

**KESAN HARMONIK SISTEM KUASA KE ATAS TRANSFORMER
PENGAGIHAN DAN REKABENTUK BARU DENGAN MENGAMBIL KIRA
TRANSFORMER FAKTOR-K**

**Oleh
Mohd Khairul Munir bin Jaafar**

**Disertasi ini dikemukakan kepada
UNIVERSITI SAINS MALAYSIA**

**Sebagai memenuhi sebahagian daripada syarat keperluan
untuk ijazah dengan kepujian**

SARJANA MUDA KEJURUTERAAN (KEJURUTERAAN ELEKTRIK)

**Pusat Pengajian Kejuruteraan
Elektrik dan Elektronik
Universiti Sains Malaysia**

Mei 2006

ABSTRAK

Peningkatan penggunaan beban tak lurus dalam sistem kuasa elektrik menyebabkan kebimbangan terhadap jangka hayat transformer. Aplikasi sistem kadaran faktor K ini adalah untuk menentukan suatu transformer beroperasi dengan selamat apabila membekali gelombang arus tidak sinus. Maka laporan ini disediakan untuk mengkaji kesan-kesan harmonik pada transformer pengagihan daripada ujikaji yang telah dilakukan terhadap transformer satu fasa 250VA. Kesan harmonik pada transformer dikaji apabila beban lurus dan beban tak lurus dibekalkan kepada transformer. Terdapat dua jenis beban yang digunakan iaitu perintang tulin dan penerus. Ujikaji dilakukan bagi menyiasat kesan harmonik ke atas transformer seperti kehilangan, kecekapan dan kenaikan suhu transformer. Selain itu di dalam laporan ini juga dimuatkan dengan cara untuk mengurangkan kesan harmonik kepada transformer iaitu kaedah nyahkadaran. Dua kaedah nyahkadaran yang digunakan ialah dengan menggunakan kaedah nyahkadaran yang terdapat di dalam piawai IEEE C57.110-1986 dan menggunakan piawai BS 7841. Hasil ujikaji menunjukkan kehilangan semakin bertambah apabila jumlah herotan harmonik bertambah, kecekapan transformer menurun apabila jumlah herotan harmonik bertambah dan kenaikan suhu transformer bertambah apabila beban tak lurus disambungkan kepada transformer berbanding beban lurus.

ABSTRACT

Increases of non linear load on power system will reduce the transformer's life expectancy. Distribution transformer manufacturers have been used the rating system called K-factor to ensure that the transformer can operate safely when supplying non-sinusoidal load current. This report was provided to show the effect of harmonic on the distribution transformer from the experiment done to single phase transformer 250VA. The effect of harmonic was investigated where linear and non linear load was connected to transformer. The load used in the experiment is pure resistance and rectifier. The experiments were done to investigate the effect of harmonic to the transformer such as losses, efficiency and temperature rise. Besides this report was included with the method used to reduce the harmonic effect to the transformer that is by using the derating method. Two derating method used is as recommended by standard of IEEE C57.110-1986 and BS 7821. The results show that there were increases in transformer losses, reduction of transformer efficiency and higher temperature rise compare to the linear load.

PENGHARGAAN

Dengan nama Allah yang Maha Pemurah lagi Maha Penyayang...

Bersyukur saya kepada Allah kerana dengan izinnya dapat saya menyiapkan projek tahun akhir ini. Berkat kesabaran dan ketekunan sepanjang menjalankan projek tahun akhir ini, akhirnya laporan projek tahun ini siap dilaksanakan.

Saya juga ingin mengucapkan jutaan terima kasih kepada penyelia saya, Dr Ir Syafrudin Masri yang telah banyak membantu saya dan tidak jemu memberi tunjukkan ajar, idea, dan cadangan yang bernas di dalam menjayakan projek tahun akhir ini.

Selain itu, tidak dilupakan juga kepada pembantu makmal, Encik Shauki kerana telah banyak membantu saya untuk menyediakan peralatan makmal dan juga turut menyumbang ilmu untuk menjayakan projek ini. Terima kasih juga saya ucapkan kepada kedua ibu bapa saya yang banyak memberi sokongan dan bantuan kewangan dan akhir sekali terima kasih juga kepada rakan seperjuangan yang turut sama memberi bantuan secara langsung atau pun tidak langsung di dalam menjayakan projek dan laporan tahun akhir ini.

“Di mana ada kemahuan, pastinya di situ ada kejayaan”

ISI KANDUNGAN

Muka Surat

ABSTRAK	ii
PENGHARGAAN	iv
JADUAL ISI KANDUNGAN	v

BAB 1 PENGENALAN

1.1	Pendahuluan	1
1.2	Objektif kajian	2
1.3	Metodologi	3
1.4	Panduan laporan	4

BAB 2 KAJIAN ILMIAH

2.1	Pengenalan	6
2.2	Transformer Ideal	7
2.3	Kadaran Transformer	12
2.4	Kecekapan Transformer	14
2.5	Harmonik Sistem Kuasa	15
2.5.1	Jumlah Herotan Harmonik (THD)	17
2.6	Kuasa dan Faktor Kuasa	18
2.7	Kehilangan Pada Transformer	19
2.8	Nyakhadaran Transformer	21
2.9.1	Menggunakan piawai ANSI/IEEE C57.110-1986	22
2.9.2	Menggunakan Piawai BS 7821	24
2.10	Transformer Faktor-K	25

BAB 3 KAEDAH IMPLIMENTASI

3.1	Pendahuluan	26
3.2	Ujikaji 1	27
3.3	Ujikaji 2	30
3.4	Ujikaji 3	33

BAB 4 KEPUTUSAN DAN PERBINCANGAN

4.1	Pendahuluan	35
4.2	Transformer Merupakan Sumber Harmonik	35
4.3	Kehilangan Pada Transformer	37
4.4	Kesan Faktor Kuasa Rendah Ke Atas Transformer	39
4.5	Kenaikan Suhu Transformer	41
4.6	Faktor-K	46
4.7	Nyakhadaran Transformer	48
4.7.1	Menggunakan Piawai ANSI/IEEE C57.110-1986	48
4.7.2	Menggunakan Kaedah Yang Digunakan Di Eropah	50

