



BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Transformator

Transformator merupakan suatu peralatan listrik elektromagnetik statis yang berfungsi untuk memindahkan dan mengubah daya listrik dari suatu rangkaian listrik ke rangkaian listrik lainnya, dengan frekuensi yang sama dan perbandingan transformasi tertentu melalui suatu gandengan magnet dan bekerja berdasarkan prinsip induksi elektromagnetis, dimana perbandingan tegangan antara sisi primer dan sisi sekunder berbanding lurus dengan perbandingan jumlah lilitan dan berbanding terbalik dengan perbandingan arusnya.

Dalam bidang teknik listrik pemakaian transformator dikelompokkan menjadi:

1. Transformator daya
2. Transformator distribusi
3. Transformator pengukuran (terdiri dari transformator arus dan transformator tegangan).¹

2.1.1 Prinsip Kerja Transformator

Apabila kumparan primer dihubungkan dengan sumber, maka akan mengalir arus bolak-balik I_1 pada kumparan tersebut. Arus I_1 akan menimbulkan fluks magnet yang berubah-ubah pada inti. Dengan adanya fluks magnet yang berubah-ubah, pada kumparan akan timbul gaya gerak listrik (GGL) induksi e. Daya listrik dari kumparan primer ke kumparan sekunder dengan perantara garis gaya magnet atau fluks magnet (Φ) yang dibangkitkan oleh aliran listrik yang mengalir melalui kumparan primer. Untuk dapat membangkitkan tegangan listrik pada kumparan sekunder, fluks magnet yang dibangkitkan oleh kumparan primer harus berubah-ubah. Untuk memenuhi hal ini, aliran listrik yang mengalir melalui kumparan primer haruslah aliran listrik arus bolak-balik (AC). Saat kumparan primer ke sumber listrik AC, pada kumparan primer timbul gaya gerak magnet bersama yang bolak-balik juga. Dengan adanya gaya gerak magnet ini, di sekitar

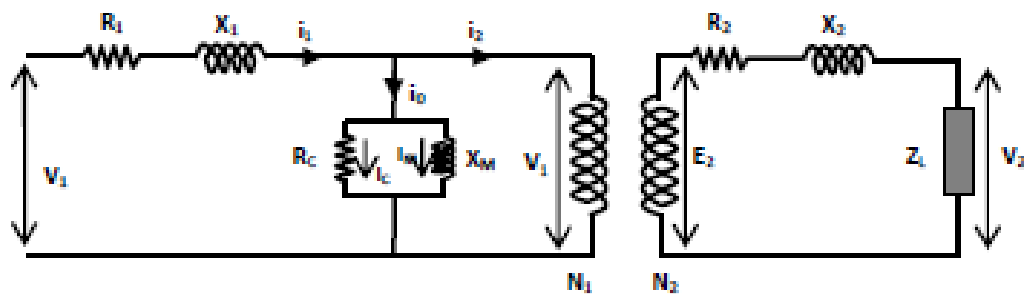
¹ Zuhail, *Dasar Teknik Tenaga Listrik dan Elektronika Daya*, Jakarta, 1995, hlm. 43.



kumparan primer timbul fluks magnet bersama yang juga bolak-balik. Adanya fluks magnet bersama ini, pada ujung-ujung kumparan sekunder timbul gaya gerak listrik sekunder yang mungkin sama, lebih tinggi, atau lebih rendah dari gaya gerak listrik primer. Hal ini tergantung pada perbandingan transformasi kumparan transformator tersebut.²

2.1.2 Rangkaian Ekuivalen Transformator

Dalam hal ini tidak seluruh fluks (Φ) yang dihasilkan oleh arus permagnetan I_M merupakan Fluks bersama (Φ_M), sebagian darinya hanya mencakup kumparan primer (Φ_1), atau kumparan sekunder saja (Φ_2). Dalam model rangkaian (rangkaian ekuivalen) yang dipakai untuk menganalisis kerja suatu transformator, adanya fluks bocor . Φ_1 dan Φ_2 ditunjukkan sebagai reaktansi X_1 dan X_2 . Sedang rugi tahanan ditunjukkan dengan R_1 dan R_2 . Dengan demikian ‘model’ rangkaian dapat dituliskan seperti pada gambar 2.1.



Gambar 2.1. Rangkaian Pengganti Transformator

Keterangan:

- R_1 = Hambatan primer
- X_1 = Reaktansi Primer
- R_2 = Hambatan sekunder
- X_2 = Reaktansi Sekunder
- R_c = Hambatan inti
- X_M = Reaktansi magnet³

² Sulasno dalam Putu Rusdi Ariawan, “Transformator”, Bali, 1990, hlm. 6.

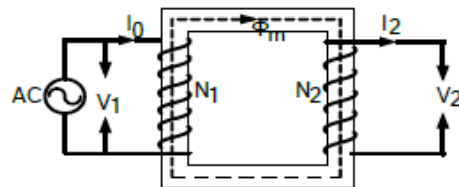
³ Zuhail, 1995a, *op. cit.*, hlm. 47.



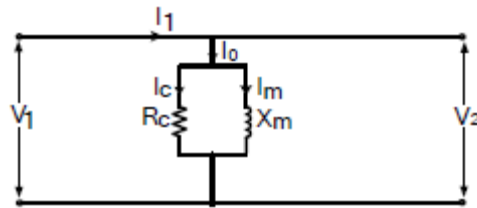
Parameter transformator yang terdapat pada model rangkaian (rangkaian ekivalen) dapat ditentukan besarnya dengan dua macam pengukuran.

