian keseimbangan beban perlu dijaga agar ketidakseimbangan tegangan pada jaringan tiga fasa tidak melebihi batas toleransi. (Suripto, 2017).

Ketidakseimbangan tegangan 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. Ketidakseimbangan tegangan menyebabkan timbulnya tegangan urutan negatif dan urutan nol. Menurut SPLN D5.004-1:2012 untuk nilai ketidakseimbangan tegangan yaitu 2%. (PLN, 2012)

$$KT = \frac{V^-}{V^+} \times 100\% \dots\dots\dots(2-13)$$

Dimana:

KT = Ketidakseimbangan Tegangan

V^- = Tegangan Urutan Negatif Komponen Simetris

V^+ = Tegangan Urutan Positif Komponen Simetris