BAB 5 KESIMPULAN

5.1	Cadangan Dan Penambahbaikan	54
-----	-----------------------------------	----

RUJUKAN

LAMPIRAN A: KEPUTUSAN UJIKAJI

LAMPIRAN B: GELOMBANG YANG DI AMBIL DARIPADA FLUKE 43B

LAMPIRAN C: PENGIRAAN FAKTOR-K DAN K FAKTOR

BAB 1

PENGENALAN

1.1 Pendahuluan

Transformer merupakan suatu alat yang penting di dalam sistem kuasa elektrik. Ia digunakan untuk menukarkan aras voltan tertentu kepada aras voltan yang lain. Terdapat berbagai jenis transformer yang digunakan di dalam sistem kuasa dan setiap jenis transformer mempunyai fungsinya yang tersendiri. Untuk tujuan penghantaran kuasa transformer langkah-naik 11/400 kV digunakan. Transformer ini disambung di antara talian penjana dan talian penghantaran. Dalam sistem pengagihan kuasa elektrik transformer langkah-turun digunakan.

Transformer pengagihan digunakan di dalam sistem kemudahan awam untuk menurunkan voltan 11kV kepada 415V dan juga aras voltan yang lain mengikut keperluan. Transformer pengagihan disambungkan kepada beban yang terdiri daripada pengguna perumahan, komersil dan industri. Pengguna-pengguna ini menggunakan jenis beban yang berbeza mengikut aktiviti harian yang dilakukan. Beban boleh dibahagikan kepada dua iaitu beban lurus dan beban tak lurus. Beban tak lurus akan menyebabkan kehadiran harmonik kepada sistem kuasa.

Kehadiran harmonik di dalam arus dan voltan beban membimbangkan pihak utiliti kerana ia boleh menyebabkan kepanasan lampau di dalam belitan transformer. Ini adalah disebabkan kewujudan beban tak lurus seperti komputer, ballast elektronik, motor induksi dan lain-lain yang menyebabkan terjananya arus harmonik.

Peningkatan penggunaan beban tak lurus dalam sistem kuasa elektrik menyebabkan kebimbangan terhadap jangka hayat transformer. Pengeluar transformer pengagihan telah menggunakan sistem kadaran yang dipanggil Faktor-K iaitu suatu rekabentuk yang mana ia mampu menahan kesan harmonik daripada arus beban. Aplikasi sistem kadaran ini adalah untuk menentukan suatu transformer dalam keadaan tertentu memerlukan maklumat arus beban asasi dan harmonik yang diramal.

1.2 Objektif Kajian

Objektif utama projek ini adalah untuk melihat kesan harmonik terhadap transformer dan cara piawai untuk mengira nyahkadaran transformer. Aspek-aspek yang dikaji adalah meliputi ciri-ciri arus dan voltan keluaran transformer dan pengaruh beban lurus dan tak lurus ke atas transformer. Gelombang arus dan voltan keluaran dikaji dengan mendapatkan parameter-parameter kualiti kuasa iaitu jumlah herotan harmonik (THD), faktor kuasa (PF), Faktor-K dan sebagainya. Selain itu tujuan projek ini dijalankan juga adalah untuk meninjau kenaikan suhu transformer apabila membekali beban lurus dan tak lurus dan mencadangkan peratus nyahkadar untuk transformer.

1.3 Metodologi

Projek ini adalah tertumpu kepada kajian kesan harmonik terhadap sistem kuasa terutama kesannya terhadap transformer pengagihan. Projek ini akan dijalankan secara berperingkat-peringkat untuk memudahkan kajian dilakukan.

1.3.1 Peringkat pertama: Mengumpul maklumat

Semua maklumat mengenai projek yang dijalankan dikumpul. Maklumat-maklumat ini diperolehi daripada buku-buku rujukan, jurnal, tulisan ilmiah pelajar terdahulu dan internet. Maklumat ini digunakan untuk membuat perbandingan antara nilai teori dan nilai praktikal untuk setiap bahagian ujikaji di samping meramal hipotesis awal.

1.3.2 Peringkat kedua: Penyediaan alatan makmal

Sebelum memulakan ujikaji, alat pengukuran disediakan untuk mengukur parameter-parameter penting di dalam projek ini. Oleh kerana transformer pengagihan yang digunakan di dalam sistem kuasa tidak terdapat di dalam makmal, maka ujikaji ini akan dilakukan dengan transformer makmal.

1.3.3 Peringkat ketiga: Melakukan ujikaji makmal

Ujikaji makmal dilakukan berdasarkan objektif kajian dan beban yang digunakan ialah beban satu fasa lurus dan tak lurus dan kesannya terhadap transformer pengagihan.

1.3.4 Peringkat keempat: Mengumpul maklumat dan analisis

Setelah semua keputusan ujikaji dikumpulkan, keputusan tersebut dianalisis dan dibincangkan dengan terperinci.

1.3.5 Peringkat kelima: Kesimpulan dan cadangan

Kesimpulan dibuat berdasarkan keputusan dan analisis yang diperolehi dan ditentukan sama ada memenuhi objektif projek. Cadangan untuk penambahbaikan projek dibuat untuk membaiki kesilapan dan memastikan objektif projek tercapai.

1.4 Panduan Laporan

Bab 1 mempunyai pengenalan dan latar belakang projek yang dijalankan. Ia membincangkan secara ringkas kepentingan projek pada masa kini. Ia juga membincangkan secara ringkas tentang perjalanan projek. Selain itu di dalam bab ini objektif utama projek diterangkan secara jelas dan terperinci.

Bab 2 mengandungi kajian ilmiah terhadap projek yang dilakukan meliputi semua teori yang berkaitan dengan projek.

Bab 3 di dalam buku laporan ini dimuatkan dengan prosedur pelaksanaan projek meliputi semua ujikaji yang dijalankan. Dalam bab ini juga disenaraikan peralatan pengukuran yang digunakan bagi mendapatkan bacaan yang diperlukan.

Bab 4 merupakan keputusan ujikaji serta perbincangan. Setiap keputusan akan diikuti oleh perbincangan kepada keputusan tersebut. Selain itu bab ini juga mengandungi graf yang berkaitan dengan ujikaji yang dijalankan.

