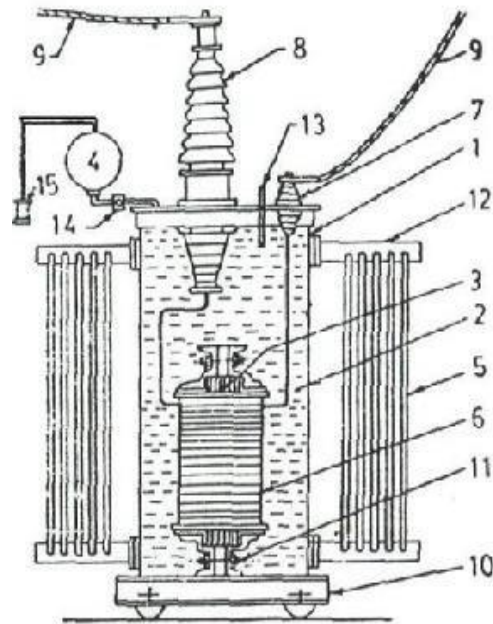


BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Umum

Transformator adalah suatu peralatan tenaga listrik yang berfungsi untuk menyalurkan tenaga atau daya listrik dari tegangan tinggi ke tegangan rendah atau sebaliknya. Dalam operasi penyaluran tenaga listrik transformator dapat dikatakan jantung dari distribusi. Dalam kondisi ini suatu transformator diharapkan dapat beroperasi secara maksimal (kalau bisa secara terus menerus tanpa berhenti). Mengingat kerja keras dari suatu transformator seperti itu, maka cara pemeliharaan juga dituntut sebaik mungkin. Oleh karena itu transformator harus dipelihara dengan menggunakan sistem dan peralatan yang benar, baik dan tepat. Berdasarkan tegangan operasinya dapat dibedakan menjadi transformator 500/150 kV dan 150/70 kV biasa disebut *Interbus Transformator* (IBT). Transformator 150/20 kV dan 70/20 kV disebut juga trafo distribusi. Adapun konstruksi umum dari transformator distribusi ditunjukkan pada gambar di halaman selanjutnya :



Gambar 2.1 Konstruksi Transformator Distribusi

Keterangan :

1. *Mounting flange*
2. *Tangki transformator*
3. *Core*
4. *Konservator*
5. *Sirip Radiator*
6. *Windings*
7. *Low Voltage Bushing*
8. *High Voltage Bushing*
9. *Terminal connection*
10. *Carriage*
11. *Baut pada core*

- 12. *Header*
- 13. Termometer
- 14. Relai *Buchholz*
- 15. *Breather*

2.2 Gardu Distribusi

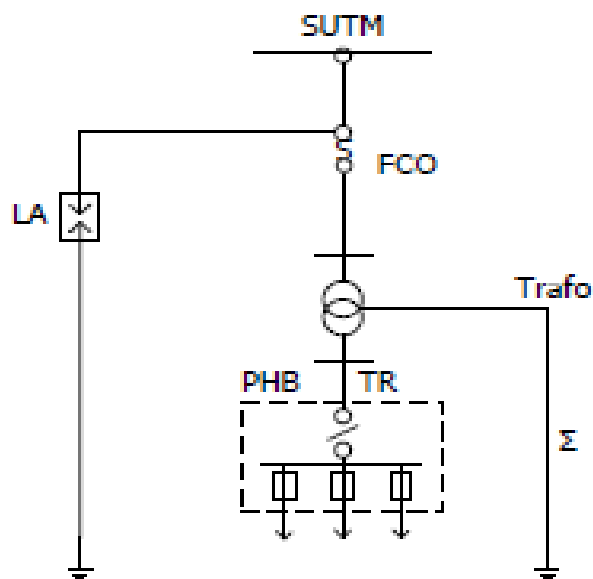
Gardu Distribusi adalah bangunan gardu transformator yang memasok kebutuhan tenaga listrik bagi para pemanfaat baik dengan Tegangan Menengah maupun Tegangan Rendah. Gardu Distribusi merupakan kumpulan / gabungan dari perlengkapan hubung bagi baik Tegangan Menengah dan Tegangan Rendah. Jenis perlengkapan hubung bagi Tegangan Menengah pada Gardu Distribusi berbeda sesuai dengan jenis konstruksi gardunya. Jenis konstruksi gardu dibedakan atas 2 jenis :

- a. Gardu Distribusi konstruksi pasangan luar. Umumnya disebut Gardu Portal (Konstruksi 2 tiang), Gardu Cantol (Konstruksi 1 tiang) dengan kapasitas transformator terbatas.
- b. Gardu Distribusi pasangan dalam. Umumnya disebut gardu beton (*Masonry Wall Distribution Substation*) dengan kapasitas transformator besar.

