

**PENGUKURAN, ANALISIS HARMONIK
DAN PEMBETULAN FAKTOR KUASA**

Oleh

Chew Hon Wah

**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

Sejak kebelakangan ini, kajian harmonik dalam sistem kuasa menjadi semakin penting. Ini kerana penggunaan peralatan yang menghasilkan arus harmonik semakin meluas. Beban yang menghasilkan harmonik biasanya terdiri daripada peralatan yang mengandungi komponen-komponen elektronik kuasa, dan peralatan arka elektrik. Harmonik yang dihasilkan akan menjejaskan kualiti kuasa dan juga membawa pelbagai implikasi kepada kestabilan sistem kuasa. Dalam projek ini, kajian terhadap harmonik dijalankan di Bengkel Kimpalan, Pusat Pengajian Kejuruteraan Mekanik, Universiti Sains Malaysia. Dalam Bengkel tersebut, terdapat beban kimpalan elektrik yang merupakan sumber harmonik utama. Jadi, kajian dijalankan untuk meningkatkan kualiti kuasa disamping memastikan kestabilan sistem kuasa di loji tersebut. Kaedahnya termasuklah pengukuran harmonik di lokasi kajian, analisis harmonik dan merekabentuk penuras untuk mengurangkan herotan harmonik. Penuras yang dicadangkan bukan sahaja untuk mengurangkan herotan harmonik tetapi ia juga dapat meningkatkan faktor kuasa sistem. Dalam laporan ini, teori-teori tentang harmonik dan faktor kuasa telah dibincangkan dan teknik analitikal untuk memperbaiki faktor kuasa dan mengurangkan herotan harmonik dipersembahkan. Setelah penuras harmonik yang dicadangkan dipasang pada sistem kuasa Bengkel Kimpalan, dijangka herotan harmonik seluruh (*THD_i*) maksimum akan dikurangkan dari 19.38% ke 12.41%, manakala purata faktor kuasa anjakan akan mencapai 0.90. Teknik yang digunakan dalam projek ini boleh dijadikan rujukan untuk meningkatkan kualiti kuasa pada sistem-sistem kuasa lain yang seiras.

ABSTRACT

Recently, harmonic study in power system received added significance. This is because devices which generate harmonics current are increasing in power system. Harmonics sources are such as power electronic devices and electric arcing devices. The harmonics generated will affect power quality and power system stability. In this project, study of harmonics were carried out at Welding Workshop in School of Mechanical Engineering, University Science Malaysia. There are electric arc welding machines which are the main harmonic sources in the studied location. This study was carried out to improve the power quality of power system and ensure the stability of the system in the plant. The study include harmonic field measurement, harmonic analysis, and filter design work to reduce harmonic distortion. The filter designed is not only used to reduce harmonics current, but also used to improve power factor of the system. In this report, theories of harmonics and power factor was discussed and analytical technique used to correct power factor was presented. It is expected that the improvement of harmonic distortion after installation of proposed filter is from 19.38% to 12.41%, whereas the displacement power factor will achieve 0.90. The technique used in this project can be a reference for improving power quality in other similar plant.

PENGHARGAAN

Saya telah menyiapkan projek tahun akhir ini dengan setinggi-tinggi kesyukuran. Sepanjang pelaksanaan perojek ini, saya telah menerima pelbagai jenis bantuan dari pelbagai pihak. Di sini, saya ingin mengambil kesempatan untuk merakamkan setinggi-tinggi penghargaan kepada pihak-pihak tertentu yang pernah menghulurkan bantuan kepada saya.

Pertama sekali, saya ingin mengucapkan jutaan terima kasih kepada ibu-bapa dan keluarga saya. Mereka sering memberikan sokongan dan dorongan kepada saya dan banyak memotivasi saya sepanjang pembelajaran saya di Universiti Sains Malaysia.

Di samping itu, penghargaan saya juga kepada Professor Madya Dr. Che Mat Hadzer yang merupakan penyelia saya yang dihormati. Beliau telah memberi bantuan, idea serta nasihat yang membina kepada saya semasa saya menghadapi masalah.

Penghargaan yang ikhlas juga diberi kepada saudari Khor Lay Hoong yang memberi bantuan kepada saya sepanjang pelaksanaan projek ini. Sokongan dan dorongan yang diberikan menyakinkan saya untuk meneruskan projek ini sehingga dapat menyiapkan projek ini dengan berjaya.

Akhir sekali, sekalung terima kasih diucapkan kepada staff akademik dan bukan akademik Pusat Pengajian Elektrik & Elektronik, Universiti Sains Malaysia, yang telah banyak memberikan bantuan teknikal dan tunjuk ajar dalam menyempurnakan kajian ini. Terima kasih juga diucapkan kepada staff Jabatan Pembangunan, Kampus Kejuruteraan, Universiti Sains Malaysia yang memberi bantuan dan maklumat-maklumat yang berkaitan dengan kajian ini kepada saya.