Bab 5 merupakan bahagian kesimpulan kepada keseluruhan projek yang dijalankan. Ia mengandungi cadangan penambah-baikkan untuk projek lanjutan seterusnya. Bahagian lampiran ini merupakan bahagian yang memuatkan hasil keputusan ujikaji yang dijalankan.

BAB 2

KAJIAN ILMIAH

2.1 Pengenalan

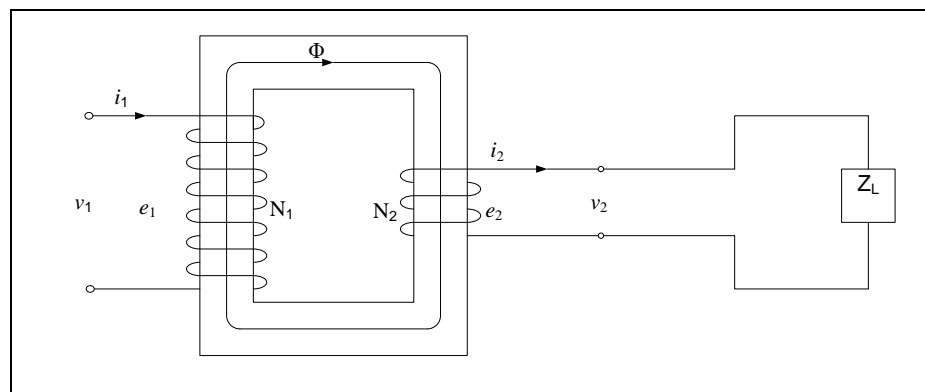
Transformer merupakan suatu mesin statik yang digunakan untuk menukarkan kuasa dari satu litar ke suatu litar yang lain tanpa menukar frekuensi bekalan. Ia boleh menaikkan atau menurunkan voltan bergantung kepada penurunan dan kenaikan di dalam arus. Transformer merupakan alat yang mudah, mempunyai dua atau lebih litar elektrik yang diganding oleh litar magnet. Apabila aruhan saling wujud di antara dua gegelung atau belitan, perubahan di dalam arus melalui satu belitan akan mengaruh voltan di dalam belitan yang lainnya. Setiap transformer mempunyai belitan masukan dan satu atau lebih belitan keluaran. Belitan masukan menerima tenaga elektrik daripada punca kuasa dan saling tenaga kepada belitan keluaran dengan syarat perubahan medan magnet. Tenaga ini muncul sebagai daya elektromotif melintasi belitan keluaran. Jika beban disambungkan kepada keluaran, tenaga akan dipindahkan kepada beban. Maka tenaga elektrik boleh dipindahkan daripada satu litar ke litar yang lain dengan tiada sambungan fizikal di antara dua litar. Transformer amat diperlukan di dalam pengagihan kuasa ac oleh kerana ia boleh menukar kuasa elektrik pada arus dan voltan yang disetujui kepada kuasa yang setara pada arus dan voltan yang lain. Apabila suatu transformer beroperasi, arus ac mengalir ke dalam belitan dan medan magnet ulang alik wujud di dalam teras besi. Oleh yang demikian kehilangan kuprum dan kehilangan besi akan terhasil yang mewakili kuasa aktif (watts) dan menyebabkan transformer menjadi panas. Menstabilkan medan magnet memerlukan kuasa reaktif (vars) yang ditarik daripada talian kuasa. Oleh yang demikian jumlah kuasa dihantar

ke belitan masukan adalah lebih besar daripada jumlah kuasa yang dihantar oleh belitan keluaran. Apabila voltan masukan meningkat menghampiri nilai terkadar, teras besi mula menepu dan arus pemagnetan (arus pengujaan) meningkat dengan cepat.

2.2 Transformer Ideal

Pertimbangkan transformer dengan dua belitan, belitan masukan dengan N_1 lilitan dan belitan keluaran dengan N_2 lilitan seperti yang ditunjukkan dalam rajah 1 dengan mempertimbangkan ciri-ciri berikut[5]:

1. Rintangan belitan diabaikan.
2. Semua fluk dikurung kepada dan memaut kedua-dua belah belitan iaitu tiada kebocoran fluk berlaku. Kehilangan teras diabaikan.
3. kebolehtelapan teras adalah infiniti ($\mu \rightarrow \infty$). Maka arus pengujaan diperlukan untuk menstabilkan fluk di dalam teras diabaikan dengan itu mmf bersih yang diperlukan untuk menstabilkan fluk di dalam teras adalah sifar.



Rajah 1: Transformer ideal

Apabila belitan masukan disambungkan kepada voltan berubah dengan masa v_1 , fluk Φ berubah dengan masa tertubuh di dalam teras. Voltan e_1 akan diaruh di dalam belitan dan akan sama dengan voltan jika rintangan belitan diabaikan:

$$v_1 = e_1 = N_1 \frac{d\Phi}{dt} \quad (2.1)$$

Fluk teras juga memaut belitan keluaran dan mengaruh voltan e_2 , yang mana sama dengan voltan terminal v_2 :

$$v_2 = e_2 = N_2 \frac{d\Phi}{dt} \quad (2.2)$$

Daripada persamaan (2.1) dan (2.2) di atas

$$\frac{v_1}{v_2} = \frac{N_1}{N_2} = a \quad (2.3)$$

Di mana

a ialah nisbah lilitan

N_1 ialah bilangan lilitan masukan

N_2 ialah bilangan lilitan keluaran

Persamaan (2.3) menunjukkan yang voltan di dalam belitan transformer ideal adalah berkadar langsung kepada lilitan belitan.