1. Keadaan Transformator Tanpa Beban

Pada keadaan transformator tanpa beban, bila kumparan primer suatu transformator dihubungkan dengan sumber tegangan V_1 yang sinusoidal, akan mengalirkan arus primer I_0 yang juga sinusoidal dan dengan menganggap belitan N_1 reaktif murni. Transformator tanpa beban dapat dilihat pada gambar 2.2. dan rangkaian ekivalennya pada gambar 2.3.



Gambar 2.2. Transformator dalam keadaan tanpa beban



Gambar 2.3. Rangkaian ekivalen transformator dalam keadaan tanpa beban

Adapun perbandingan antara rangkaian primer dan sekunder adalah :

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2} = a \quad (2.1)^4$$

Dimana :

E_1 = ggl induksi di sisi primer (volt)

E_2 = ggl induksi di sisi sekunder (volt)

N_1 = jumlah belitan sisi primer

N_2 = jumlah belitan sisi sekunder

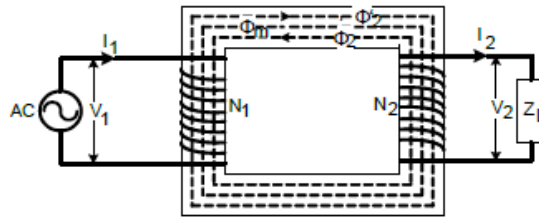
a = Faktor transformasi

⁴ Elis Pahala Nainggolan, "Studi Pengaruh Ketidakseimbangan Beban Terhadap Arus Netral dan Losses Pada Transformator Distribusi", *skripsi* jurusan Teknik Elektro, 2010, hlm. 6.

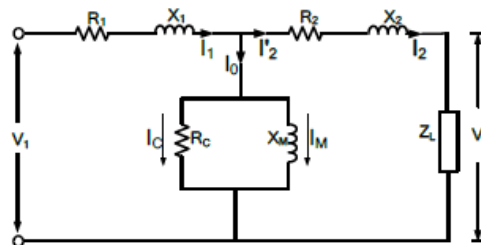


2. Keadaan Transformator Berbeban

Apabila kumparan sekunder dihubungkan dengan beban Z_L , I_2 mengalir pada kumparan sekunder, dimana $I_2 = \frac{V_2}{Z_L}$. Rangkaian transformator dalam keadaan berbeban dapat dilihat pada gambar 2.4. dan 2.5.



Gambar 2.4. Transformator dalam keadaan berbeban



Gambar 2.5. Rangkaian ekivalen transformator dalam keadaan berbeban

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{N_2}{N_1} \quad (2.2)^5$$

Dimana :

I_1 = arus pada di sisi primer (ampere)

I_2 = arus pada di sisi sekunder (ampere)

N_1 = jumlah belitan sisi primer

N_2 = jumlah belitan sisi sekunder

Dari kedua persamaan diatas maka didapatkan :

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{N_2}{N_1} = \frac{E_2}{E_1} \quad (2.3)$$

⁵ *Ibid*, hlm. 10.



2.2 Transformator distribusi

Transformator distribusi merupakan alat yang memegang peran penting dalam sistem distribusi. Transformator distribusi mengubah tegangan menengah menjadi tegangan rendah. Transformator distribusi yang umum digunakan adalah transformator *step-down* 20kV/400V. Tegangan fasa ke fasa sistem jaringan tegangan rendah adalah 380V. Karena terjadi drop tegangan, maka pada rak tegangan rendah dibuat di atas 380V agar tegangan pada ujung penerima tidak lebih kecil dari 380V.⁶

2.2.1 Inti Besi

Inti besi berfungsi untuk membangkitkan fluksi yang timbul karena arus listrik dalam belitan atau kumparan trafo, sedang bahan ini terbuat dari lempengan-lempengan baja tipis. Hal ini dimaksudkan untuk mengurangi panas yang diakibatkan oleh arus eddy (eddy current), dapat dilihat pada gambar 2.6.⁷



Gambar 2.6. Inti Besi

2.2.2 Kumparan Primer dan Kumparan Sekunder

Kawat email yang berisolasi terbentuk kumparan serta terisolasi baik antar kumparan maupun antara kumparan dan inti besi. Terdapat dua kumparan pada inti tersebut yaitu kumparan primer dan kumparan sekunder seperti pada gambar 2.7. bila salah satu kumparan tersebut diberikan tegangan maka pada kumparan

⁶ Hans Tua M. Sinaga, “Studi Analisis Gangguan Trafo Distribusi Pada Saluran Distribusi 20 kV di PT. PLN Cabang Medan”, *skripsi* jurusan Teknik Elektro, Medan, 2011, hlm. 6.