2.2.1 Gardu Distribusi Pasangan Luar

Konstruksi Gardu Distribusi pasangan luar tipe portal terdiri atas Fused Cut Out (FCO) sebagai pengaman hubung singkat trafo dengan elemen pelebur/fuse link type expulsion dan Lightning

Arrester (LA) sebagai sarana pencegah naiknya tegangan pada transformator akibat surja petir. Elektroda pembumian dipasang pada masing-masing lightning arrester dan pembumian titik netral transformator sisi Tegangan Rendah. Kedua elektroda pembumian tersebut dihubungkan dengan penghantar yang berfungsi sebagai ikatan penyama potensial yang digelar di bawah tanah.



Gambar 2.2 Bagan Satu Garis Gardu Distribusi Portal

Pada gardu distribusi tipe cantol, transformator yang terpasang adalah jenis *completely Self Protected Transformer* (CSP). Perlengkapan perlindungan transformator tambahan adalah lightning arrester. Pada transformator tipe CSP fasa 1, penghantar pembumian arrester dihubung langsung dengan badan transformator. Konstruksi pembumian sama dengan gardu portal. Perlengkapan hubung bagi Tegangan Rendah maksimum 2 jurusan

dengan saklar pemisah pada sisi masuk dan pengaman lebur (type NH, NT) sebagai pengaman jurusan. Semua bagian konduktif terbuka dihubungkan dengan pembumian sisi Tegangan Rendah. Nilai pengenalan LA 5 kA untuk posisi di tengah jaringan dan 10 kA untuk posisi pada akhir jaringan. Nilai tahanan pembumian tidak melebihi 1 Ohm.

2.2.2 Rating Nh-Fuse Dengan Acuan Kapasitas Trafo

Menghitung arus NH,fuse dapat dilakukan dengan perhitungan sebagai berikut :

$$I_n = \frac{P}{V \times \sqrt{3}}$$

Dimana:

I_n = arus (A)

P = Daya (VA)

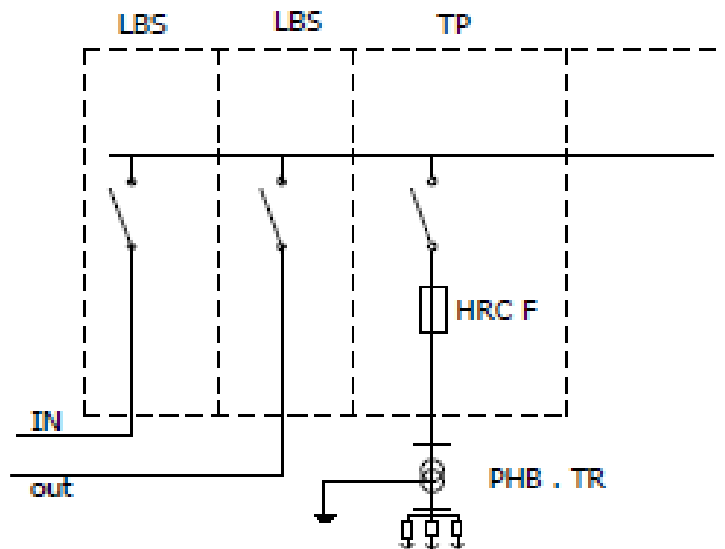
V = Tegangan (Volt)

$$\text{Arus tiap jurusan} = \frac{I_n}{\text{Jumlah Banyaknya Jurusan}}$$

*faktor kali 0,9 adalah faktor keamanan untuk beban trafo.

2.2.3 Gardu Distribusi Pasangan Dalam

Gardu distribusi pemasangan dalam adalah gardu konstruksi beton dengan kapasitas transformator besar, dipakai untuk daerah padat beban tinggi dengan konstruksi instalasi yang berbeda dengan gardu pasangan luar. Gardu beton dipasang dari baik jaringan saluran udara ataupun saluran kabel tanah.



