

BAB II

LANDASAN TEORI

2.1 Transformator

Transformator merupakan suatu alat listrik statis yang dapat memindahkan dan mengubah tegangan dan arus bolak-balik dari suatu atau lebih rangkaian listrik yang lain dengan nilai yang sama maupun berbeda besarnya pada frekuensi yang sama, melalui gandingan magnet dan berdasarkan prinsip induksi elektromagnetik. Pada umumnya transformator terdiri atas sebuah inti yang terbuat dari besi berlapis, dan dua buah kumparan, yaitu kumparan primer dan kumparan sekunder. Rasio perubahan tegangan akan tergantung dari rasio jumlah lilitan pada kumparan itu. Biasanya kumparan terbuat dari kawat tembaga atau aluminium yang dililitkan pada kaki inti transformator.

Transformator digunakan secara luas baik dalam bidang tenaga listrik maupun elektronika. Penggunaan transformator dalam sistem tenaga memungkinkan terpilihnya tegangan yang sesuai dan ekonomis untuk tiap-tiap keperluan misalnya, kebutuhan akan tegangan tinggi dalam pengiriman dalam pengiriman daya jarak jauh. Penggunaan transformator yang sangat sederhana dan handal merupakan salah satu alasan penting dalam pemakaiannya pada penyaluran tenaga listrik arus bolak balik, karena arus bolak balik sangat banyak digunakan untuk pembangkitan dan penyaluran tenaga listrik pada penyaluran tenaga listrik arus bolak balik terjadi kerugian energi sebesar $I^2.R$ watt. Kerugian ini akan banyak

berkurang apabila tegangan dinaikan setinggi mungkin. 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 biasanya sebesar 6 kV – 20 kV pada awal transmisi ke tegangan saluran transmisi antara 100 kV - 1000 kV, kemudian menurunkannya lagi pada ujung akhir saluran ke tegangan yang lebih rendah.

Transformator yang dipakai pada jaringan tenaga listrik merupakan transformator tenaga. Di samping itu ada jenis-jenis transformator lain yang banyak dipergunakan dan pada umumnya merupakan transformator yang jauh lebih kecil. Misalnya transformator yang dipakai di rumah tangga untuk menyesuaikan tegangan dari lemari es dengan tegangan yang berasal dari jaringan listrik umum, transformator yang dipakai pada lampu TL dan transformator – transformator “mini” yang digunakan pada berbagai alat elektronika, seperti penerima radio, televisi dan sebagainya.

2.2 Prinsip Kerja Transformator

Transformator terdiri atas dua kumparan (primer dan sekunder) yang bersifat induktif. Kedua kumparan ini terpisah secara elektris namun berhubungan secara magnetis melalui jalur yang memiliki reluctance (reluctance) rendah. apabila kumparan primer dihubungkan dengan sumber

tegangan bolak-balik maka fluks bolak-balik akan muncul di dalam inti yang dilaminasi, karena kumparan tersebut membentuk jaringan tertutup maka mengalirlah arus primer. Akibatnya 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 magnet di kumparan sekunder, maka mengalirlah arus sekunder jika rangkaian sekunder dibebani, sehingga energi listrik dapat di transfer keseluruhan (secara magnetisasi).

$$E = -N \frac{d\phi}{dt} \text{ Volt} \dots\dots\dots (2.1)$$

Dimana : E = gaya gerak listrik (ggl) volt

N = jumlah lilitan

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

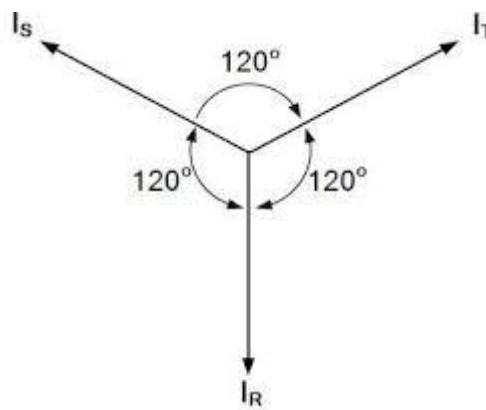
Perlu di ingat bahwa hanya tegangan listrik bolak-balik yang dapat ditransformasikan oleh transformator, sedangkan dalam bidang elektronika transformator digunakan sebagai gandengan impedansi antara sumber daya beban untuk menghambat arus searah sambil tetap melakukan arus bolak-balik antara rangkaian. Tujuan utama menggunakan inti pada transformator adalah untuk mengurangi reluktansi (tahanan magnetis) rangkaian magnetis (*common magnetic circuit*).