⁷ Suhadi et al, *Teknik Distribusi Tenaga Listrik jilid 3*, Jakarta, 2008, hlm. 308.



akan membangkitkan fluksi pada inti serta menginduksi kumparan lainnya sehingga pada kumparan sisi lain akan timbul tegangan.⁸



Gambar 2.7. Kumparan transformator

2.2.3 Minyak Trafo

Belitan primer dan sekunder pada inti besi pada trafo terendam minyak trafo, hal ini dimaksudkan agar panas yang terjadi pada kedua kumparan dan inti trafo oleh minyak trafo dan selain itu minyak tersebut juga sebagai isolasi pada kumparan dan inti besi.⁹

2.2.4 Isolator Bushing

Pada ujung kedua kumparan trafo baik primair ataupun sekunder keluar menjadi terminal melalui isolator yang juga sebagai penyekat antar kumparan dengan body badan trafo. Konstruksi suatu *bushing* sederhana ditunjukkan pada Gambar di bawah ini.⁷



Gambar 2.8. Bushing

⁸ *Ibid.*

⁹ *Ibid.*

⁷ *Ibid.*



2.2.5 Tangki Konservator

Bagian-bagian trafo yang terendam minyak trafo berada dalam tangki, sedangkan untuk pemuaian minyak tangki dilengkapi dengan konservator yang berfungsi untuk menampung pemuaian minyak akibat perubahan temperature.⁸

Gambar 2.9. menunjukkan bentuk tangki konservator yang ada di lapangan.



Gambar 2.9. Tangki konservator

2.2.6 Katup Pembuangan dan Pengisian

Katup pembuangan pada trafo berfungsi untuk menguras pada penggantian minyak trafo, hal ini terdapat pada trafo diatas 100 kVA, sedangkan katup pengisian berfungsi untuk menambahkan atau mengambil sample minyak pada trafo.⁹

2.2.7 Oil Level

Fungsi dari oil level tersebut adalah untuk mengetahui minyak pada tangki trafo, oil level inipun hanya terdapat pada trafo diatas 100 kVA.¹⁰

2.2.8 Indikator Suhu Trafo

Untuk mengetahui serta memantau keberadaan temperature pada oil trafo saat beroperasi, untuk trafo yang berkapasitas besar indikator limit tersebut dihubungkan dengan rele temperature.¹¹

⁸ *Ibid.*

⁹ *Ibid.*

¹⁰ *Ibid.*

¹¹ *Ibid.*



2.2.9 Pernapasan Trafo

Karena naik turunnya beban trafo maupun suhu udara luar, maka suhu minyaknya akan berubah-ubah mengikuti keadaan tersebut. Bila suhu minyak tinggi, minyak akan memuai dan mendesak udara diatas permukaan minyak keluar dari tangki, sebaliknya bila suhu turun, minyak akan menyusut maka udara luar akan masuk kedalam tangki. Kedua proses tersebut diatas disebut pernapasan trafo, akibatnya permukaan minyak akan bersinggungan dengan udara luar, udara luar tersebut lembab. Oleh sebab itu pada ujung pernapasan diberikan alat dengan bahan yang mampu menyerap kelembaban udara luar yang disebut kristal zat Hygrokopsis (*Clilicagel*).¹²

2.2.10 Pendingin Trafo

Sistem pendinginan trafo dapat dikelompokkan sebagai berikut :

1. ONAN (*Oil Natural Air Natural*)

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

2. ONAF (*Oil Natural Air Force*)

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

3. OFAF (*Oil Force Air Force*)

Pada sistem ini, sirkulasi minyak digerakkan dengan menggunakan kekuatan pompa, sedangkan sirkulasi udara menggunakan kipas angin.¹³

¹² *Ibid*, hlm. 309.

¹³ Hans Tua M. Sinaga, 2011a, *op. cit.*, hlm. 13.



2.2.11 Tap Changer Trafo (Perubahan Tap)

Tap changer adalah alat perubah pembanding transformasi untuk mendapatkan tegangan operasi sekunder yang sesuai dengan tegangan sekunder yang diinginkan dari tegangan primer yang berubah-ubah. Tiap changer hanya dapat dioperasikan pada keadaan trafo tidak bertegangan atau disebut dengan “*Off Load Tap Changer*” serta dilakukan secara manual.¹⁴

2.3 Kelompok Vektor

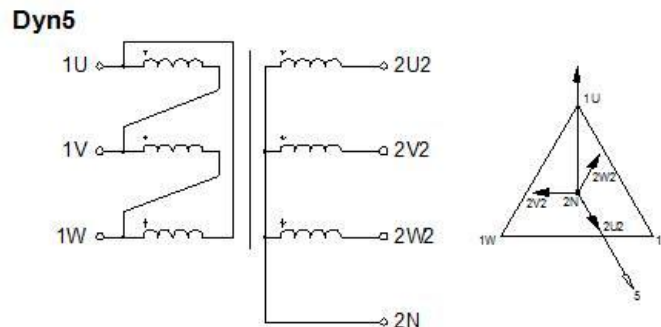
1. Kelompok vektor Yzn 5 dipakai pada trafo berkapasitas sampai dengan 250 KVA
2. Kelompok vektor Dyn 5 dipakai pada trafo berkapasitas dari 250 KVA sampai dengan 1600 KVA. Bila tegangan sekundernya ganda, dapat dipakai serentak
3. Kelompok vektor Yzn 5 dan Yyn 6 dipakai pada trafo sampai dengan 250 KVA untuk jaringan distribusi, diatas 250 KVA sampai 630 KVA dipakai untuk keperluan tertentu. Bila tegangan sekundernya ganda tidak digunakan secara serentak. Kelompok Yzn 5 dipakai pada tegangan sekunder 231 / 400 v.