Jika suatu beban disambungkan kepada belitan keluaran, arus i_2 akan mengalir ke dalam belitan keluaran dan belitan keluaran akan menyediakan mmf $N_2 i_2$ di dalam teras. Ini akan menjadikan arus i_1 belitan masukan mengalir supaya mmf berlawanan $N_1 i_1$ boleh

melawan N_2i_2 . Sebaliknya N_2i_2 akan menyebabkan fluk teras berubah secara drastik dan keseimbangan di antara v_1 dan e_1 akan terganggu. Oleh kerana mmf bersih diperlukan untuk menstabilkan fluk di dalam teras ideal adalah sifar,

$$N_1i_1 - N_2i_2 = \text{mmf bersih} = 0 \quad (2.4)$$

$$N_1i_1 = N_2i_2 \quad (2.5)$$

$$\frac{i_1}{i_2} = \frac{N_2}{N_1} = \frac{1}{a} \quad (2.6)$$

Arus di dalam belitan adalah berkadar songsang dengan lilitan belitan. Jika arus berlebihan ditarik oleh beban, maka arus berlebihan juga akan mengalir daripada bekalan. Daripada persamaan (2.3) dan (2.6)

$$v_1i_1 = v_2i_2 \quad (2.7)$$

iaitu kuasa masukan seketika adalah sama dengan kuasa keluaran seketika. Dengan anggapan kehilangan kuasa diabaikan di dalam transformer ideal.

Jika bekalan voltan v_1 adalah sinus, maka persamaan (2.3), (2.6) dan (2.7) boleh ditulis dalam sebutan rms:

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{N_1}{N_2} = a \quad (2.8)$$

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{N_2}{N_1} = \frac{1}{a} \quad (2.9)$$

$$V_1I_1 = V_2I_2 \quad (2.10)$$

Pertimbangkan kes di mana voltan sinus dikenakan dan galangan keluaran Z_2 , seperti yang ditunjukkan dalam Rajah 2.7.

$$Z_2 = \frac{V_2}{I_2} \quad (2.11)$$

$$Z_1 = \frac{V_1}{I_1} = \frac{aV_2}{I_2/a} = a^2 \frac{V_2}{I_2} \quad (2.12)$$

$$= a^2 Z_2 = Z_1' \quad (2.13)$$

$$Z_1 = a^2 Z_2 = Z_1' \quad (2.14)$$

Di mana

V_1 ialah voltan masukan rms

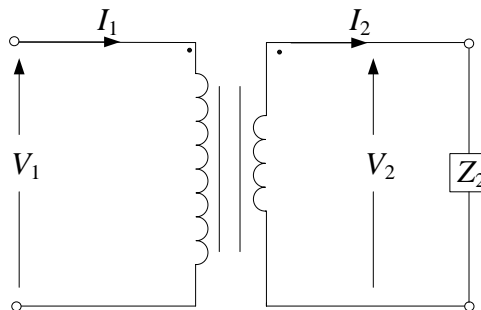
V_2 ialah voltan keluaran rms

I_1 ialah arus masukan rms

I_2 ialah arus keluaran rms

Z_1 ialah galangan masukan

Z_2 ialah galangan keluaran



Rajah 2: Litar menunjukkan pindahan galangan melalui transformer ideal

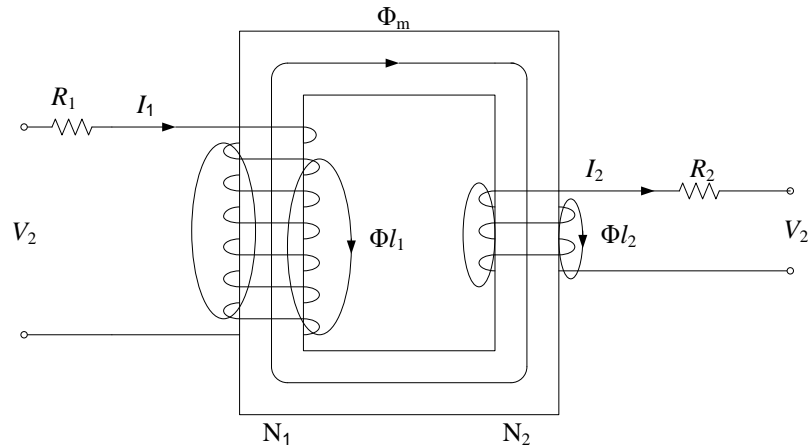
Galangan Z_2 disambungkan pada keluaran akan muncul sebagai galangan Z_2' jika dilihat daripada masukan. Galangan boleh juga dipindahkan daripada keluaran kepada masukan jika nilainya didarapkan dengan kuasa dua nisbah lilitan. Galangan daripada sebelah masukan boleh juga dipindahkan kepada sebelah keluaran.

$$Z_2' = \frac{1}{a^2} Z_2 \quad (2.15)$$

Secara praktikal, tidak semua transformer adalah ideal. Di dalam transformer praktikal belitan mempunyai kerintangan, tidak semua belitan menarik fluk yang sama, kebolehtelapan bahan teras adalah terhingga (finite) dan kehilangan teras berlaku apabila bahan teras merujuk kepada fluk berubah dengan masa. Secara praktikal belitan mempunyai kerintangan dan kerintangan ini ditunjukkan sebagai kuantiti pukal sesiri engan belitan. Apabila arus mengalir melalui belitan di dalam transformer, ia menghasilkan fluk paduan saling Φ_m membataskan pada dasarnya pada teras magnet. Bagaimanapun sejumlah kecil fluks yang dikenali dengan fluks bocor, Φ_l seperti Rajah 3 memaut hanya satu belitan dan tidak memaut belitan yang lain. Laluan kebocoran ialah utama di udara, maka fluks bocor berubah secara lurus dengan arus. Kesan fluks bocor boleh dijelaskan dengan kearuhan iaitu dipanggil kearuhan bocor.