1.3 Ketidakseimbangan Beban

1.3.1 Pengertian Tentang Beban Tidak Seimbang

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 2.1 di bawah ini :



Gambar 2.1 Vektor Diagram Arus Keadaan Seimbang

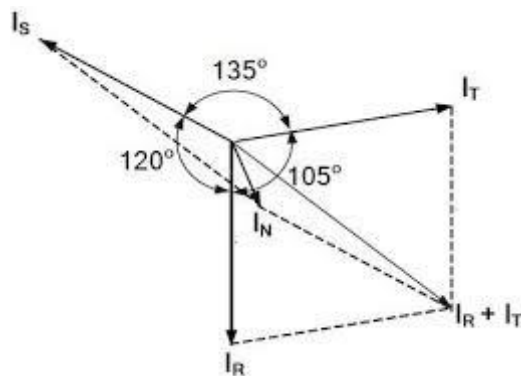
(sumber : Julius S., Tabrani Machmudsyah., Julianto.)

Dari gambar di atas menunjukkan vektor diagram arus dalam keadaan seimbang. Di sini terlihat bahwa penjumlahan ketiga vektor arusnya (I_R , I_S , I_T) Adalah sama dengan nol. Sehingga tidak muncul

arus netral. Sedangkan yang di maksud dengan keadaan tidak seimbang adalah keadaan dimana salah satu atau kedua syarat keadaan seimbang tidak terpenuhi. Kemungkinan keadaan tidak seimbang ada tiga yaitu :

- ketiga vektor sama besar tetapi tidak membentuk sudut 120° satu sama lain
- ketiga vektor tidak sama besar tetapi membentuk sudut 120° satu sama lain
- ketiga vektor tidak sama besar dan tidak membentuk sudut 120° satu sama lain.

Seperti yang terlihat pada gambar 2.2 di bawah ini :



Gambar 2.2 Vektor Diagram Arus Keadaan Tidak Seimbang

(sumber : Julius S., Tabrani Machmudsyah., Julianto.)

Dari gambar di atas menunjukkan vektor diagram arus dalam keadaan tidak seimbang. Di sini 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.

2.4 Arus Netral

Arus netral dalam sistem distribusi tenaga listrik di kenal sebagai arus yang mengalir pada kawat netral di sistem distribusi tegangan rendah tiga fasa empat kawat arus netral netral ini muncul jika :

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

Arus yang mengalir pada kawat netral yang tidak seimbang dapat juga diselesaikan dengan menggunakan metode komponen simetris.

2.4.1 Arus Netral Karena Beban Tidak Seimbang

Untuk arus tiga fasa dari suatu sistem yang tidak seimbang dapat juga di selesaikan dengan menggunakan metode komponen simetris. Dengan menggunakan notasi-notasi yang sama seperti pada tegangan akan di dapatkan persamaan-persamaan untuk arus-arus fasanya sebagai berikut :

$$I_a = I_1 + I_2 + I_0 \dots\dots\dots(2.2)$$

$$I_b = a^2 I_1 + a I_2 + I_0 \dots\dots\dots(2.3)$$

$$I_c = a^2 I_1 + a^2 I_1 + I_0 \dots\dots\dots(2.4)$$

Dengan tiga langkah yang telah dijabarkan dalam menentukan tegangan urutan positif, urutan negative, dan urutan nol

terdahulu, maka arus-arus urutan juga dapat ditentukan dengan cara yang sama, sehingga kita dapatkan juga :

$$I_1 = 1/3(I_a + I_b + a^2 I_c) \dots\dots\dots(2.5)$$

$$I_2 = 1/3(I_a + a^2 I_b + a I_c) \dots\dots\dots(2.6)$$

$$I_0 = 1/3(I_a + I_b + I_c) \dots\dots\dots(2.7)$$

Disini terlihat bahwa arus urutan nol (I_0) adalah merupakan sepertiga dari arus netral atau sebaliknya akan menjadi nol jika dalam sistem tiga fase empat kawat ini jumlah arus saluran sama dengan arus netral yang sama kembali lewat kawat netral, menjadi :

$$I_1 = I_a + I_b + I_c \dots\dots\dots(2.8)$$

Dengan mensubstitusikan persamaan (2.7) ke (2.8) maka di peroleh :

$$I_N = 3 I_0 \dots\dots\dots(2.9)$$

Dalam sistem tiga fasa empat kawat ini jumlah arus dalam satuan sama dengan netral yang kembali lewat kawat netral. Jika arus-arus fasanya seimbang maka arus netralnya akan bernilai nol, tapi jika arus-arus fasanya tidak seimbang maka akan ada arus yang mengalir di kawat netral sistem (arus netral akan mempunyai nilai dalam arti tidak nol).