Transformator 3 fasa antara tegangan primer dan tegangan sekunder perbedaan fasa dapat diatur dengan metoda aturan hubungan jam belitan trafo. Satu putaran jam dibagi dalam 12 bagian, jika satu siklus sinusoida 360° , maka setiap jam berbeda fasa 30° ($360^\circ/12$).

¹⁴ Suhadi *et al.*, 2008a, *loc. cit.*



Gambar 2.10. ini menunjukkan kelompok hubungan Dyn5 dimana huruf D pertama belitan primer dalam hubungan Delta (segitiga), huruf y kedua belitan sekunder hubungan way (bintang), n menunjukkan belitan sekunder (hubung bintang) dinetralkan. Angka 5 menunjukkan beda fasa tegangan primer-sekunder $5 \times 30^\circ = 150^\circ$.¹⁵



Gambar 2.10. Kelompok hubungan dyn5

2.4 Jenis – Jenis Gangguan Transformator

Transformator merupakan suatu peralatan yang rentan akan terkena gangguan. Berikut ini merupakan jenis – jenis gangguan yang terjadi pada transformator distribusi.¹⁶

2.4.1 Tegangan Lebih Akibat Petir

Gangguan sambaran petir dibagi atas dua, yaitu sambaran langsung dan sambaran tidak langsung. Sambaran langsung adalah sambaran petir dari awan yang langsung menyambar jaringan sehingga menyebabkan naiknya tegangan dengan cepat. Daerah yang terkena sambaran dapat terjadi pada *tower* dan juga kawat penghantar. Besarnya tegangan dan arus akibat sambaran ini tergantung pada besar arus kilat, waktu muka, dan jenis tiang saluran.

¹⁵ PT. PLN (PERSERO) Pusat Pendidikan dan Pelatihan, *Teknik Listrik Terapan*, 2010. hlm. 28.

¹⁶ Hans Tua M. Sinaga, 2011b, *op. cit.*, hlm. 9.



Sambaran tidak langsung atau sambaran induksi adalah sambaran petir ke bumi atau sambaran petir dari awan ke awan di dekat saluran sehingga menyebabkan timbulnya muatan induksi pada jaringan.¹⁷

2.4.2 Gangguan Hubung Singkat

Hubung singkat dapat terjadi melalui dua atau tiga saluran fasa system distribusi. Arus lebih yang dihasilkan hubung singkat tergantung pada besar kapasitas daya penyulang, besar tegangan, dan besar impedansi rangkaian yang mengalami gangguan. Hubung singkat menghasilkan panas yang cukup tinggi pada sisi primer trafo sebagai akibat dari naiknya rugi-rugi tembaga sebagai perbandingan dari kuadrat arus gangguan. Arus gangguan yang besar ini mengakibatkan tekanan mekanik (*mechanical stress*) yang tinggi pada trafo. Arus hubung singkat pada trafo dapat dihitung dengan menggunakan persamaan :

$$I_{sc} = \frac{S.100}{\%Z \cdot \sqrt{3} \cdot V_{L-L}} \quad (2.4)^{18}$$

Dimana :

S = Daya transformator (VA)

%Z = impedansi transformator (ohm)

V_{L-L} = Tegangan fasa-fasa pada sisi tegangan rendah (V)

2.4.3 Gangguan Kegagalan Minyak Transformator

Kegagalan isolasi (*insulation breakdown*) minyak trafo disebabkan oleh beberapa hal antara lain minyak trafo tersebut sudah lama dipakai, berkurangnya kekuatan dielektrik dan karena isolasi tersebut dikenakan tegangan lebih. Pada prinsipnya tegangan pada isolator merupakan suatu tarikan atau tekanan (*stress*) yang harus dilawan oleh gaya dalam isolator itu sendiri agar

¹⁷ *Ibid.*

¹⁸ *Ibid*, hlm. 11.



isolator tersebut tidak gagal. Dalam struktur molekul material isolator, elektron-elektron terikat erat pada molekulnya, dan ikatan ini mengadakan perlawanan terhadap tekanan yang disebabkan oleh adanya tegangan. Bila ikatan ini putus pada suatu tempat maka sifat isolasi pada tempat itu akan hilang. Bila pada bahan isolasi tersebut diberikan tegangan akan terjadi perpindahan elektron-elektron dari suatu molekul ke molekul lainnya sehingga timbul arus konduksi atau arus bocor. Karakteristik isolator akan berubah bila material termasuk suatu ketidakmurnian (*impurity*) seperti adanya arang atau kelembaban dalam isolasi yang dapat menurunkan tegangan tembus.

