

BAB II

LANDASAN TEORI

2.1 Tinjauan Pustaka

Tinjauan pustaka adalah pengumpulan referensi dari buku-buku, penelitian sebelumnya, tinjauan pustaka terkait dan jurnal-jurnal dari internet yang berhubungan atau yang dapat mendukung teori penyelesaian proyek akhir “Pengaruh reaktansi hubung singkat pada rugi belitan transformator distribusi”.

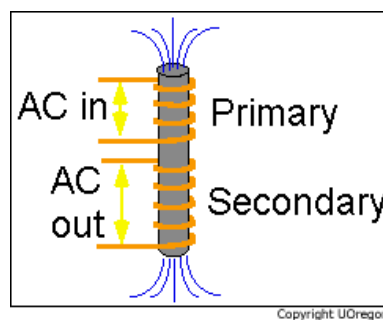
Jurnal-jurnal yang dijadikan sebagai referensi didapat dari internet dimana jurnal yang digunakan harus memenuhi ketentuan yang ditetapkan oleh pihak jurusan Teknik Elektro STT-PLN Jakarta. Ketentuan ini dibuat agar hasil dari penelitian ini bisa dipertanggungjawabkan nantinya. Jurnal-jurnal tersebut meliputi tinjauan pustaka terkait dalam penelitian ini seperti berikut ini :

1. **SPLN D3. 002-1: 2007 Spesifikasi Transformator Distribusi**, membahas mengenai ketentuan Transformator Distribusi.
2. **IEC 60076-5: 2012 Ability to withstand short circuit. Bagian 5.** Membahas mengenai ketentuan pengujian hubung singkat.
3. Moch. Wahyu Dwi Arianto, (2015). Sekolah Tinggi Teknik – PLN, Program Studi Diploma Tiga Teknik Elektro. Dalam proyek akhir yang berjudul **EFISIENSI TRANSFORMATOR BERDASARKAN HASIL PENGUJIAN ARUS BEBAN NOL DAN HUBUNG SINGKAT**, membahas mengenai macam-macam rugi pada transformator dan proses hubung singkat. Menggunakan metode kuantitatif. Hasil dari pengujian tersebut dapat dikatakan lolos apabila hasilnya sesuai dengan standar SPLN.

2.2 Landasan Teori

2.2.1 Umum

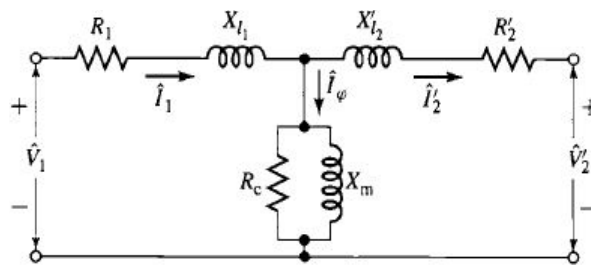
Transformator merupakan peralatan listrik yang berfungsi untuk menyalurkan daya/tenaga dari tegangan tinggi ke tegangan rendah atau sebaliknya. Transformator menggunakan prinsip hukum induksi faraday dan hukum lorentz dalam menyalurkan daya, dimana arus bolak balik yang mengalir mengelilingi suatu inti besi maka inti besi itu akan berubah menjadi magnet. Dan apabila magnet tersebut dikelilingi oleh suatu belitan maka pada kedua ujung belitan tersebut akan terjadi beda potensial. Dapat dilihat pada gambar 2.1



Gambar 2.1. Arus bolak balik mengelilingi inti besi

Transformator memiliki dua kumparan/belitan yaitu kumparan primer dan kumparan sekunder dan kedua kumparan ini bersifat induktif. Kedua kumparan ini terpisah secara elektris 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. 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 ditransfer keseluruhan.

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 :



Gambar 2.2. Rangkaian pengganti transformator

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

Dimana :

N_p= Banyaknya jumlah lilitan pada kumparan primer

N_s= Banyaknya jumlah lilitan pada kumparan sekunder

V_p= Besar tegangan pada sisi primer (volt)

V_s= Besar tegangan pada sisi sekunder (volt)

I_p= Besar arus pada sisi primer (ampere)

I_s= Besar arus pada sisi sekunder (ampere)

2.2.2 Bagian – bagian Transformator

1. *Electromagnetic circuit* (Inti Besi)

Inti besi dibentuk dari laminasi baja silikon (*cold-rolled grain oriented*) atau baja amorphous (*amorphous steel*). Inti besi

digunakan sebagai media jalannya flux yang timbul akibat induksi arus bolak balik pada kumparan yang mengelilingi inti besi sehingga dapat menginduksi kembali ke kumparan yang lain. Dibentuk dari lempengan-lempengan besi tipis berisolasi yang di susun sedemikian rupa, untuk mengurangi panas (sebagai rugi-rugi) yang ditimbulkan *stray loss*.

2. *Current Carrying Circuit* (Belitan)

Belitan terdiri dari lilitan batang tembaga (Cu) atau alumunium (Al) berisolasi yang mengelilingi inti besi, dimana saat tegangan dan arus bolak balik mengalir pada belitan tembaga atau alumunium tersebut, inti besi akan terinduksi dan menimbulkan flux magnetik. Dan belitan tembaga terluar (belitan primer) diolasi menggunakan kertas khusus, yaitu DDP (*Diamond Dote Paper*) yang berfungsi melindungi belitan dari gaya dorong kearah luar (induksi inti besi) agar kerapatan dari lilitan tetap terjaga. Umumnya pada trafo terdapat belitan primer dan sekunder. Posisinya belitan sekunder terdapat di dalam belitan primer.