SENARAI KANDUNGAN

	Muka Surat
ABSTRAK	ii
PENGHARGAAN	iv
JADUAL ISI KANDUNGAN	v
SENARAI GAMBARAJAH	vii
SENARAI JADUAL	ix
BAB 1 PENGENALAN	1
1.1 Skop dan Tujuan Kajian	1
1.2 Latar Belakang Harmonik Sistem Kuasa	2
1.3 Kajian Pembetulan Faktor Kuasa	3
1.4 Penuras Harmonik	4
1.5 Panduan Laporan	5
BAB 2 KAJIAN ILMIAH	7
2.1 Harmonik Sistem Kuasa.....	7
2.1.1 Pengenalan.....	7
2.1.2 Perwakilan Harmonik Secara Siri Fourier.....	8
2.1.3 Jenis Sumber Harmonik.....	10
2.1.4 Herotan Harmonik.....	12
2.2 Hubungan Harmonik dengan Faktor Kuasa.....	14
2.3 Salunan (<i>Resonance</i>).....	16
2.3.1 Pengenalan.....	16
2.3.2 Salunan Siri (<i>Series Resonance</i>).....	17
2.3.3 Salunan Selari (<i>Parallel Resonance</i>).....	18
BAB 3 PENGUKURAN HARMONIK	20
3.1 Pengenalan.....	20
3.2 Sistem Kuasa di Lokasi Kajian.....	21
3.3 Sumber Harmonik.....	23
3.3.1 Mesin Kimpalan <i>Manual Arc</i>	24
3.3.2 Mesin Kimpalan <i>MIG</i>	25

3.4	Pengukuran Harmonik Semasa Bebanan Puncak.....	27
3.4.1	Arus Harmonik.....	27
3.4.2	Voltan Harmonik.....	28
3.4.3	Kuasa dan Faktor Kuasa.....	31
BAB 4	ANALISIS HARMONIK	33
4.1	Herotan Harmonik.....	33
4.1.1	Herotan Semasa Permintaan Maksimum.....	33
4.1.2	Herotan Semasa <i>THD_i</i> Maksimum.....	36
4.1.3	Herotan Sepanjang Bebanan Puncak.....	38
4.2	Salunan Sistem.....	42
BAB 5	PEMBETULAN FAKTOR KUASA	48
5.1	Pengenalan.....	48
5.2	Pembetulan Faktor Kuasa.....	50
BAB 6	KAWALAN HARMONIK	57
6.1	Pengenalan.....	57
6.2	Rekabentuk Penuras Harmonik.....	60
6.3	Ciri Galangan Penuras.....	62
6.4	Aliran Arus Harmonik.....	64
6.5	Kadaran Penuras.....	67
BAB 7	KESIMPULAN	69
	RUJUKAN	71
	LAMPIRAN A: Diagram Garis Tunggal GF/KIM	
	LAMPIRAN B: Gambar-gambar Semasa Pengukuran di Bengkel Kimpalan	
	LAMPIRAN C: Data Pengukuran Harmonik Arus	
	LAMPIRAN D: Jadual Aliran Arus Harmonik	

SENARAI GAMBARAJAH

Rajah 2.1	Contoh gelombang asasi dan gelombang harmoniknya.....	7
Rajah 2.2	(a). Gelombang terherot; (b). Komponen yang membentuk gelombang terherot itu.....	9
Rajah 2.3	Arus $I(t)$ yang mengalir pada beban bukan lurus.....	10
Rajah 2.4	Spektrum harmonik bagi jenis sumber harmonik yang berlainan.....	11
Rajah 2.5	Faktor kuasa rendah disebabkan oleh DPF dan herotan harmonik.....	15
Rajah 2.6	Litar RLC sesiri.....	17
Rajah 2.7	Ciri galangan salunan siri pada litar RLC	18
Rajah 2.8	Litar RLC selari.....	18
Rajah 2.9	Ciri galangan salunan selari pada litar RLC	19
Rajah 3.1	<i>Fluke 43B Power Quality Analyzer</i>	20
Rajah 3.2	Bengkel Kimpalan di PPKM.....	21
Rajah 3.3	Diagram garis tunggal yang dipermudahkan bagi sistem kuasa bengkel kimpalan.....	22
Rajah 3.4	Spektrum harmonik bagi mesin kimpalan <i>Manual Arc</i>	24
Rajah 3.5	Bentuk gelombang arus terherot bagi mesin kimpalan <i>Manual Arc</i>	25
Rajah 3.6	Spektrum harmonik bagi mesin kimpalan <i>MIG</i>	25
Rajah 3.7	Bentuk gelombang arus terherot bagi mesin kimpalan <i>MIG</i>	26
Rajah 3.8	Bacaan-bacaan arus harmonik semasa bebanan puncak.....	27
Rajah 3.9	Nilai voltan dan $\%THD_v$ dalam tempoh 45 minit semasa bebanan puncak.....	29
Rajah 3.10	Skrin <i>Fluke 43B</i> setelah voltan rms dan $\%THD_v$ direkod.....	29
Rajah 3.11	Graf voltan dan $\%THD_v$ melawan masa.....	30
Rajah 3.12	Nilai kuasa aktif dan DPF dalam tempoh 60 minit semasa bebanan puncak.....	31
Rajah 3.13	Skrin <i>Fluke 43B</i> setelah kuasa aktif dan DPF direkod.....	32
Rajah 3.14	Graf kuasa aktif dan DPF melawan masa.....	32
Rajah 4.1	Spektrum harmonik arus semasa permintaan maksimum.....	34
Rajah 4.2	Bentuk gelombang arus semasa permintaan maksimum.....	35
Rajah 4.3	Spektrum harmonik arus semasa herotan maksimum.....	37
Rajah 4.4	Bentuk gelombang arus semasa herotan maksimum.....	37