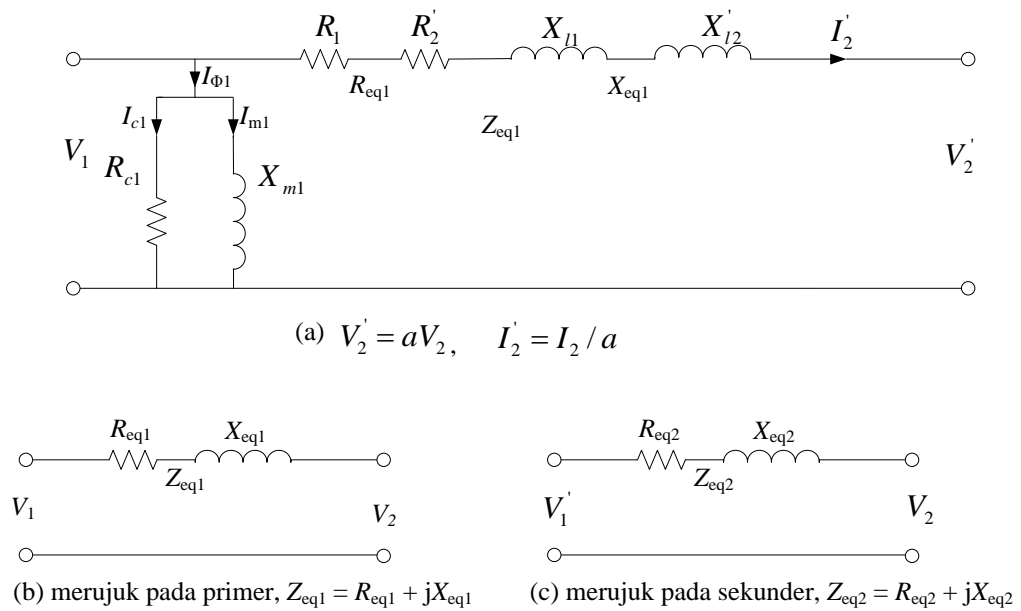
$$\text{kearuhan bocor belitan 1, } L_{l1} = \frac{N_1 \Phi_{l1}}{i_1} \quad (2.16)$$

$$\text{kearuhan bocor belitan 2, } L_{l2} = \frac{N_2 \Phi_{l2}}{i_2} \quad (2.17)$$



Rajah 3: Fluks bocor yang terhasil di dalam transformer

Penghampiran litar setara transformer boleh ditunjukkan seperti Rajah 4 di bawah.



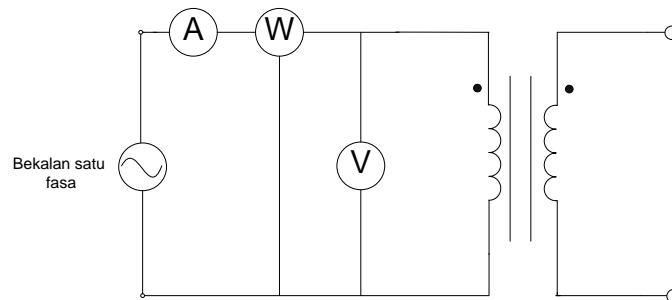
Rajah 4: Penghampiran litar setara transformer

2.3 Kadaran Transformer

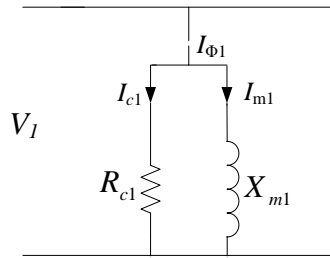
Kadaran kilovolt-ampere (kVA) dan kadaran voltan suatu transformer biasanya ditunjukkan pada plat nama. Kadaran voltan menentukan transformer itu mempunyai dua belitan. Satu belitan dikadar pada suatu nilai voltan tertentu, manakala satu belitan lainnya dikadar pada suatu nilai voltan. Voltan-voltan ini adalah berkadaran dengan bilangan lilitan masing-masing dan oleh itu nisbah voltan diwakili oleh nisbah lilitan. Sebagai contoh kadaran 10kVA bermaksud setiap belitan direkabentuk untuk 10kVA.

2.3.1 Ujian Litar Buka

Ujian ini dilakukan untuk mendapatkan kehilangan teras pada transformer. Dengan mengenakan voltan kepada salah satu sebelah voltan tinggi atau sebelah voltan rendah. Gambarajah pendawaian ditunjukkan di dalam rajah 5 dan litar setara adalah seperti Rajah 6. Arus masukan ialah arus pengujaan dan kehilangan diukur dengan wattmeter pada dasarnya ialah kehilangan teras.



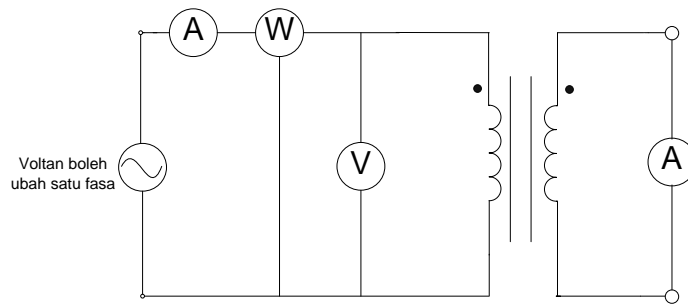
Rajah 5: Gambarajah pendawaian untuk ujian litar buka



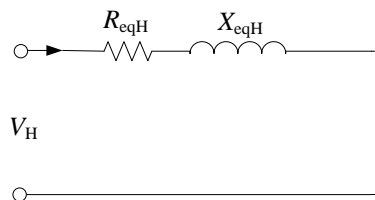
Rajah 6: Litar setara ujian litar buka

2.3.2 Ujian Litar Pintas

Ujian ini dilakukan dengan menyambungkan satu belitan dan mengenakan arus terkadar kepada belitan yang lain seperti yang ditunjukkan dalam Rajah 7 dan litar setara di dalam Rajah 8. Bacaan wattmeter adalah merujuk kepada kehilangan kuprum, I^2R di dalam transformer.