3. Bushing

Jenis bushing adalah porselin untuk transformator pasangan luar atau *plug-in* untuk pasangan dalam. Bushing merupakan sarana penghubung antara belitan dengan jaringan luar. Bushing terdiri dari sebuah konduktor yang diselubungi oleh isolator. Konduktor berfungsi untuk menyalurkan arus dari bagian peralatan ke terminal luar dan bekerja pada tegangan tinggi. Isolator tersebut berfungsi sebagai penyekat antara konduktor bushing dengan body main tank transformator. Dengan bantuan flans, isolator diikatkan pada badan peralatan yang dibumikan. Dan pemasangan bushing porselin pada penutup tangki harus menggunakan *fixing ring* dan *cork* yang sesuai dengan tipe bushing. Fungsi *fixing ring* dan *cork* untuk memastikan keadaan bushing rapat, sehingga beban merata dan tidak terjadi kebocoran minyak. Tegangan maksimum

bushing primer adalah 24 kV dengan arus pengenal yang sesuai dengan arus pengenal transformator. Sedangkan bushing sekunder tegangan pengenalnya 1 kV dengan arus pengenal yang sesuai dengan arus pengenal transformator, minimum 250 A. Bushing porselin adalah untuk tingkat polusi sedang sesuai IEC 60137 dengan jarak rambat nominal 480 mm. Pada transformator distribusi terdapat bushing HV (Primer) dan bushing LV (Sekunder).

4. Pendinginan

Suhu pada transformator yang sedang beroperasi akan dipengaruhi oleh kualitas tegangan jaringan, losses pada trafo itu sendiri dan suhu lingkungan. Suhu operasi yang tinggi akan mengakibatkan rusaknya isolasi kertas pada transformator. Oleh karena itu pendinginan yang efektif sangat diperlukan. Minyak isolasi transformator selain merupakan media isolasi juga berfungsi sebagai pendingin. Pada saat minyak bersirkulasi, panas yang berasal dari belitan akan dibawa oleh minyak sesuai jalur sirkulasinya dan akan didinginkan pada sirip – sirip radiator. Adapun proses pendinginan ini dapat dibantu oleh adanya kipas dan pompa sirkulasi guna meningkatkan efisiensi pendinginan. Sistem pendinginan trafo dapat dikelompokkan sebagai berikut :

a. 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.

b. 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 yang berputar. Apabila suhu trafo sudah semakin meningkat, maka kipas angin yang lainnya akan berputar secara bertahap.

c. OFAF (*Oil Force Air Force*)

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

Tabel 2.1 Macam-macam pendingin pada transformator

No.	Macam Sistem Pendingin *)	Media			
		Dalam Transformator		Diluar Transformator	
		Sirkulasi alamiah	Sirkulasi Paksa	Sirkulasi Alamiah	Sirkulasi Paksa
1.	AN	-	-	Udara	-
2.	AF	-	-	-	Udara
3.	ONAN	Minyak	-	Udara	-
4.	ONAF	Minyak	-	-	Udara
5.	OFAN	-	Minyak	Udara	-
6.	OFAF	-	Minyak	-	Udara
7.	OFWF	-	Minyak	-	Air
8.	ONAN/ONAF	Kombinasi 3 dan 4			
9.	ONAN/OFAN	Kombinasi 3 dan 5			
10.	ONAN/OFAF	Kombinasi 3 dan 6			
11.	ONAN/OFWF	Kombinasi 3 dan 7			

Pada trafo distribusi pendinginan dilakukan dengan menggunakan minyak trafo dan radiator (berbentuk sirip yang diletakkan di tangki yang juga merupakan bagian dari tangki) serta mengandalkan pada hembusan udara alami sehingga disebut dengan sistem pendinginan ONAN (*oil natural air natural*).

5. Minyak Isolasi Dan Isolasi Kertas Transformator Distribusi

a. Minyak Isolasi

Minyak isolasi pada transformator distribusi berfungsi sebagai media isolasi, pendingin dan pelindung belitan dari oksidasi. Minyak Ascarel merupakan minyak isolasi yang paling baik yang digunakan pada transformator distribusi yang berjenis mineral. Persyaratan (Standar IEC 60296 dengan tegangan tembus ≥ 50 kV/2,5 mm dan parameter-parameter

minyak isolasi lainnya dengan batasan-batasan minimum untuk minyak isolasi yang baru dimasukkan kedalam peralatan sebelum energize).

b. Kertas Isolasi Trafo

Isolasi kertas berfungsi sebagai isolasi, pemberi jarak, dan memiliki kemampuan mekanis menjaga kerapatan lilitan pada kumparan. Isolasi kertas yang digunakan pada transformator distribusi, yaitu kertas DDP (*Diamond Dote Paper*).

6. Tangki

Tangki dibuat dari pelat baja dengan permukaan yang halus. Tangki untuk transformator fasa tunggal dapat berbentuk silindris atau persegi empat. Untuk persyaratan ukuran tangki, dll terdapat di SPLN D3.002-1 :2007. Bagian-bagian dari trafo yang terendam minyak ditempatkan di dalam tangki. Tangki berfungsi sebagai pelindung bagian dalam trafo terhadap pengaruh luar (benturan mekanis dan cuaca). Bentuk tangki yang umum digunakan ada 2 yaitu tangki dengan menggunakan konservator dan yang tidak menggunakan konservator (tangki jenis hermetikal). Transformator distribusi yang digunakan di PLN menggunakan tangki jenis hermetikal.