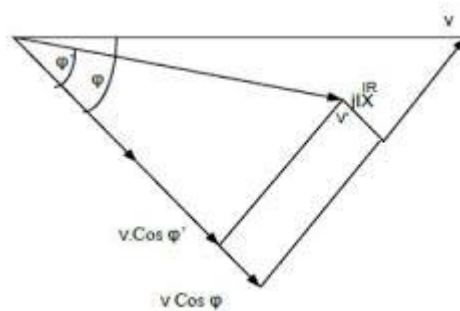
2.4.2 Penyaluran dan susut daya pada keadaan arus seimbang

Misalkan daya sebesar P di salurkan melalui suatu saluran dengan penghantar netral. Apabila pada penyaluran daya ini arus-

arus fasa dalam keadaan seimbang, maka besarnya daya dapat dinyatakan sebagai berikut :

$$P = \sqrt{3} \cdot V \cdot I \cdot \cos \varphi \dots\dots\dots(2.10)$$

Daya yang sampai ujung terima akan lebih kecil dari P karena terjadi penyusutan dalam saluran. Penyusutan daya ini dapat diterangkan dengan menggunakan diagram fasor tegangan saluran model fasa tunggal seperti pada gambar 2.3 di bawah ini :



Gambar 2.3 Diagram Fasor Tegangan Saluran Daya Model Fasa Tunggal.

(sumber : Julius S.,Tabrani Machmudsyah., Julianto.)

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. Apabila tegangan dan faktor faktor daya pada ujung terima berturut-turut adalah V' dan φ' , maka faktor faktor besarnya daya pada ujung terima adalah :

$$P' = \sqrt{3} \cdot V \cdot I \cos \varphi' \dots\dots\dots(2.11)$$

Selisih antara P pada persamaan (2.10) dan P' pada persamaan (2.11) memberikan susut daya saluran yaitu :

$$P_{losses} = \sqrt{3} \cdot V \cdot I^2 \dots\dots\dots(2.12)$$

$$= \sqrt{3} \cdot V \cdot I \cos \varphi \sqrt{3} \cdot V \cdot I \cos \varphi \dots\dots\dots(2.13)$$

$$= \sqrt{3} \cdot V \cdot I \cdot \{[V] \cos \varphi \sqrt{3} \cdot [V \cdot I] \cos \varphi\} \dots\dots\dots(2.14)$$

Sementara itu dari gambar 2.3 memperlihatkan bahwa,

$$\{[V] \cos \varphi - [V'] \cos \varphi'\} = [I]R \dots\dots\dots(2.15)$$

Dengan R adalah tahanan kawat penghantar tiap fasa, oleh karena itu persamaan (2.15) berubah menjadi :

$$P_{losses} = \sqrt{3} \cdot I^2 \cdot R \dots\dots\dots(2.16)$$

Dengan R adalah tahanan kawat penghantar tiap fasa, oleh karena itu persamaan (2.15) berubah menjadi :

$$P_{losses} = \sqrt{3} \cdot I^2 \cdot R \dots\dots\dots(2.17)$$

2.4.3 Penyaluran Dan Susut Daya Pada Keadaan Arus Tidak Seimbang

Jika [I] adalah besaran arus fasa dalam penyaluran daya sebesar P pada keadaan seimbang, maka pada penyaluran daya yang sama tetapi tidak seimbang besarnya arus-arus fasa dapat dinyatakan dengan koefisien a, b, dan c adalah sebagai berikut :

$$[I_R] = a[I] \dots\dots\dots(2.18)$$

$$[I_S] = b[I] \dots\dots\dots(2.19)$$

$$[I_T] = c[I] \dots\dots\dots(2.20)$$

Dengan I_R, I_S dan I_T berturut adalah arus fasa R, S dan T. Telah disebutkan di atas bahwa faktor daya ketiga fasa dianggap sama walaupun besarnya arus berbeda-beda. Dengan anggapan seperti ini besarnya daya yang di salurkan dapat dinyatakan sebagai :

$$P = (a + b + c). V. I \cos \varphi \dots\dots\dots(2.21)$$

Apabila persamaan (2.19) dan persamaan (2.20) menyatakan daya yang besarnya sama, maka dari kedua persamaan tersebut dapat diperoleh persyaratan koefisien a,b dan c adalah :