Rajah 7: Gambarajah pendawaian untuk ujian Litar pintas



Rajah 8: Litar setara di bawah keadaan litar pintas

2.4 Kecekapan transformer

Semua peralatan elektrik dikehendaki beroperasi pada kecekapan yang tinggi. Mujurlah kehilangan di dalam transformer adalah kecil kerana transformer adalah sebuah mesin statik berbanding mesin berputar iaitu terdapat kehilangan putaran seperti kehilangan geseran dan angin. Sebuah transformer yang baik rekabentuknya, kecekapan boleh mencapai 99%. Kecekapan, η diperolehi seperti berikut:

$$\eta = \frac{\text{kuasa keluaran } (P_{out})}{\text{kuasa masukan } (P_{in})} \quad (2.28)$$

$$= \frac{P_{out}}{P_{out} + \text{kehilangan}} \quad (2.29)$$

Kehilangan di dalam transformer adalah kehilangan teras (P_c) dan kehilangan kuprum (P_{cu}). Maka

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{out} + P_c + P_{cu}} \quad (2.30)$$

Kehilangan kuprum boleh ditentukan jika arus belitan dan kerintangannya diketahui.

$$P_{cu} = I_1^2 R_1 + I_2^2 R_2 \quad (2.31)$$

Di mana

R1 ialah rintangan masukan

R2 ialah rintangan keluaran

Kehilangan teras bergantung kepada ketumpatan fluk puncak di dalam teras yang mana lilitan bergantung pada voltan yang dikenakan kepada transformer. Oleh kerana transformer disambungkan kepada voltan malar, kehilangan teras juga malar dan boleh diperolehi daripada ujian tak-berbeban. Kuasa keluaran transformer, P_{out} ialah

$$P_{out} = V_2 I_2 \cos \theta_2 \quad (2.32)$$

Di mana

V_2 = Voltan keluaran

I_2 = Arus keluaran

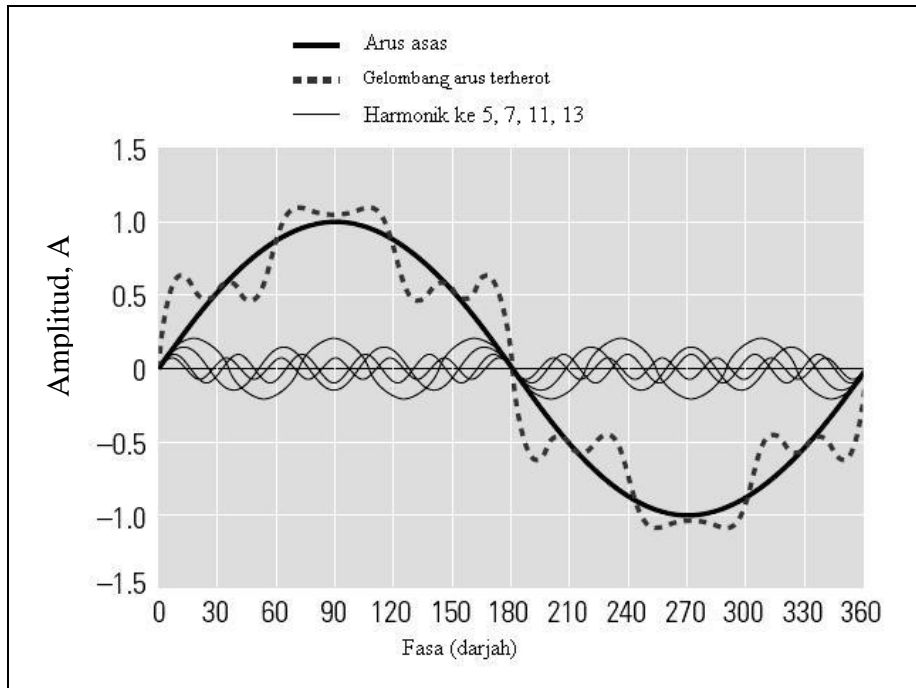
$\cos \theta_2$ = Faktor kuasa keluaran

Maka kecekapan transformer, η ialah:

$$\eta = \frac{V_2 I_2 \cos \theta_2}{V_2 I_2 \cos \theta_2 + P_c + I_2^2 R_{eq2}} \quad (2.33)$$

2.5 Harmonik Sistem Kuasa

Harmonik adalah suatu bentuk gelombang berkala yang boleh diwakili oleh gelombang sinus yang mempunyai frekuensi yang berganda daripada frekuensi asas. Rajah 11 menunjukkan gelombang arus asasi, gelombang arus terherot dan gelombang arus harmonik (5, 7, 11, 13).



Rajah 9: Gambarajah gelombang terherot

Secara umumnya bentuk gelombang sinus yang mengulang dengan frekuensi sudut, ω_0 boleh dinyatakan sebagai:

$$\begin{aligned}
 f(t) &= a_0 + a_1 \cos \omega_0 t + a_2 \cos \omega_0 t + \dots \\
 &\quad + b_1 \cos \omega_0 t + b_2 \cos \omega_0 t \dots \\
 &= a_0 + a_n \cos(n\omega_0 t) + b_n \cos(n\omega_0 t)
 \end{aligned} \tag{2.34}$$

Di mana

$$a_0 = \frac{1}{T} \int_0^T f(t) dt \tag{2.35}$$

$$a_n = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \cos n\omega_0 t dt \tag{2.36}$$

$$b_n = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \sin n\omega_0 t dt \tag{2.37}$$

2.5.1 Jumlah Herotan Harmonik(THD)

Jumlah herotan harmonik digunakan untuk mengukur tahap kualiti kuasa. THD ditakrifkan sebagai nisbah punca min kuasa dua kandungan harmonik kepada punca min kuasa dua nilai kuantiti asasi[3]. Biasanya THD dinyatakan di dalam peratus. Suatu sistem kuasa itu dikatakan berkualiti jika peratus jumlah herotan harmonik arus (THDi) adalah kurang dan sama dengan 20% dan jumlah herotan harmonik voltan (THDv) adalah kurang dan sama dengan 5%. Jumlah herotan harmonik voltan (THDv) boleh dikira dengan menggunakan persamaan (2.38) manakala jumlah herotan harmonik arus (THDi) boleh dikira dengan menggunakan persamaan (2.39).

$$THD_v = \frac{\sqrt{V_3^2 + V_5^2 + V_{71}^2 + \dots + V_n^2}}{V_1} \quad (2.38)$$

$$THD_i = \frac{\sqrt{I_3^2 + I_5^2 + I_{71}^2 + \dots + I_n^2}}{I_1} \quad (2.39)$$

$$\%THDi = \frac{\sum I_h}{I_1} \times 100\% \quad (2.40)$$

Di mana

V_1 ialah voltan rms asas

I_1 ialah arus rms asas

2.6 Kuasa dan Faktor kuasa

Kuasa purata ditunjukkan seperti di dalam persamaan (2.41) di bawah.