7. *Tap Changer* (Sadapan Tegangan)

Kestabilan tegangan dalam suatu jaringan merupakan salah satu hal yang dinilai sebagai kualitas tegangan. Transformator dituntut memiliki nilai tegangan output yang stabil sedangkan besarnya tegangan input tidak selalu sama. Dengan mengubah banyaknya belitan pada sisi primer diharapkan dapat merubah ratio antara belitan primer dan sekunder dan dengan demikian tegangan output/sekunder pun dapat disesuaikan dengan kebutuhan sistem berapapun tegangan input/primernya. Penyesuaian ratio belitan ini disebut Tap changer.

Proses perubahan ratio belitan ini dapat dilakukan pada saat trafo sedang berbeban atau saat trafo tidak berbeban. Pada transformator distribusi proses perubahan ratio belitan dilakukan saat trafo tidak berbeban.

Tabel 2.2 Tegangan sadapan pada trafo distribusi

No. Sadapan	Sistem JTM 3 kawat		Sistem JTM 4 kawat			
	Fase tiga dan fase tunggal		Fase tiga		Fase tunggal	
	Tipe 1	Tipe 2	Tipe 1	Tipe 2	Tipe 1	Tipe 2
1	21 kV	21 kV	21 kV	21 kV	$21/\sqrt{3}$ kV	$21/\sqrt{3}$ kV
2	20,5 kV	20,5 kV	20,5 kV	20,5 kV	$20,5/\sqrt{3}$ kV	$20,5/\sqrt{3}$ kV
3	20 kV	20 kV	20 kV	20 kV	$20/\sqrt{3}$ kV	$20/\sqrt{3}$ kV
4	19,5 kV	19,5 kV	19,5 kV	19,5 kV	$19,5/\sqrt{3}$ kV	$19,5/\sqrt{3}$ kV
5	19 kV	19 kV	19 kV	19 kV	$19/\sqrt{3}$ kV	$19/\sqrt{3}$ kV
6	-	18,5 kV	-	18,5 kV	-	$18,5/\sqrt{3}$ kV
7	-	18 kV	-	18 kV	-	$18/\sqrt{3}$ kV

8. Pressure Relief Device (Pengaman Tekanan Berlebih)

Pressure relief device (Pengaman tekanan lebih) ini didesain sebagai titik terlemah saat tekanan didalam trafo muncul akibat gangguan. Dengan menyediakan titik terlemah maka tekanan akan tersalurkan melalui *pressure relief device* dan tidak akan merusak bagian lainnya pada main tank.

9. Indikator tinggi Minyak

Indikator tinggi minyak pada trafo diperlukan untuk mengetahui ketinggian minyak di dalam trafo. Indikator tinggi minyak ditempatkan pada pipa pengisi minyak. Jenis indikator adalah *visual oil level eye indicator*. Pada kondisi normal minyak trafo harus merendam semua bagian trafo. Indikator tinggi minyak diletakkan di bagian atas tangki.

10. Terminal Penumbumian

Tangki transformator dilengkapi dengan terminal penumbumian yang dibuat dari kuningan, satu buah pada penutup tangki dan satu buah pada bagian bawah tangki. Pemasangan terminal penumbumian ini dimaksudkan untuk pengamanan arus/tegangan bocor yang terjadi di sekitar transformator. Penandaan terminal penumbumian.

2.2.3 Impedansi Belitan

Listrik merupakan suatu energi yang bisa dihambat atau ditolak. Nah salah satu jenis tolakan atau hambatan tersebut ialah impedansi. Impedansi terjadi pada rangkaian listrik yang diberi tegangan AC. Seperti yang kita ketahui, pada rangkaian listrik arus DC dikenal yang namanya hambatan total rangkaian. Nah, hal yang sama juga bisa kita temui pada rangkaian listrik yang dialiri dengan arus listrik bolak-balik atau AC (*Alternating Current*). Salah satu perbedaan antara keduanya terletak pada namanya. Jika pada arus DC bernama 'hambatan total' maka di arus AC namanya 'impedansi'.

Dan apabila ingin mengetahui impedansi pada rangkaian R-L-C, maka gunakanlah rumus berikut :

$$Z = \sqrt{R^2 + (XL - XC)^2} \dots\dots\dots(2.2)$$

Dimana :

Z = Impedansi (Ohm)

R = Hambatan rangkaian (Ohm)

XL = Reaktansi induktif (Ohm)

XC = Reaktansi Kapasitif (Ohm)

Jadi, intinya adalah dengan menjumlahkan antara hambatan rangkaian dengan reaktansi yang ada pada rangkaian. Penjumlahannya juga tidak bisa dilakukan secara langsung, melainkan harus dilakukan secara vektoris.