$$a+b+c=3 \dots\dots\dots(2.22)$$

Dengan anggapan yang sama, arus yang mengalir di penghantar netral dapat dinyatakan sebagai :

$$I_N = I_R + I_S + I_T \quad (2.23)$$

$$= [I] \{ a + b \cos (-120) + j.b.\sin(-120) + j.c.\sin(120) \} \dots\dots(2.24)$$

$$= [I] \{ a - (b+c)/2 + j.(c-b)\sqrt{3}/2 \} \dots\dots\dots(2.25)$$

Susut daya saluran adalah jumlah susut pada penghantar fasa dan penghantar netral adalah :

$$PI' = \{ [I_R]^2 + [I_T]^2 + [I_S]^2 \}. R + [I_N]^2 . R_N = \dots\dots\dots(2.26)$$

$$= (a^2 + b^2 + c^2) [I]^2 R + a^2 + b^2 + c^2 - ab - ac - bc) [I_N]^2 . R_N \dots\dots(2.27)$$

Dengan R_N adalah tahanan penghantar netral. Apabila persamaan (2.25) disubstitusikan ke persamaan (2.26) maka akan diperoleh akan diperoleh

$$PI' = \{9-2(ab+ac+bc) [I]^2 R + (9-3(ab+ac+bc)) \} [I_N]^2 \cdot R_N \dots\dots(2.28)$$

Persamaan (2.27) ini adalah persamaan susut daya saluran untuk saluran dengan penghantar netral. Apabila tidak ada penghantar netral maka kedua ruas kanan akan hilang sehingga susut daya akan menjadi :

$$PI' = \{9-2(ab+ac+bc) [I]^2 R \dots\dots\dots(2.29)$$

2.4.4 Faktor Daya

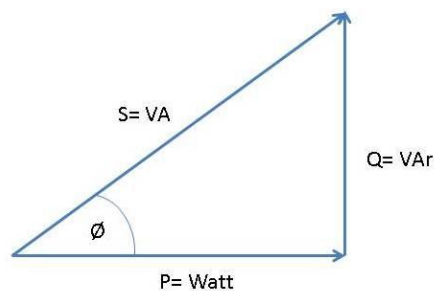
Pengertian factor daya ($\cos \phi$) adalah perbandingan antara daya aktif (P) dan daya semu (S). dari pengertian tersebut, factor daya tersebut dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$\text{Factor daya} = (\text{Daya Aktif} / \text{Daya Semu})$$

$$= (P / S)$$

$$= V.I. \cos \phi / V.I)$$

$$= \cos \phi$$



Gambar 2.4 Segitiga Daya

$$\text{Daya Semu} = V.I \text{ (VA)} \dots\dots\dots(2.30)$$

$$\text{Daya Aktif} = V.I \cos \phi \text{ (Watt)} \dots\dots\dots(2.31)$$

$$\text{Daya Reaktif} = V.I \sin \phi \text{ (VAr)} \dots\dots\dots(2.32)$$

2.5 **Losses Pada Jaringan distribusi**

Yang dimaksud *losses* adalah perbedaan antara energy listrik yang disalurkan (P_s) dengan energy listrik yang terpakai (P_p).

Dimana:

P_s = energy yang disalurkan (*watt*)

P_p = energy yang dipakai (*watt*)

$$\text{Losses} = (P_s - P_p) / P_s \dots\dots\dots(2.33)$$

2.5.1 **Losses Pada Penghantar Phasa**

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

$$\Delta V = \sqrt{3} I (R \cos \phi + X \sin \phi) l \dots\dots\dots(2.34)$$

$$\Delta P = \sqrt{3} I^2 R l \dots\dots\dots(2.35)$$

Dengan:

I = arus per Phasa (*Ampere*)

R = Tahanan pada penghantar (*Ohm / km*)

X = Reaktansi pada penghantar (*Ohm / km*)

$\cos \phi$ = Faktor daya beban

l = Panjang Penghantar (km)

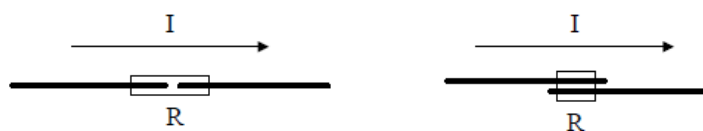
2.5.2 Losses Akibat Adanya Arus Netral Pada Penghambat Netral

Akibat pembebanan di tiap fasa yang tidak seimbang, maka akan mengalir arus pada penghantar netral. Jika di hantaran pertahanan netral terdapat nilai tahanan dan dialiri arus, maka kawat netral akan bertegangan yang menyebabkan tegangan pada trafo tidak seimbang. Arus yang mengalir di sepanjang kawat netral akan menyebabkan rugi daya di sepanjang kawat.