Oksigen yang terdapat di udara yang berhubungan dengan minyak yang panas dapat mengakibatkan terjadinya oksidasi dan terbentuknya bahan asam dan endapan. Kadar asam yang terdapat pada minyak trafo merupakan suatu ukuran taraf deteriorasi dan kecenderungan untuk membentuk endapan. Endapan ini sangat mengganggu karena melekat pada semua permukaan trafo dan mempersulit proses pendinginan. Endapan ini juga akan meningkatkan kemungkinan terjadinya bunga api antara bagian-bagian trafo yang terbuka. Suatu endapan setelah mencapai tebal 0,2 mm sampai 0,4 mm pada inti dan kumparan akan dapat meningkatkan suhu sampai 10°C sampai 15°C. Bila dalam minyak terdapat kelembaban, maka kelembaban tersebut dapat membentuk jalur-jalur yang membuka jalan terhadap terjadinya hubung singkat. Kelembaban tidak saja menurunkan daya isolasi minyak, melainkan kelembaban itu dapat pula diserap oleh bahan isolasi lainnya, sehingga seluruh trafo menjadi terancam.²⁰

2.4.4 Overload dan Beban Tidak Seimbang

Overload terjadi karena beban yang terpasang pada trafo melebihi kapasitas maksimum yang dapat dipikul trafo dimana arus beban melebihi arus beban penuh (*full load*) dari trafo. *Overload* akan menyebabkan trafo menjadi panas dan kawat tidak sanggup lagi menahan beban, sehingga timbul panas yang menyebabkan naiknya suhu lilitan tersebut. Kenaikan ini menyebabkan rusaknya isolasi lilitan pada kumparan trafo. Sedangkan Beban Tidak Seimbang

²⁰ Hans Tua M. Sinaga, 2011c, *op. cit.* hlm. 12.



berhubungan terhadap besarnya arus yang mengalir pada kawat netral trafo yang berujung pada rusaknya belitan trafo.²¹

2.4.5 *Loss Contact pada Terminal Bushing*

Gangguan ini terjadi pada bushing trafo yang disebabkan terdapat kelonggaran pada hubungan kawat fasa (kabel schoen) dengan terminal bushing.

Kelonggaran pada terminal bushing ini lama-kelamaan akan menyebabkan panas pada bushing meskipun arus / pembebanan yang normal. Selain itu, hal ini mengakibatkan tidak stabilnya aliran listrik yang diterima oleh trafo distribusi dan dapat juga menyebabkan kerusakan belitan trafo.²²

Berdasarkan Pengukuran dan penilaian resiko pembebanan serta kemampuan listrik transformator di PT. PLN (Persero), maka besarnya temperatur yang membahayakan pada terminal bushing adalah sebesar ≥ 200 °C.²³

Adapun untuk menghitung panas yang terjadi pada penghantar yang melalui bushing adalah sebagai berikut :

$$\Delta T = \frac{Q}{m \times C} \quad (2.6)^{24}$$

Untuk mencari kalor, dapat diketahui dengan menggunakan rumus :

$$Q = I^2 \times R \times t \quad (2.7)^{25}$$

$$R = \rho \frac{\ell}{A} \quad (2.8)^{26}$$

²¹ M. Iqbal Arif S dan M. Kharis Imdad, “Pemeliharaan Trafo Distribusi”, *Proyek Akhir*, Tuban, 2012.

²² *Ibid.*

²³ PT. PLN (PERSERO), “Analisa dan Penaksiran Kondisi Kesehatan Trafo (Online & Offline) / Metode CBM”, hlm.122.

²⁴ Wiki Buku, ”Rumus-rumus Fisika Lengkap/Kalor”, diakses dari http://id.wikibooks.org/wiki/Rumus-Rumus_Fisika_Lengkap/Kalor.html, pada tanggal 6 Juni 2014

²⁵ Erixwilanda, “Arus Listrik”, diakses dari <http://www.scribd.com/doc/215130731/listrik-dinamis.Html>, pada 6 Juni 2014

²⁶ *Ibid*, hlm. 19.



Keterangan :

- Q = kalor (joule)
 C = kalor jenis ($J/kg^{\circ}C$)
 m = massa benda (kg)
 ΔT = perubahan suhu ($^{\circ}C$)
 I = arus gangguan (Ampere)
 t = waktu (detik)
 R = resistansi penghantar (ohm)
 ℓ = panjang penghantar (m)
 A = luas penampang (mm^2)

2.4.6 Isolator Bocor / Bushing Pecah

Gangguan akibat isolator bocor/bushing pecah dapat disebabkan oleh :

1. *Flash Over*

Flash Over dapat terjadi apabila muncul tegangan lebih pada jaringan distribusi seperti pada saat terjadi sambaran petir/surja hubung. Bila besar surja tegangan yang timbul menyamai atau melebihi ketahanan impuls isolator, maka kemungkinan akan terjadi *flash over* pada bushing. Pada system 20 KV, ketahanan impuls isolator adalah 160 kV. *Flash over* menyebabkan loncatan busur api antara konduktor dengan bodi trafo sehingga mengakibatkan hubungan singkat fasa ke tanah.

2. Bushing Kotor

Kotoran pada permukaan bushing dapat menyebabkan terbentuknya lapisan penghantar di permukaan bushing. Kotoran ini dapat mengakibatkan jalannya arus melalui permukaan bushing sehingga mencapai body trafo. Umumnya kotoran ini tidak menjadi penghantar sampai endapan kotoran tersebut basah karena hujan/embun.²⁷

²⁷ M. Iqbal Arif S dan M. Kharis Imdad, 2012a, *loc. cit.*



2.5 Proteksi pada Gardu Transformator Distribusi

Adapun peralatan proteksi pada gardu transformator distribusi adalah sebagai berikut :