Karena impedansi merupakan nilai dari hambatan total pada rangkaian listrik arus AC, maka nilai dari impedansi selalu berbanding terbalik dengan besarnya arus listrik. Karena, impedansi bersifat menghambat arus yang lewat sehingga menyebabkan arus yang mengalir menjadi semakin kecil. Secara matematis, hal ini dapat dituliskan sebagai berikut :

$$I = \frac{V}{Z} \dots\dots\dots(2.3)$$

Dimana :

I = Arus listrik (Ampere)

V = Tegangan listrik (Volt)

Z = Impedansi (Ohm)

Impedansi tentunya merupakan hambatan total yang terdiri dari 3 komponen yaitu resistansi, reaktansi induktif dan reaktansi kapasitif. Reaktansi adalah perlawanan komponen sirkuit/ rangkaian atas perubahan arus listrik atau tegangan listrik karena adanya kapasitansi atau induktansi. Medan listrik yang terbentuk dalam komponen tersebut akan menghambat perubahan potensial listrik dan medan magnetic yang terbentuk menghambat perubahan arus listrik. Nilai kapasitansi dan induktansi mempengaruhi sifat dari komponen tersebut, namun efek reaktansi tidak terlihat ketika komponen tersebut dialiri arus searah, efek reaktansi hanya akan terlihat jika ada perubahan arus atau tegangan. Jadi nilai reaktansi berubah-ubah sebanding dengan perubahan arus, dan jika frekuensi perubahan arus teratur, seperti dalam arus bolak-balik, maka nilai reaktansi menjadi konstan. jika rangkaian listrik dianalisis menggunakan kalkulus vector nilai tahanan adalah bagian riil dari nilai impedansi, sedangkan nilai reaktansi merupakan imajinernya. Keduanya sama-sama memiliki satuan internasional ohm.

1. Reaktansi induktif

Induktor mempunyai sifat menghantarkan arus DC dan menahan arus AC. Reaktansi induktif adalah nilai hambatan atau tahanan induktor terhadap sinyal AC. Besarnya nilai reaktansi induktif sebuah induktor dinyatakan dengan satuan Ohm seperti satuan hambatan listrik. Sebenarnya hambatan pada sinyal AC disebut dengan impedansi, namun pada rangkaian induktor disebut dengan reaktansi induktif.

Hambatan yang timbul pada induktor terjadi karena adanya perubahan medan listrik dan medan magnet pada induktor ketika dialiri arus secara bolak-balik. Hal ini berlawanan ketika induktor dialiri arus DC, arus akan mengalir secara bebas tanpa pengaruh induktansi dan kemagnetan induktor. Seperti dinyatakan oleh Hukum faraday bahwa ketika induktor dialiri arus AC akan timbul

gaya gerak listrik (GGL) yang berlawanan karena adanya perubahan arah medan magnet (flux). Perubahan perlawanan GGL inilah yang menghambat aliran arus listrik.
rumus reaktansi induktif :

$$X_L = 2 \pi f L \dots\dots\dots(2.4)$$

Dimana :

X_L = Reaktansi induktif
 f = Frekuensi sinyal sinus
 L = Nilai induktansi

Dari rumus diatas terlihat bahwa besarnya nilai reaktansi induktif berbanding lurus dengan besarnya frekuensi. Ini berarti semakin besar frekuensi maka nilai reaktansi induktif semakin besar atau semakin menghambat. Dan pada frekuensi rendah nilai reaktansi induktif semakin kecil atau semakin menghantar.

2. Reaktansi kapasitif

Reaktansi kapasitif juga sering disebut dengan hambatan kapasitor pada sinyal AC. Meski sebenarnya yang dilihat adalah seberapa besar konduktansi atau seberapa besar menghantarkan sinyal AC, namun perhitungan tegangan dibagi arus menyebabkan penggunaan istilah hambatan dirasa lebih tepat. Dan oleh karena disebut hambatan maka reaktansi kapasitif dinyatakan dalam satuan Ohm seperti satuan hambatan listrik.

rumus reaktansi kapasitif menjadi :

$$X_C = \frac{1}{2 \pi f C} \dots\dots\dots(2.5)$$

Dimana :

X_C = Reaktansi kapasitif

F = Frekuensi sinyal sinus
C = Nilai kapasitansi

Dari rumus diatas terlihat bahwa besarnya nilai reaktansi kapasitif berbanding terbalik dengan besarnya frekuensi. Ini berarti semakin besar frekuensi maka nilai reaktansi kapasitif semakin kecil atau semakin menghantar. Dan pada frekuensi rendah nilai reaktansi kapasitif semakin besar atau semakin menghambat. Oleh karena itu pada aplikasi tegangan DC, kapasitor sangat menghambat karena frekuensi tegangan DC sama dengan nol, sehingga besarnya reaktansi kapasitif menjadi tak terhingga.

3. Resistansi

Setiap Konduktor mempunyai hambatan. Ketebalan suatu konduktor menentukan besar-kecilnya hambatan yang dimilikinya. Konduktor yang tebal memiliki hambatan yang kecil. Kawat yang tebal mempunyai penampang lintang yang lebih lebar, sehingga mengandung lebih banyak elektron. Sebaliknya, konduktor yang panjang, memiliki hambatan yang besar. Ini dikarenakan semakin panjang suatu konduktor semakin banyak pula atom-atom yang akan menghadang gerak elektron bebasnya sehingga arus listrik yang dialirkan akan berkurang.

Nilai resistansi dapat dipengaruhi oleh suhu, dimana Nilai resistensi yang semakin meningkat pada suhu yang semakin naik menunjukkan karakteristik yang biasa di sebut dengan *Positive Temperature Coefficient (PTC)*. Namun tidak semua material memiliki karakteristik sebagai PTC. Sebaliknya nilai resistensi yang semakin turun pada suhu yang semakin meningkat menunjukkan karakteristik yang biasa di sebut dengan *Negative Temperature Coefficient (NTC)*.