Gambar 2.3 Bagan Satu Garis Gardu Distribusi Beton

2.3 Bagian Utama Transformator Distribusi

2.3.1 Inti Besi

Berfungsi untuk mempermudah jalan *fluksi*, yang ditimbulkan oleh arus listrik yang melalui kumparan. Dibuat dari lempengan-lempengan besi tipis yang berisolasi, untuk mengurangi panas (sebagai rugi-rugi besi) yang ditimbulkan oleh *Eddy Current*.

Inti trafo dibentuk dari lapisan lembaran pelat besi silikon yang memiliki lapisan isolasi sangat tipis pada salah satu sisinya, yang

tahan terhadap panas tinggi serta mempunyai koefisien penyebaran panas yang rendah, dengan ketebalan yang sangat tipis untuk dapat menekan rugi-rugi inti yang semakin kecil. Disusun sedemikian rupa sehingga membentuk suatu luasan inti magnetis yang kokoh serta efisien.

2.3.2 Kumparan Transformator

Adalah beberapa lilitan kawat berisolasi yang membentuk suatu kumparan. Kumparan tersebut terdiri dari kumparan primer dan kumparan sekunder yang diisolasi baik terhadap inti besi maupun terhadap antar kumparan dengan isolasi padat seperti karton, pertinak dan lain-lain. Kumparan tersebut sebagai alat transformasi tegangan dan arus.

2.3.3 Minyak Transformator

Sebagian besar kumparan-kumparan dan inti trafo tenaga di rendam dalam minyak trafo, terutama trafo-trafo tenaga yang berkapasitas besar, karena minyak trafo mempunyai sifat sebagai isolasi dan media pemindah, sehingga minyak trafo tersebut berfungsi sebagai media pendingin dan isolasi. Di dalam sebuah transformator terdapat dua komponen yang secara aktif membangkitkan energi panas, yaitu besi (inti) dan tembaga (kumparan). Bila energi panas tidak disalurkan melalui suatu sistem pendinginan akan mengakibatkan besi maupun tembaga akan mencapai suhu yang tinggi, yang akan merusak nilai isolasinya.

Sebagai maksud untuk pendinginan, kumparan dan inti dimasukkan ke dalam suatu jenis minyak, yang dinamakan minyak transformator. Minyak itu mempunyai fungsi ganda, yaitu pendinginan dan isolasi.

2.3.4 Bushing

Hubungan antara kumparan trafo ke jaringan luar melalui sebuah bushing yaitu sebuah konduktor yang diselubungi oleh isolator, yang sekaligus berfungsi sebagai penyekat antara konduktor tersebut dengan tangki trafo.

2.3.5 Tangki Konservator

Pada umumnya bagian-bagian dari trafo yang terendam minyak ditempatkan dalam tangki. Untuk menampung pemuaian minyak trafo, tangki dilengkapi dengan konservator.

2.4 Prinsip Kerja Transformator

Transformator terdiri atas dua kumparan (primer dan sekunder) yang bersifat induktif. Kedua kumparan ini terpisah secara elektrik namun berhubungan secara magnetis melalui jalur yang memiliki reluktansi (*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 ditransfer keseluruhan (secara magnetisasi).

$$\mathcal{E} = -N \cdot \frac{\Delta\phi}{\Delta t} \text{ (volt)} \dots\dots\dots 2.1$$

Dimana :

$\mathcal{E}$ = gaya gerak listrik (ggl) Volt

N = jumlah lilitan

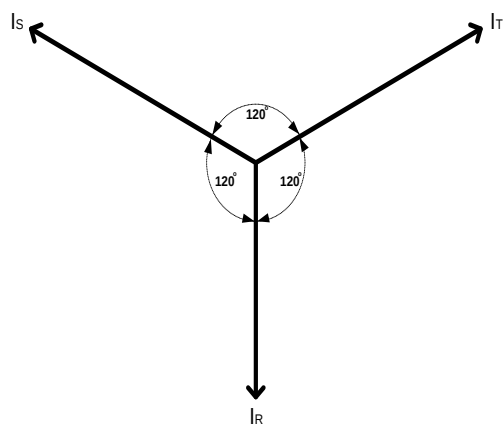
$\frac{\Delta\phi}{\Delta t}$ = perubahan fluks magnet

Hanya tegangan listrik bolak-balik yang dapat ditransformasikan oleh transformator, sedangkan dalam bidang elektronika transformator digunakan sebagai gandengan impedansi antara sumber dan 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*).