2.5.3 Losses Akibat Arus Netral yang Mengalir ke Tanah

Losses ini terjadi karena di sepanjang jaringan tegangan rendah terdapat beberapa sambungan antara lain:

1. Sambungan saluran jaringan tegangan rendah dengan kabel NYFGBY
2. Percabangan saluran jaringan tegangan rendah
3. Tercabangan untuk sambungan pelayanan



Gambar 2.5 sambungan kabel besarnya rugi-rugi daya pada sambungan dirumuskan:

$$P = I^2 R \dots\dots\dots(2.36)$$

Dimana:

$P = \text{Losses yang timbul pada Konektor (Watt)}$

$I = \text{arus yang mengalir melalui konektor (Ampere)}$

$R = \text{Tahanan konektor (Ohm)}$

2.6 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:

2.6.1 Perhitungan Arus Beban Penuh

Telah diketahui bahwa daya transformator distribusi bila ditinjau dari sisi

tegangan tinggi (primer) dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$S = \sqrt{3} \cdot V \cdot I \dots\dots\dots(2.37)$$

$S = \text{Daya Transformator (kVA)}$

$V = \text{Tegangan Sisa Primer Transformator (kV)}$

$I = \text{Arus Jala-jala (A)}$

Dengan demikian untuk menghitung arus beban penuh (*Full Load*) dapat menggunakan rumus:

$$I_{FL} = \frac{S}{\sqrt{3}V} \dots\dots\dots(2.38)$$

$I_{FL} = \text{Arus Beban Penuh (A)}$

$S = \text{Daya Transformator (kVA)}$

$V = \text{Tegangan Sisi Sekunder Tranformator (kV)}$

Sedangkan untuk menghitung arus hubung singkat pada transformator digunakan rumus:

$$I_{SC} = \frac{S \cdot 100}{\%Z \sqrt{3} V} \dots\dots\dots(2.39)$$

I_{SC} = Arus Hubung Singkat (A)

S = Daya Tranformator (kVA)

V = Tegangan Sisi Sekunder Transformator (kV)

$\%Z$ = Persen Impedansi Transformator

Dengan demikian untuk persentase pembebanannya adalah sebagai berikut:

$$\%b = \frac{I_{ph}}{I_{FL}} 100\% \dots\dots\dots(2.40)$$

$\%b$ = Persentase Pembebanan (%)

I_{ph} = Arus Fasa (A)

I_{FL} = Arus Beban Penuh (A)

Perhitungan Ketidakseimbangan Beban

$$I_{Rata-rata} = \frac{I_R + I_S + I_T}{3} \dots\dots\dots(2.41)$$

dimana besarnya arus fasa dalam keadaan seimbang (I) sama dengan

besarnya arus rata-rata, maka koefisien a, b dan c diperoleh

dengan:

$$a = \frac{I_R}{I} \dots\dots\dots(2.42)$$

$$b = \frac{I_S}{I} \dots\dots\dots(2.43)$$

$$c = \frac{I_T}{I} \dots\dots\dots(2.44)$$

pada keadaan seimbang, koefisien a, b dan c adalah I. dengan demikian rata

rata ketidakseimbangan beban (dalam %) adalah:

$$= \frac{\{|a-1|+|b-1|+|c-1|\}}{3} 100\% \dots\dots\dots(2.45)$$

2.6.2 Perhitungan *Losses* (rugi-rugi) Akibat Adanya Arus Netral Pada Penghantar Netral

Sebagai akibat dari ketidakseimbangan beban antara tiap-tiap fasa pada sisi sekunder trafo (fasa R, fasa S dan fasa T) mengalirlah arus di netral trafo. Arus yang mengalir pada penghantar netral trafo ini menyebabkan *losses* (rugi-rugi). Dan losses pada penghantar netral dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$P_N = I_N^2 R_N \dots\dots\dots(2.46)$$

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)

2.6.3 *Losses* Akibat Arus Netral yang Mengalir Ke Tanah

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

$$P_G = I_G^2 R_G \dots\dots\dots(2.47)$$

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)

Daya Aktif pada trafo menggunakan rumus berikut :

$$P = S \times \cos \varphi \dots\dots\dots(2.48)$$