2.5.1 Fuse

Fuse adalah peralatan proteksi arus lebih yang bekerja dengan menggunakan prinsip melebur. Fuse yang didesain untuk digunakan pada tegangan diatas 600V dikategorikan sebagai fuse *cutout*. Fuse *cutout* jenis ekspulsi (*expulsion type*) adalah jenis yang paling sering digunakan pada sistem distribusi saluran udara. Fuse jenis ini menggunakan elemen fuse yang relatif pendek yang dipasang di dalam fuse *catridge*. Pada umumnya fuse *cutout* dipasang antara trafo distribusi dengan saluran distribusi primer. Pada saat terjadi gangguan, elemen fuse akan melebur dan memutuskan rangkaian sehingga akan melindungi trafo distribusi dari kerusakan akibat gangguan dan arus lebih pada saluran primer, atau sebaliknya memutuskan saluran primer dari trafo distribusi apabila terjadi gangguan pada trafo atau jaringan sisi sekunder sehingga akan mencegah terjadinya pemadaman pada seluruh jaringan primer.²⁸

Untuk menghitung besarnya arus fuse *link* yang terpasang sebagai pengaman transformator, dapat diketahui dengan menggunakan rumus :³²

$$I_{\text{fuse}} = 1,02 \text{ s/d } 1,3 I_n \text{ trafo (Ampere)} \quad (2.9)$$

$$I_n = \frac{S}{\sqrt{3} \times v} \quad (2.10)$$

Keterangan :

I_n = arus nominal pada sisi primer (A)

S = kapasitas transformator (VA)

V = tegangan trafo sisi primer (V)

²⁸ Hans Tua M. Sinaga, 2011c, *op. cit.*, hlm. 18.

³² Wahyudi Sarimun, *Proteksi Sistem Distribusi Tenaga Listrik*, Bekasi, 2012, hlm. 128.



Tabel 2.1 Spesifikasi fuse cut out (FCO) dan fuse link (expulsion type) tegangan menengah (publikasi IEC No. 282-2 – NEMA).

Daya trafo distribusi (kVA)	Arus nominal (A)	Arus pengenal fuse link (A)	
		Min	Maks
Fasa tunggal			
25	2,2	3,13 H	3,13 H
50	4,3	5 H	6,3 H
Fasa-tiga			
50	1,44	2 H	2 H
100	2,89	5 H	6,3 K, T
160	4,6	6,3 H	8 K, T
200	5,78	6,3 H	10 K, T
250	7,22	8 T	12,5 K, T
315	9,09	10 T	12,5 K, T
400	11,55	12,5 T	16 K, T
500	14,43	20 T	25 K, T
630	18,18	25 T	31,5 K, T
Catatan : K : Pelebur tipe cepat T : Pelebur tipe lambat H : Pelebur tahan surja petir			

2.5.2 Lightning Arrester

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



melebihi 2 mA. Apabila arus bocor melebihi angka tersebut, kemungkinan besar arrester mengalami kerusakan.³³

2.5.3 NH Fuse

NH fuse berfungsi sebagai pengamanan transformator terhadap arus lebih yang terpasang pada sisi tegangan rendah (20kV), maupun karena beban lebih.

Adapun cara menghitung KHA yang akan dipilih adalah dengan menggunakan rumus :³⁴

$$\text{Arus tiap jurusan} = \frac{I_n}{\text{jumlah jurusan}} \quad (2.11)$$

$$\text{Arus pengenalan NH fuse dipilih} = \text{Arus tiap jurusan} \times 0,9 \quad (2.12)$$

Dimana :

I_n = arus nominal pada sisi sekunder

0,9 = faktor kali keamanan

Tabel 2.2 KHA NH Fuse untuk masing-masing daya dan jurusan

No.	Daya trafo (kVA)	NH fuse (A), $V_{ph-ph} = 400$ V						
		Jumlah jurusan						
		1	2	3	4	5	6	7
1.	100	120	60					
2.	200	250	120	85	65			
3.	315	400	200	135	100			
4.	400	510	250	170	125	100	85	
5.	630	800	400	275	200	160	135	110

2.6 Faktor - Faktor yang harus Diperhatikan dalam Menganalisa Transformator

Ada beberapa faktor yang perlu diperhatikan dalam menganalisa transformator seperti kondisi instalasi, kondisi thermal peralatan, kondisi pembebanan dan kondisi minyak.

³³ *Ibid.*

³⁴ Wahyudi Sarimun, *Buku Saku Pelayanan Teknik*, Bekasi, 2011, hlm. 60.



2.6.1 Kondisi Instalasi (data visualisasi)

Analisa Kondisi instalasi merupakan langkah awal yang harus dilakukan dalam menganalisa Kondisi kesehatan Trafo distribusi. Kondisi ini ditunjukkan dengan data Visualisasi yang didapatkan dari kegiatan inspeksi / pengukuran. Melalui data Visualisasi tersebut maka kita dapat mengetahui kondisi ketidaknormalan trafo yang sedang beroperasi seperti : kebocoran Minyak, Bushing Trafo retak / pecah, Loss kontak pada terminasi akibat ketidak sesuaian KHA kabel, Grounding putus, ketidak sesuaian peralatan Proteksi, dll. Kondisi tersebut merupakan salah satu titik fokus bagi seorang Engineer Trafo dalam mengambil kesimpulan analisa Trafo (Rekomendasi).³⁵