2.5 Keseimbangan Beban

Yang dimaksud 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 di bawah ini :

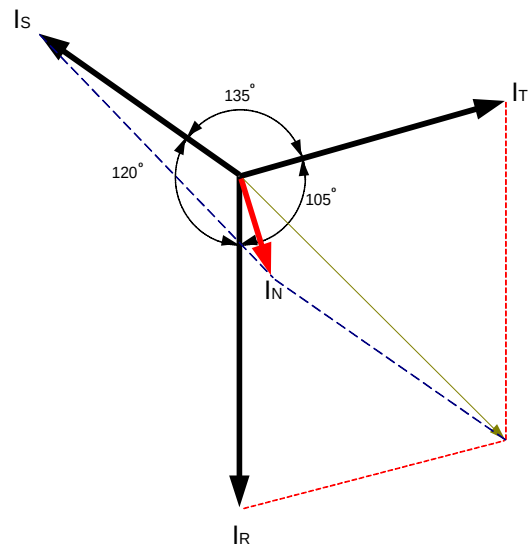
2.5.1 Arus Netral Karena Beban Seimbang



Gambar 2.4 Vektor Diagram Arus Keadaan Seimbang

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.

2.5.2 Arus Netral Karena Beban Tidak Seimbang



Gambar 2.5 Vektor Diagram Arus Keadaan Tidak Seimbang

Keadaan tidak seimbang adalah keadaan dimana salah satu atau kedua syarat keadaan setimbang 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.

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

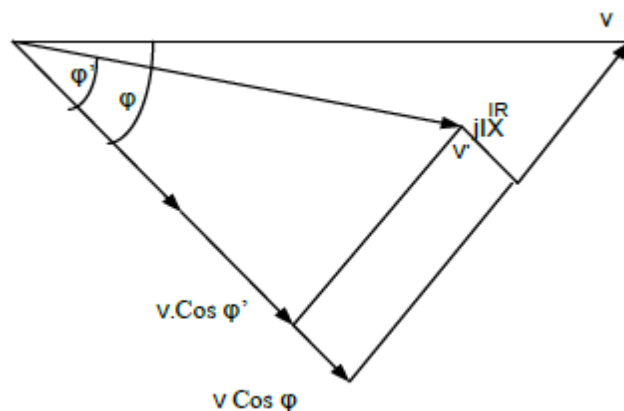
muncul suatu besaran yaitu arus netral (I_N) yang besarnya bergantung pada seberapa besar factor ketidakseimbangannya.

2.6 Penyaluran dan Susut Daya Fasa Tunggal

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 :

$$P = 3 [V] [I] \cos \phi \dots\dots\dots 2.2$$

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 2.6 di halaman selanjutnya :



Gambar 2.6 Penyaluran Susut Daya Fasa Tunggal

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 besarnya daya pada ujung terima adalah :

$$P' = 3 [V'] [I] \cos \phi' \dots\dots\dots 2.3$$

Selisih antara P pada persamaan (2.2) dan P' pada persamaan (2.3) memberikan susut daya saluran, yaitu :

$$= 3 [I] \{ [V] \cos \phi - [V'] \cos \phi' \} \dots\dots\dots 2.4$$

Sementara itu dari Gambar 2.4 memperlihatkan bahawa :

$$\{ [V] \cos \phi - [V'] \cos \phi' \} = I. R \dots\dots\dots 2.5$$

Dengan R adalah tahanan kawat penghantar tiap fasa, oleh karena itu persamaan (2.4) berubah menjadi :

$$Pl = 3 [I^2] R \dots\dots\dots 2.6$$

2.7 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 :

$$[I_N] = [I] a$$

$$[I_N] = [I] b$$

$$[I_N] = [I] c$$

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 disalurkan dapat dinyatakan sebagai :

$$P = (a+b+c) [V] [I] \cos \phi \dots\dots\dots 2.7$$

Apabila persamaan koefisien diatas dan persamaan (2.7) menyatakan daya yang besarnya sama, maka dari kedua persamaan tersebut dapat diperoleh persyaratan koefisien a,b dan c adalah :

$$a + b + c = 3$$

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

$$I_N = I_R + I_S + I_T$$

$$= [I] \{a + b \cos (-120) + j.b.\sin (-120) + c.\cos (-120) + j.c.\sin (120)\} \dots\dots\dots 2.8$$