2.2.4 Rugi-rugi pada Transformator

Rugi-rugi daya trafo berupa rugi inti atau rugi besi dan rugi tembaga yang terdapat pada kumparan primer maupun sekunder untuk mengurangi rugi besi haruslah diambil inti besi yang penampangnya cukup besar agar flux magnet mudah mengalir di dalamnya. Untuk memperkecil rugi tembaga, harus diambil kawat tembaga yang penampangnya cukup besar untuk mengalirkan arus listrik yang diperlukan. Rugi inti terdiri dari rugi arus eddy dan rugi histerisis. Rugi arus eddy timbul akibat adanya arus pusar pada inti yang dapat menghasilkan panas. Adapun arus pusar inti ditentukan oleh tegangan induksi pada inti yang menghasilkan perubahan-perubahan flux magnet.

1. Rugi tembaga (P_{Cu})

Rugi-rugi tembaga adalah rugi-rugi yang disebabkan oleh pemanasan yang timbul akibat arus mengalir pada hambatan kawat penghantar yang terdapat pada kumparan primer dan sekunder dari transformator. Rugi-rugi tembaga sebanding dengan kuadrat arus yang mengalir pada kumparan.

Rugi tembaga dapat dituliskan sebagai berikut :

$$P_{Cu} = I^2 R \dots\dots\dots (2.6)$$

Karena arus beban berubah-ubah, rugi tembaga juga tidak konstan bergantung pada beban.

2. Rugi Besi (P_i)

Rugi besi terdiri atas:

a. Rugi histerisis

Terjadi karena respon yang lambat dari material inti. Hal ini terjadi karena masih adanya medan magnetik residu yang bekerja pada material, jadi saat arus eksitasi bernilai 0, fluks tidak serta merta berubah menjadi 0 namun perlahan-lahan menuju 0.

Sebelum fluks mencapai nilai 0 arus sudah mulai mengalir kembali atau dengan kata lain arus sudah

bernilai tidak sama dengan 0 sehingga akan membangkitkan fluks kembali. Rugi histerisis dapat dinyatakan sebagai :

$$P_h = K_h f B^{1.6} \text{maks Watt} \dots\dots\dots(2.7)$$

Dimana :

K_h = Konstanta

B_{maks} = fluks maksimum (webber)

b. Rugi 'arus eddy'

Rugi-rugi arus eddy adalah rugi-rugi yang disebabkan oleh pemanasan akibat timbulnya arus eddy (pusar) yang terdapat pada inti besi transformator. Rugi-rugi ini terjadi karena inti besi terlalu tebal sehingga terjadi perbedaan tegangan antara sisinya maka mengalir arus yang berputar-putar di sisi tersebut. Rugi-rugi arus eddy sebanding dengan kuadrat tegangan yang disuplai ke transformator, dirumuskan sebagai :

$$P_c = K_c f^2 B^2 \text{maks} \dots\dots\dots(2.8)$$

Jadi, rugi besi (rugi inti) adalah

$$P_i = P_h + P_c \dots\dots\dots(2.9)$$

2.2.5 Pengujian Hubung Singkat

Pengujian hubung singkat (*short circuit*) dilakukan pada trafo untuk dapat mengetahui kemampuan trafo terhadap gaya Dinamik dan Thermal yang disebabkan oleh hubung singkat pada bagian belitan. Hubung singkat yang dimaksud dapat meliputi hubung singkat satu fase ke tanah, fase - fase, tiga fase, dan *double fase ke tanah*. Pengujian hubung singkat dilakukan untuk mengukur besarnya keugian tembaga pada transformator. Transformator primer dihubungkan dengan sumber tegangan yang bisa diatur besarnya. belitan sekundernya di hubung singkat. Besar tegangan primer antara 5% sampai dengan 10% dari tegangan primernya. Tegangan diatur dari paling kecil, dinaikan bertahap sampai

menunjukkan arus nominalnya.

1. Arus Hubung Singkat

Arus hubung singkat pada sirkit arus bolak-balik, umumnya akan diawali oleh puncak yang tinggi selama beberapa siklus, kemudian menurun dan ajeg (*steady state*) pada nilai arus efektif (rms). Lonjakan arus pada siklus-siklus awal disebabkan karena komponen reaktans pada sirkit terhubung singkat tidak dapat berubah secara mendadak. Kondisi ini akan menghadirkan komponen dc, yang membuat arus menjadi asimetris (sumbu gelombang terangkat dari titik nol) selama beberapa siklus.