$$P = \frac{1}{T} \int_0^{T_1} p(t) dt = \frac{1}{T} \int_0^{T_1} v(t) i(t) dt \quad (2.41)$$

Di mana voltan, v dan arus, i seketika ialah:

$$v = \sqrt{2}V \sin \omega t \quad (2.42)$$

$$i = \sqrt{2}I \sin(\omega t - \theta) \quad (2.43)$$

Gantikan persamaan.(2.42) dan persamaan (2.43) ke dalam persamaan (2.41), maka

$$\begin{aligned} P &= \frac{1}{T_1} \int_0^{T_1} \sqrt{2}V \sin \omega t \cdot \sqrt{2}I \sin(\omega t - \theta) dt \\ &= VI \cos \theta \end{aligned} \quad (2.44)$$

Kuasa ketara, S adalah hasil darab voltan rms V dan arus rms I :

$$S = VI \quad (2.45)$$

Kuasa reaktif, Q ditakrifkan sebagai:

$$Q = VI \sin \theta \quad (2.46)$$

Faktor kuasa ialah nisbah kuasa aktif iaitu kuasa yang digunakan untuk melakukan kerja kepada kuasa yang dibekalkan oleh utiliti (kuasa ketara)[6], i.e

$$PF = \frac{P}{S} \quad (2.47)$$

Dalam erti kata yang lain, nisbah faktor kuasa menyukat peratusan bekalan kuasa untuk kegunaan.

Faktor kuasa berubah daripada sifar kepada satu (uniti). Beban dengan faktor kuasa 0.9 mengekor, menunjukkan beban boleh menggunakan 90 peratus kuasa ketara yang dibekali (Voltampere) dan menukarkannya untuk melakukan kerja yang berguna (watt). Sebutan mengekor menunjukkan bahawa arus asasi mengekor dibelakang voltan arus sebanyak 25.84° .

Di dalam kes sinus (voltan dan arus), hanya satu sudut fasa dia antara voltan dan arus. Oleh kerana hanya frekuensi asasi yang wujud, faktor kuasa (PF) boleh dikira sebagai kosinus sudut fasa dan selalunya dirujuk sebagai faktor kuasa anjakan (DPF).

$$PF = DPF = \frac{P}{S} = \cos \theta \quad (2.48)$$

Di dalam kes voltan atau arus yang tidak sinus, faktor kuasa tidak boleh ditakrifkan sebagai kosinus sudut fasa seperti persamaan tersebut. Faktor kuasa mengambil kira semua kuasa aktif, termasuk kedua-dua frekuensi asasi dan frekuensi harmonik dikenali sebagai faktor kuasa sebenar.

Faktor kuasa sebenar ialah nisbah jumlah kuasa aktif pada semua frekuensi kepada kuasa ketara yang dibekali oleh pembekal.

2.7 Kehilangan Pada Transformer

Kehilangan transformer terdiri daripada kehilangan kehilangan teras, P_C dan juga kehilangan beban, P_{LL} [4].

$$P_T = P_C + P_{LL} \quad (2.49)$$

Kehilangan teras adalah berkaitan dengan pengujaan teras. Arus harmonik mengalir melalui galangan bocor transformer dan galangan sistem akan mengherotkan voltan keluaran

transformer. Kenaikan suhu teras tidak menjadi faktor mengehad di dalam penentuan arus terizin beban tak linear. Kehilangan tanpa beban ialah:

$$P_{LL} = I^2 R + P_{EC} + P_{SL} \quad (2.50)$$

$I^2 R$ merujuk kepada kehilangan ohm pada belitan transformer, P_{EC} ialah kehilangan arus pular dan P_{SL} ialah kehilangan sesat. Jika arus rms beban meningkat merujuk kepada komponen arus harmonik, kehilangan ohm juga turut meningkat.

Kehilangan keseluruhan boleh diperolehi daripada ujian galangan. Kehilangan beban boleh diperolehi daripada penolakan kehilangan ohm daripada kehilangan keseluruhan.

Dengan mempunyai kehilangan arus pular terkadar, kehilangan arus pular merujuk kepada sebarang arus beban tak sinus boleh dikira seperti berikut:

$$P_{EC} = P_{EC-R} \sum_{h=1}^h [I_h / I_R]^2 h^2 \quad (2.51)$$

P_{EC-R} ialah kehilangan arus pular belitan di bawah keadaan terkadar (watts), I_h ialah magnitud arus harmonik ke- h di dalam Ampere, I_R = Arus beban rms bentuk sinus dan frekuensi terkadar di dalam Ampere dan h ialah tertib harmonik.

Kehilangan sesat yang lain atau kehilangan arus pular keseluruhan tambah dengan kehilangan sesat yang lain boleh ditentukan untuk sebarang beban tak sinus diberi menggunakan prosedur yang sama. Mengikut piawai UL1561 dan UL1562 yang diberikan oleh UL laboratory, pemalar K ditakrifkan seperti berikut:

$$Faktor K = \sum_{h=1}^{\infty} [I_h / I_R]^2 h^2 \quad (2.52)$$

Faktor-K menunjukkan pengaruh amplitud dan frekuensi daripada arus harmonik dia atas kenaikan kehilangan arus pusar di dalam transformer di bawah beban tak linear. Di dalam piawai IEEE C57.110, kehilangan harmonik (F_{HL}) ditakrifkan seperti berikut:

$$F_{HL} = \frac{P_{EC}}{P_{EC-R}} = \frac{\sum_{h=1}^{h=h \max} I_h^2 h^2}{\sum_{h=1}^{h=h \max} I_h^2} \quad (2.53)$$

Jika pengangka dan penyebut di dalam persamaan (2.55) dibahagi dengan arus rms terkadar, nilai arus adalah di dalam p.u (perunit). Faktor-K boleh dikira seperti persamaan (2.55).

$$\text{Faktor-K} = \left[\sum_{h=1}^{\infty} I_h^2 (pu) \right] \cdot F_{HL} \quad (2.54)$$

$$= \sum_{h=1}^{\infty} I_h^2 (pu) h^2 \quad (2.55)$$

Di mana I_h ialah arus harmonik ke-h dan h ialah bilangan tertib harmonik.