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

$$P_l' = \{ [i_R^2] + [i_S^2] + [i_T^2] \} \cdot R + [i_N^2] \cdot R_N \dots\dots\dots 2.9$$

$$= (a^2+b^2+c^2) [I]^2 R + (a^2+b^2+c^2 - ab - ac - bc) \cdot [i_N^2] \cdot R_N \dots\dots\dots 2.10$$

Dengan R_N adalah tahanan penghantar netral. Apabila persamaan 2.10 disubstitusikan ke persamaan 2.11 maka akan diperoleh :

$$P_l' = \{ (ab+ac+bc) [I]^2 R + (ab+ac+bc) \} [i_N^2] \cdot R_N \dots\dots\dots 2.11$$

Persamaan (2.12) 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 :

$$P_l' = \{ (ab+ac+bc) [I]^2 \} R \dots\dots\dots 2.12$$

2.8 Faktor Daya

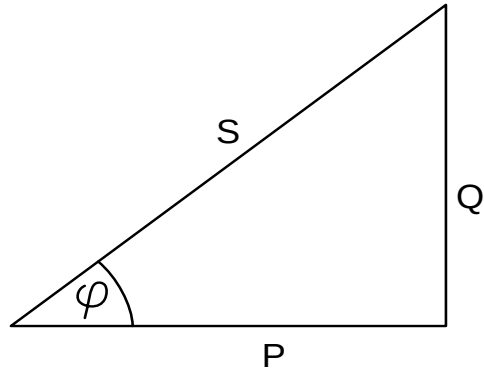
Pengertian faktor daya ($\cos \phi$) adalah perbandingan antara daya aktif (P) dan daya semu (S). Dari pengertian tersebut, faktor daya tersebut dapat dirumuskan sebagai berikut :

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

$$= (P / S)$$

$$= (V.I. \cos \varphi / V.I)$$

$$= \cos \varphi$$



Gambar 2.7 Faktor Daya

$$\text{Daya Semu} = V.I \text{ (VA)} \dots\dots\dots 2.13$$

$$\text{Daya Aktif} = V.I \cos \varphi \text{ (Watt)} \dots\dots\dots 2.14$$

$$\text{Daya Reaktif} = V.I \sin \varphi \text{ (VAr)} \dots\dots\dots 2.15$$

2.9 Rugi-Rugi Pada Jaringan Distribusi

Rugi-rugi adalah perbedaan antara energi listrik yang disalurkan (PS) dengan energi listrik yang terpakai (PP)

$$\text{Losses} = (PS - PP) / PS \dots\dots\dots 2.16$$

Dimana :

PP = Energi yang disalurkan (watt)

PS = Energi yang dipakai (watt)

2.9.1 Rugi-Rugi 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 :

$$\Delta V = \sqrt{3} I (R \cos \varphi + X \sin \varphi) l \dots\dots\dots 2.17$$

$$\Delta P = 3 I^2 R l \dots\dots\dots 2.18$$

Dimana :

I = Arus per phasa (Ampere)

R = Tahanan pada penghantar (Ohm / m)

X = Reaktansi pada penghantar (Ohm / m)

$\cos \varphi$ = Faktor daya beban

l = Panjang penghantar (m)

2.9.2 Rugi-Rugi Akibat Adanya Arus Netral Pada Penghantar Netral

Akibat pembebanan di tiap phasa yang tidak seimbang, maka akan mengalir arus pada penghantar netral. Jika di hantaran pentanahan 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 netral sebesar :

$$P_N = I_N^2 \times R_N \dots\dots\dots 2.19$$

Keterangan :

P_N = Rugi-rugi yang timbul pada penghantar netral (Watt)

I_N = Arus yang mengalir melalui kawat netral (Ampere)

R_N = Tahanan pada kawat netral (Ohm)

2.10 Pay Back Periode

Merupakan perbandingan antara pengeluaran untuk investasi / operasi dengan nilai manfaat atas kegiatan investasi.

Missal : Kondisi awal losses nilai pembiayaannya relatif tinggi. Kondisi akhir nilainya relatif lebih rendah maka PBP adalah perbandingan antara investasi / biaya operasi yang dikeluarkan dengan selisih nilai kondisi awal dan akhir.

$$PBP = \frac{\text{Investasi / Biaya Operasi}}{\text{Selisih Nilai Kondisi Awal dan Akhir}}$$