2. Ketahanan Dinamik Transformator

Ketahanan hubung singkat merupakan mata uji jenis (*type test*) pada SPLN D3 002-1 2007, sedangkan IEC 60076-1 mengkualifikasikan sebagai mata uji *special test*. Berdasarkan IEC 60076-5, ketahanan hubung singkat dibedakan menjadi ketahanan dinamik dan termal. Arus uji pada standar ini adalah arus hubung singkat simetris (I_k) :

$$I_k = \frac{U_n}{(Z_t + Z_s) \times \sqrt{3}} \dots \dots \dots (2.10)$$

Dimana :

U_n = tegangan pengenalan sesuai posisi sadapan (V)

Z_s = impedansi hubung singkat *system* (ohm)

Z_t = impedansi hubung singkat transformator (ohm)

Impedansi sistem distribusi relatif kecil dibandingkan impedansi transformator, sehingga nilainya dapat diabaikan dan arus hubung singkat simetris dapat diformulasikan :

$$I_k = \frac{100}{\% U_z} \times I_n \dots \dots \dots (2.11)$$

Dimana :

I_n = arus pengenalan sesuai posisi sadapan (A)

$\% U_z$ = tegangan impedansi (%)

Arus puncak (I_p) dinyatakan dalam kelipatan terhadap arus simetris dengan suatu faktor puncak ($k\sqrt{2}$)

$$I_p = I_k \times k\sqrt{2} \dots \dots \dots (2.12)$$

Dimana :

$$K = \left\{ 1 + \left[e^{-\left(\phi + \frac{\pi}{2}\right) \frac{r}{x}} \right] \sin \phi \right\} \sqrt{2} \dots\dots\dots(2.13)$$

Dimana :

$\phi = \arctan (x/r)$ (dalam radian)

$e =$ bilangan logaritma alami

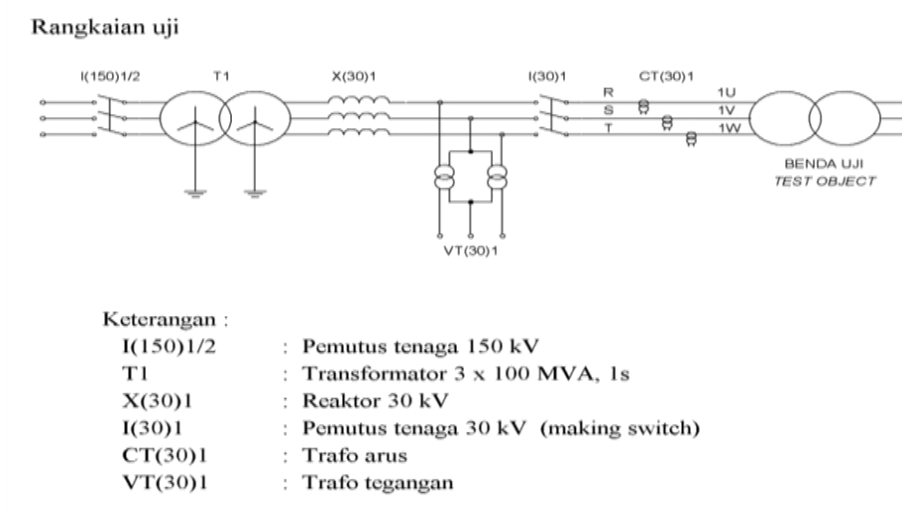
Gaya elektrodinamik terbesar akan timbul pada fasa yang dilalui arus puncak tertinggi (*fully offset*). Pada pengujian ketahanan dinamik, setiap fasa pada belitan sadapan utama (*principal tap*), sadapan minimum dan sadapan maksimum, diterapkan arus hubung singkat sesuai persamaan diatas. Situasi ini akan menghasilkan 9 penerapan pada transformator fasa tiga dan 3 penerapan pada transformator fasa tunggal. Karena komponen dc relative berlangsung singkat (+- s/d 100ms), durasi uji pada IEC 60067-5 ditetapkan hanya 500 ms.

Jika salah satu belitan dihubung singkat dan tegangan diterapkan pada belitan lainnya, fluks megnetik akan melingkupi ruang diantara dan didalam belitan-belitan. Reaktans yang terukur pada kondisi ini merupakan fungsi dari reluktansi pada ruang tersebut dan dideferensikan sebagai reaktans bocor. Reaktans bocor sensitif terhadap distorsi belitan karena nilainya ditentukan oleh bentuk geometris belitan dan distribusi fluks magnetic, sehingga merubah nilai reaktans. Salah satu kriteria penilaian ketahanan transformator pada IEC 60076-5 adalah melalui pengamatan perubahan reaktans bocor. Perubahan maksimum reaktans setiap lengan, setelah diterapkan arus uji hubung singkat :

- a. 2% untuk bentuk belitan bulat konsentris
- b. 7,5 % untuk belitan konsentris tidak bulat
- c. 4 % untuk belitan yang menggunakan konduktor logam lembaran (*metal sheet*)

Setelah pengujian hubung singkat, transformator harus tetap mampu menahan tegangan uji dielektrik tanpa kegagalan termasuk uji ketahanan impuls. Kondisi bagian aktif setelah keseluruhan penerapan dilakukan dengan pemeriksaan visual. Pada bagian tersebut tidak diperbolehkan terjadi prgerakan dan kerusakan pada belitan, struktur penyangga, konduktor hubung dan komponen lain serta jejak lepasan pada bagian isolasi.

Diagram pengujian hubung singkat transformator dapat dilihat pada gambar dibawah ini:



Gambar 2.3 Diagram Pengujian Hubung Singkat

3. Gaya elektrodinamik

Arus pada belitan transformator akan meningkat beberapa kali lipat pada saat uji hubung singkat. Pada transformator distribusi, peningkatan mencapai 20-25 kali arus normal bila terjadi di sekitar terminal sekunder. Arus ini mengakibatkan kenaikan suhu secara cepat dan peningkatan gaya elektrodinamik pada belitan. Nilai sesaat tegangan pada waktu awal hubung singkat ($t=0$) dan konstanta waktu dan sirkit terhubung singkat akan menentukan nilai maksimum arus dan gaya yang terjadi. Gaya elektrodinamik pada kondisi ini dapat mendeformasi dan merusak belitan, konduktor maupun struktur mekanis belitan.