2.8 Nyahkadaran Transformer

Transformer piawai biasanya direkabentuk untuk beroperasi pada frekuensi kegunaan dan pada arus beban bentuk sinus. Membekali transformer dengan beban bentuk tak sinus menyebabkan kehilangan yang tinggi, menyebabkan pemanasan lebih dan mengurangkan jangka hayat transformer. Oleh sebab itu adalah perlu untuk mengurangkan kuasa maksimum transformer. Amalan ini dinamakan nyahkadaran atau mengambil kira rekabentuk transformer untuk mengurangkan kehilangan-kehilangan ini.

Nyahkadaran transformer boleh dilakukan dengan menggunakan dua kaedah. Pertama ialah dengan menggunakan kaedah ataupun piawai ANSI/IEEE C57.110-1986 yang dikenali dengan 'Faktor-K' dan kedua adalah dengan menggunakan piawai BS 7821 Part 4 yang digunakan di Eropah.

2.8.1 Menggunakan Piawai ANSI/IEEE C57.110-1986

Oleh kerana keputusan ujikaji yang terhad, anggapan-anggapan tertentu yang dibuat adalah abadi. Anggapan ini [1] boleh diubah berdasarkan panduan daripada pengeluar untuk transformer-transformer tertentu.

- i) Semua kehilangan sesat dianggap menjadi kehilangan arus pusar belitan.
- ii) Kehilangan I_2R tertabur secara seragam di dalam setiap belitan.
- iii) Pembahagian kehilangan arus pusar di antara belitan di anggap seperti berikut:
 - a) 60% di dalam belitan dalam dan 40% di dalam belitan luar untuk semua transformer yang mempunyai arus terkadar 1000A dan ke bawah.
 - b) 70% di dalam belitan dalam dan 30% di dalam belitan luar untuk tranformer yang mempunyai arus terkadar melebihi 1000A. Ketumpatan maksimum kehilangan arus pusar ialah 400% daripada ketumpatan purata kehilangan arus pusar.

Kehilangan transformer terdiri daripada kehilangan tanpa beban (kehilangan teras) dan juga kehilangan I^2R .

$$P_T = P_C + P_{LL} \quad (2.56)$$

Kehilangan teras adalah berkaitan dengan pengujaan teras. Arus harmonik mengalir melalui galangan bocor transformer dan galangan sistem akan mengherotkan voltan keluaran transformer.. Kehilangan tanpa beban ialah:

$$P_{LL} = I^2 R + P_{EC} + P_{SL} \quad (2.57)$$

Dengan anggapan semua kehilangan sesat dianggap menjadi kehilangan arus pusar belitan. Maka

$$P_{EC-R} = P_{LL} - K \left[(I_{1-R})^2 R_1 + (I_{2-R})^2 R_2 \right] \text{ watts} \quad (2.58)$$

di mana,

$K = 1$ untuk transformer satu fasa

$= 1.5$ untuk transformer tiga fasa

P_{EC-R} = kehilangan arus pusar belitan di bawah keadaan terkadar (watts)

I_{1-R} = arus terkadar rms pada voltan tinggi di dalam Ampere (A).

I_{2-R} = arus terkadar pada voltan rendah di dalam Ampere (A).

R_1 = rintangan dc yang diukur di antara 2 terminal voltan tinggi (Ω)

R_2 = rintangan dc yang diukur di antara 2 terminal voltan rendah (Ω)

Kehilangan arus pusar belitan voltan rendah boleh dikira daripada nilai P_{EC-R} yang ditentukan daripada persamaan (2.58) sama ada $0.6P_{EC-R}$ watts atau $0.7P_{EC-R}$ watts, bergantung pada arus terkadar transformer. Kehilangan arus pusar belitan voltan rendah di dalam perunit adalah sama ada:

$$P_{EC-R}(\text{pu}) = \frac{0.6P_{EC-R} \text{ watts}}{K(I_{2-R})^2 R_2 \text{ watts}} \text{ pu} \quad (2.59)$$

atau

$$P_{EC-R}(\text{pu}) = \frac{0.7P_{EC-R} \text{ watts}}{K(I_{2-R})^2 R_2 \text{ watts}} \text{ pu} \quad (2.60)$$

Arus beban tak lurus maksimum yang dibenarkan (I_{\max}) di dalam p.u ialah arus yang mana pada ketumpatan kehilangan maksimum adalah sama dengan ketumpatan kehilangan yang direka untuk keadaan terkadar. Ia boleh dikira seperti berikut:

$$I_{\max}(pu) = \left[\frac{P_{LL-R}(pu)}{1 + \left[\left(\frac{\sum_{h=1}^{h=h} f_h^2 h^2}{\sum_{h=1}^{h=h} f_h^2} \right) P_{EC-R}(pu) \right]} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2.61)$$

Kehilangan I^2R pada beban terkadar ialah 1 pu dan ia dianggap yang semua kehilangan sesat adalah sama dengan kehilangan arus pusar di dalam belitan. Maka persamaan (2.61) boleh diringkaskan seperti berikut:

$$I_{\max}(pu) = \left[\frac{1 + P_{EC-R}(pu)}{1 + [(k/I)P_{EC-R}(pu)]} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2.62)$$

2.8.2 Menggunakan Piawai BS 7821 Part 4

Piawai ini digunakan untuk menganggarkan berapa peratus transformer piawai yang perlu dinyahkadar supaya kehilangan keseluruhan transformer yang disebabkan beban harmonik tidak melebihi kehilangan yang ditetapkan untuk beban lurus.

Pengiraan yang disyorkan piawai ini [7] menitikberatkan komponen kehilangan tambahan yang disebabkan kehadiran harmonik, spektrum harmonik yang wujud dan mengira kehilangan tambahan.

K faktor ditentukan dengan menggunakan rumus berikut:

$$K = \left[1 + \frac{e+1}{e} \left(\frac{I_1}{I} \right)^2 \sum_{h=2}^{h_{\max}} \left(h^q \left(\frac{I_h}{I_1} \right)^2 \right) \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2.63)$$