Tabel 2.3 Evaluasi Hasil Instalasi / Konstruksi

No	Rincian pengukuran	Kriteria sehat
1	Pemeriksaan Visual	<i>Tidak terjadi kebocoran minyak trafo, isolator utuh dan baik secara fisik, Aksessoris Trafo Baik</i>
2	Instalasi Pembumian	<i>Terpasang benar dengan nilai pentanahan < 5 Ohm</i>
3	Instalasi kabel TR/TM	<i>Sesuai standar konstruksi, rapih dan terpasang kuat pada kabel tray</i>
4	Terminasi	<i>Bersih, tidak tampak crack / alur retakan</i>
5	Kekencangan baut terminasi kabel pada bushing trafo	<i>18 Nm (atau merujuk pada rekomendasi pabrik)</i>

³⁵ PT. PLN (PERSERO), *op. cit.*, hlm. 91.



Tabel 2.4 Kesesuaian Sistem Proteksi

No	Rincian pengukuran	Kriteria sehat
1	Arrester	<i>Instalasi arrester sesuai konstruksi dengan tahanan pentanahan arrester < 1,73 Ohm, Arus bocor Arrester < 30 mA atau disesuaikan dengan masing-masing standard pabrikan</i>
2	Cut Out	<i>Instalasi cut out lengkap dan terpasang sesuai standar konstruksi</i>
3	Fuse link TM	<i>Rating fuse link sesuai dengan besaran trafo distribusi</i>
4	PHB TR	<i>Instalasi PHB TR terpasang lengkap dan sesuai standar peralatan dan konstruksi. Tidak terjadi overheated pada simpul2 kritis.</i>
5	Fuse PHB TR	<i>Rating fuse sesuai besaran maksimum proteksi arus maksimum tiap jurusan</i>

2.6.2 Kondisi Pembebanan

Analisa pembebanan merupakan salah satu hal yang harus dilakukan dalam menentukan resiko kesehatan trafo distribusi yang sedang beroperasi. Analisa Pembebanan pada trafo berhubungan terhadap beberapa hal yaitu kertas isolasi trafo, KHA dari kabel dan lilitan, serta suhu dari trafo. Semakin besar beban yang dipikul oleh sebuah trafo maka semakin besar pula suhu yang akan dirasakan.

Analisa pembebanan dimaksudkan untuk menghindari beroperasinya sebuah trafo distribusi melewati batas ratingnya (overload) maupun beban tidak seimbang (unbalance). Bila hal ini terjadi maka potensi kegagalan trafo distribusi akan semakin meningkat karena trafo yang dibebani secara overload akan berhubungan langsung terhadap kenaikan suhu (belitan dan isolasi) yang berdampak pada kerusakan belitan dan kertas isolasi trafo.³⁶

³⁶ *Ibid*, hlm. 93.



Untuk mengetahui berapa besar pembebanan transformator, dapat menggunakan rumus sebagai berikut :³⁷

$$\text{Persentase pembebanan transformator} = \frac{I_{rata-rata}}{I_n} \times 100 \% \quad (2.13)$$

$$I_{rata-rata} = \frac{I_R + I_S + I_T}{3} \quad (2.14)$$

Dimana :

$$I_{rata-rata} = \text{ arus rata-rata (A)}$$

1. Beban Lebih (overload)

Pembebanan yang berlebihan (Overload) akan mengakibatkan panas berlebih pada transformator dimana akan mempercepat proses oksidasi pada minyak. Hasil oksidasi inilah sebagai pemicu pengikisan unsur logam hingga pada akhirnya penurunan kemampuan isolasi.

Umur transformator merupakan fungsi dari umur sistem insulasinya. Umur insulasi didefinisikan berakhir bila kekuatan mekanikalnya telah menurun hingga 50% kekuatan awal. Pada batas ini transformator masih dapat beroperasi namun rentan terhadap berbagai gangguan. Untuk trafo dengan isolasi kelas A seperti halnya transformator desain SPLN, transformator masih dapat beroperasi namun sangat rentan terhadap berbagai gangguan. Pada batas inilah system insulasi didalam trafo akan mengalami penurunan. Penurunan ini akan dicapai dalam waktu 180.000 jam (20,55 tahun) bila trafo dioperasikan pada kapasitas beban diatas normal secara kontinyu. Berdasarkan standar SPLN D3.002-1 2007 bahwa persentase pembebanan transformator yang baik adalah sebesar 50 %.³⁸

2. Beban Tidak Seimbang

Pada dasarnya kinerja trafo secara individual tidak terpengaruh oleh pembebanan yang tidak seimbang dengan catatan arus yang terdapat pada

³⁷ Badaruddin, "Pengaruh Ketidakseimbangan Beban Terhadap Arus Netral Dan Losses Pada Trafo Distribusi Proyek Rusunami Gading Icon", Jakarta, 2012, hlm. 17.

³⁸ PT. PLN (PERSERO), *op. cit.*, hlm. 94.



tiap-tiap fasa tidak melebihi arus rating dari trafo tersebut. Akan tetapi mengingat akan keseimbangan sistem, maka ketidak seimbangan beban perlu dibatasi. Beban tiga fasa yang tidak seimbang akan dipikul oleh dua fasa yang sehat, sehingga arus primer dari fasa yang sehat akan mengalami kenaikan. Pembebanan trafo yang tidak seimbang selain menambah besar rugi-rugi akan mempengaruhi umur trafo itu sendiri. Oleh karena itu Pembebanan trafo yang tidak seimbang, dibatasi 25% dari rata – rata beban fasa.³⁹

Untuk mengetahui persentase beban tidak seimbang dapat menggunakan persamaan di bawah ini.