Struktur belitan harus diperhitungkan terhadap tekanan mekanis dari gaya tersebut untuk menghindari agar stress yang timbul pada komponen tidak menyebabkan deformasi permanen dan bergesernya struktur belitan sekecil mungkin. Selama

periode mengalirnya arus, vibrasi mekanis pada belitan dan pemuaian termal pada konduktor berjalan secara simultan. Pergeseran relative antara isolasi yang akan menyebabkan kegagalan lilitan. Kerusakan juga dapat terjadi pada konduktor hubung (*lead wire*/ bar dan konduktor titik bintang), sehingga dimensi komponen ini harus diperhitungkan secara termal dan dinamik serta mengklempnya secara memadai.

Persamaan dasar pada hokum Biot-Savart:

$$F = I \cdot (l \times B) \dots\dots\dots (2.14)$$

Dimana :

- F = gaya
- B = induktansi medan magnetic
- i = arus
- l = panjang konduktor

Dua konduktor yang dialiri arus berarah sama akan saling tarik menarik, sedangkan yang berlawanan arah saling tolak menolak satu dengan yang lainnya. Fenomena yang terjadi pada belitan transformator adalah berdasarkan teori ini. Pada transformator, induksi magnetic ditimbulkan oleh arus, sehingga gaya elektrodinamik pada persamaan akan berbanding lurus dengan kuadrat arus dan berisolasi pada dua kali frekuensi daya. Lilitan pada belitan yang sama akan tarik menarik dan menekan belitan. Belitan primer dan sekunder yang mempunyai arah arus berlawanan akan saling tolak menolak.

Pada gaya elektrodinamik ditentukan oleh garis-garis fluks bocor. Bagian terbesar dari fluks bocor menempati daerah kanal bocor yaitu ruang diantara kedua belitan. Fluks magnetic ini dipengaruhi oleh keberadaan komponen feromagnetik disekitarnya seperti inti besi, penjepit besi, tangki dan material sejenisnya. Konstruksi inti transformatr distribusi umumnya berbentuk *core type* dan terdiri dari dua belitan primer dan sekunder.

Interaksi antara arus hubung singkat pada setiap lilitan dengan komponen aksial fluks bocor akan menghasilkan gaya dengan arah radial, sementara interaksi dengan komponen radial menghasilkan gaya berarah aksial. Gaya radial akan menerpa keseluruhan tinggi belitan dan magnitudenya maksimal dimana komponen fluks aksial terbesar. Daerah ini berada diantara garis tengah setiap belitan dengan sisi kanal bocor yaitu sepanjang garis tengah lapisan luar belitan TR dan lapisan

dalam belitan TT. Gaya radial menurun pada lilitan yang secara radial semakin menjauh dari kanal. Sebuah belitan dapat diibaratkan sebuah tabung yang ditekan dari luar dan dari dalam oleh gaya radial. Gaya aksial menekan belitan dari atas dan bawah.

2.2.6 Pengujian *Load Losses*

Interaksi fluks pada inti besi dengan belitan sekunder akan mengakibatkan tegangan pada belitan sekunder yang nilainya mengikuti persamaan 2.1. bila terminal belitan sekunder membentuk loop tertutup karena terhubung dengan beban maka pada belitan sekunder akan mengalir arus I_s yang nilainya ditentukan oleh besarnya impedans beban. Arus beban ini juga akan mengalir pada belitan pada belitan primer sehingga nilai I_p ikut meningkat, mengikuti persamaan 2.1.

$$\frac{N_p}{N_s} = \frac{V_p}{V_s} \dots\dots\dots(2.15)$$

Dimana :

- N_p = jumlah lilitan pada belitan primer
- N_s = jumlah lilitan pada belitan sekunder
- I_p = arus primer
- I_s = arus sekunder

Mengalirnya arus I_p dan I_s pada masing-masing belitan akan menimbulkan rugi-rugi yang disebut dengan I^2R :

$$\text{Rugi } I^2R = I_p^2 \times \Sigma R_p + I_s^2 \times \Sigma R_s \dots\dots\dots(2.16)$$

Dimana :

- I_p = arus primer
- I_s = arus sekunder
- R_p = resistans belitan primer
- R_s = resistans belitan sekunder

Selain nilainya yang kuadratis terhadap arus beban, rugi I^2R juga dipengaruhi suhu yang timbul pada belitan yang akan semakin tinggi dengan semakin bertambahnya arus beban.

Pada prinsip kerja transformator dapat diketahui bahwa tidak semua fluks mengalir pada inti besi. Sebagian dari fluks dibangkitkan hanya mengalir di sekitar belitan primer saja dan belitan sekunder saja. Fluks yang bocor ini menimbulkan reaktansi belitan yang bersama-sama dengan resistansi belitan membentuk impedansi bocor.

Pada terminology transformator impedans bocor dinyatakan dengan tegangan impedans yang nilainya diperoleh melalui pengukuran rugi berbeban dengan cara menghubungkan singkat salah satu sisi termal (lebih mudah dihubungkan singkat pada terminal bertegangan rendah). Pada pengukuran ini, tegangan yang timbul pada terminal yang tidak dihubungkan singkat pada saat transformator dialiri arus nominal dibandingkan dalam % terhadap tegangan nominal.

Reaktans bocor dipengaruhi oleh ukuran geometris belitan. Pada komposisi impedans transformator, nilai reaktans lebih dominan dibandingkan dengan resistans belitan. Fluks bocor ini juga menimbulkan arus eddy pada belitan dan logam-logam konstruksi yang terkena paparan fluks tersebut dan menimbulkan rugi-rugi yang disebut dengan rugi sasar (*stray losses*). Rugi sasar dan rugi I^2R akan timbul saat transformator berbeban dan dapat dijumlahkan dari kedua rugi-rugi tersebut disebut dengan rugi-rugi berbeban (*load Losses*). Bila rugi I^2R berbanding lurus dengan suhu, rugi sasar berbanding terbalik, sehingga rugi-rugi berbeban adalah :

$$\text{Rugi berbeban} = \text{rugi } I^2R \times f_k + \frac{P_{sty}}{f_k} \dots\dots\dots (2.17)$$

Dimana :

P_{sty} = rugi sasar

f_k = faktor koreksi suhu

Rugi sasar dapat diketahui melalui pengukuran rugi berbeban dengan cara menghitung selisih antara daya yang terbaca watt meter (pada arus nominal) dengan rugi I^2R .

Rugi berbeban dan tegangan impedans trafo distribusi

ditetapkan pada suhu 75°C, sehingga f_k dapat di formulasikan dengan :

$$F_k = \frac{\alpha + 75}{\alpha + t_2} \dots\dots\dots(2.18)$$

Dimana :

α = 235 untuk belitan tembaga; 225 untuk belitan alumunium

t_2 = suhu belitan pada saat pengukuran rugi berbeban

Pada transformator distribusi dengan sistem pendingin ONAN, suhu belitan tersebut merupakan nilai rata-rata dari suhu minyak bagian atas dan bawah.

Pengujian ini bertujuan untuk mengetahui besarnya daya yang hilang pada saat trafo beroperasi akibat dari tembaga (W_{cu}) yang merupakan kerugian I^2R dalam belitan yang disebabkan oleh resistansi kumparan primer R_p dan kumparan sekunder R_s dan arus listrik yang mengalirinya, dan *stray losses* trafo yang digunakan. Pengukuran dilakukan dengan memberikan arus nominal pada salah satu sisi dan pada sisi lainnya dihubungkan singkat dengan demikian akan terbangkit juga arus nominal pada sisi tersebut sehingga trafo seolah-olah diberi beban penuh.

2.2.7 Pengujian Nilai Resistans Belitan

Pengujian nilai resistans bertujuan untuk mengetahui nilai resistans yang terdapat pada suatu belitan, nilai resistans yang ditunjukkan oleh ohmmeter berfungsi untuk mencari rugi rugi belitan yang ditimbulkan saat dilakukan pengujian *load losses*. Pengukuran nilai resistans ini dilakukan dengan menggunakan arus searah untuk metode pengukurannya. Pengukuran resistans transformator harus mengukur temperature suhu yang terdapat pada sisi *top oil* dengan radiator bawah pada transformator, nilai perbedaan suhu antara *top oil* dan radiator bawah dipersyaratkan tidak melebihi nilai 5°K.

Resistansi yang dipakai adalah resistansi hasil pengukuran yang dilakukan untuk setiap fasa trafo, yaitu antara terminal: Untuk terminal tegangan tinggi antara u-v, v-w, dan w-u. Sehingga berlaku rumus :

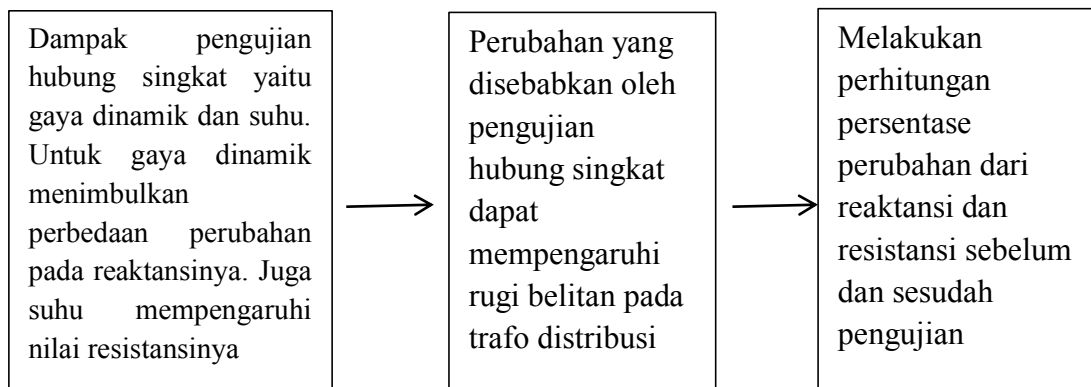
$$R_{UVW} = \frac{(1U-1V)(1V-1W)(1U-1W)}{2} \dots\dots\dots(2.19)$$

Untuk terminal tegangan rendah antara u-v, v-w, dan w-u

Sehingga berlaku rumus :

$$R_{uvw} = \frac{(1u-1v)(1v-1w)(1u-1w)}{2} \dots\dots\dots(2.20)$$

2.3 Kerangka pemikiran



Gambar 2.4 kerangka pemikiran