Persentase ketidakseimbangan beban

$$= \frac{|I_R - I_{\text{rata-rata}}| + |I_S - I_{\text{rata-rata}}| + |I_T - I_{\text{rata-rata}}|}{I_R + I_S + I_T} \times 100\% \quad (2.15)^{40}$$

Dimana :

$$I_R = \text{Arus fasa R} \quad (\text{A})$$

$$I_S = \text{Arus fasa S} \quad (\text{A})$$

$$I_T = \text{Arus fasa T} \quad (\text{A})$$

2.6.3 Kondisi Minyak

Analisa Kondisi minyak trafo merupakan salah satu hal terpenting yang harus dilakukan dalam melakukan penaksiran kondisi kesehatan trafo. Melalui analisa ini kecenderungan resiko kegagalan trafo akibat degradasi fungsi isolasi yang terjadi di dalam tangki trafo dapat diidentifikasi. Sebagaimana kita ketahui bahwa fungsi utama dari minyak trafo ialah sebagai mediator pendingin maupun isolasi didalam trafo selain kertas isolasi trafo itu sendiri. Oleh karena itu jika kondisi dari suatu minyak trafo yang sedang beroperasi terindikasi buruk (dibawah kriteria sehat) maka fungsi-fungsi dari minyak trafo tersebut tidak akan bekerja optimal pada saat terjadi stress tegangan ataupun panas yang ditimbulkan oleh winding pada saat pembebanan.

³⁹ *Ibid*, hlm. 96.

⁴⁰ Badaruddin, 2012a, *loc. cit.*



Identifikasi kondisi minyak trafo dimaksudkan untuk mengetahui apakah kondisi dari minyak trafo masih dalam kondisi normal pada saat trafo tersebut dioperasikan, dengan demikian potensi kegagalan / kerusakan pada trafo tersebut dapat diketahui secara dini.⁴¹

Tabel 2.5 Pengukuran / penilaian resiko kualitas minyak (IEC 60422:2005)

No	Rincian pengukuran	Kriteria sehat
1	Tegangan tembus / 2,5 mm	Baik >40 kV; sedang 30 – 40 kV; buruk < 30 kV
2	Kadar air	Baik <10; sedang 10-25; buruk >25 ppm
3	Warna minyak	Baik = Jernih; buruk = gelap / keruh
4	Kadar keasaman	Baik < 0,15; sedang 0,15-0,3; buruk >0,3 mg KOH/g

2.6.4 Tahanan Isolasi

Pengujian ini dimaksudkan untuk mengetahui kondisi internal trafo dalam hal ini apakah fungsi utama trafo untuk mengisolasi tegangan antar belitan masih berada dalam kondisi baik saat dioperasikan. Dalam pelaksanaannya pengujian ini dilakukan dengan menggunakan alat pengukur tahanan isolasi yang sering disebut Megger .

Jika Hasil pengujian tahanan isolasi tidak baik, sering kali menggambarkan kondisi kertas isolasi trafo distribusi yang sudah terdegradasi (rusak) atau kualitas dari minyak isolasi yang sudah tidak baik.

Besarnya nilai tahanan isolasi trafo minimum yang dikatakan baik ditentukan oleh kapasitas (KVA) dari masing-masing trafo dengan menggunakan rumusan dibawah ini (standard IEEE Std C57.125-199) :⁴²

$$R \text{ isolasi Min.} = \frac{C \times E}{\sqrt{kVA \times Ks}} = \dots \dots M\Omega \quad (2.16)$$

⁴¹ PT. PLN (PERSERO), *op. cit.*, hlm. 97.

⁴² *Ibid*, hlm. 111.



Dimana :

C = Faktor belitan yang terendam isolasi minyak = 0,8

E = Tegangan Tertinggi / Primer trafo (Volt)

kVA = Daya Trafo (kVA).

Ks = Faktor koreksi suhu belitan, misal pada suhu belitan 20°, Ks = 1

Dari rumusan diatas didapatkan nilai dari tahanan isolasi trafo minimum yang masih dikatakan baik seperti pada tabel berikut.⁴³

Tabel 2.6 Tahanan Isolasi Minimum Transformator

NO	KAPASITAS TRAFO (KVA)	TAHANAN ISOLASI MINIMUM (MΩ)		
		TM-BODY	TR-BODY	TM-TR
		MEGGER 5000V	MEGGER 1000V	MEGGER 5000V
1	100	1600 MΩ	1600 MΩ	1600 MΩ
2	160	1265 MΩ	1265 MΩ	1265 MΩ
3	250	1012 MΩ	1012 MΩ	1012 MΩ
4	315	902 MΩ	902 MΩ	902 MΩ
5	400	800 MΩ	800 MΩ	800 MΩ
6	630	637 MΩ	637 MΩ	637 MΩ
7	1000	506 MΩ	506 MΩ	506 MΩ
PENGUKURAN TAHANAN ISOLASI TM-TM DAN TR-TR HARUS = NOL (ZERO)				

⁴³ *Ibid*, hlm. 112.