Rajah 4.5	Peratusan <i>THD</i> sepanjang bebanan puncak.....	38
Rajah 4.6	Arus rms sistem sepanjang bebanan puncak.....	38
Rajah 4.7	Harmonik asasi sepanjang bebanan puncak.....	39
Rajah 4.8	Harmonik kedua sepanjang bebanan puncak.....	39
Rajah 4.9	Harmonik ketiga sepanjang bebanan puncak.....	40
Rajah 4.10	Harmonik kelima sepanjang bebanan puncak.....	40
Rajah 4.11	Harmonik ketujuh sepanjang bebanan puncak.....	41
Rajah 4.12	Konfigurasi transformer dan kapasitor pembetulan faktor kuasa.....	44
Rajah 4.13	Litar setara salunan antara bank kapasitor dengan transformer.....	44
Rajah 4.14	Salunan berlaku antara bank kapasitor dengan transformer.....	45
Rajah 5.1	Gambarajah pemfasa kuasa elektrik.....	49
Rajah 5.2	Sambungan bank kapasitor secara delta dan wye.....	49
Rajah 5.3	Taburan serakan kuasa ketara sepanjang bebanan puncak.....	50
Rajah 5.4	Taburan serakan <i>DPF</i> sepanjang bebanan puncak.....	51
Rajah 5.5	Graf faktor kuasa anjakan melawan kuasa ketara di bengkel kimpalan.....	52
Rajah 5.6	Lokasi pemasangan kapasitor yang dicadangkan.....	52
Rajah 5.7	Litar salunan selari baru apabila kapasitor dicadangkan dipasang.....	54
Rajah 5.8	Bank kapasitor yang sedia ada dan yang dicadangkan dalam sistem kuasa PPKM.....	54
Rajah 5.9	Salunan selari antara dua bank kapasitor dengan transformer.....	55
Rajah 5.10	Penambahan reaktor untuk mengelakkan salunan selari berlaku pada tertib harmonik <i>ke-h</i>	56
Rajah 6.1	Penuras pasif yang biasa digunakan, plot R-X dan Z- ω	57
Rajah 6.2	Carta aliran prosedur merekabentuk penuras harmonik.....	59
Rajah 6.3	Litar penuras harmonik yang dicadangkan.....	61
Rajah 6.4	Ciri galangan bagi penuras harmonik dicadangkan.....	63
Rajah 6.5	Litar setara selepas penuras harmonik dipasang.....	64
Rajah 6.6	Pengiraan aliran arus harmonik dalam <i>Microsoft Excel</i>	66
Rajah 6.7	Spektrum harmonik sebelum dan selepas penuras dipasang.....	66

SENARAI JADUAL

Jadual 2.1	IEEE 519 Had Herotan Voltan.....	13
Jadual 2.2	IEEE 519 Had Herotan Arus.....	13
Jadual 3.1	Harmonik bagi mesin kimpalan <i>Manual Arc</i>	24
Jadual 3.2	Harmonik bagi mesin kimpalan <i>MIG</i>	26
Jadual 3.3	Nilai voltan rms dan $\%THD_v$ semasa bebanan puncak.....	28
Jadual 3.4	Nilai kuasa aktif dan <i>DPF</i> semasa bebanan puncak.....	31
Jadual 4.1	Harmonik arus semasa permintaan maksimum.....	34
Jadual 4.2	Harmonik arus semasa herotan maksimum.....	36
Jadual 4.3	Arus harmonik maksimum sepanjang bebanan puncak.....	42
Jadual 4.4	Spesifikasi transformer.....	43
Jadual 5.1	Nilai-nilai purata kuasa yang diukur di bengkel kimpalan semasa bebanan puncak.....	51
Jadual 6.1	Arus harmonik dominan semasa herotan maksimum.....	60
Jadual 6.2	Arus harmonik purata sepanjang bebanan puncak.....	60
Jadual 6.3	Kadaran bagi penuras harmonik yang dicadangkan.....	62
Jadual 6.4	Kadaran pembetulan faktor kuasa penuras.....	68

BAB 1

PENGENALAN

1.1 Skop dan Tujuan Kajian

Dalam projek ini, sistem kuasa pada satu loji yang mengandungi beban bukan lurus dipilih untuk menjalankan kajian pengukuran harmonik, analisis harmonik dan pembetulan faktor kuasa. Loji yang dipilih ialah Bengkel Kimpalan yang terletak di Pusat Pengajian Kejuruteraan Mekanik, Kampus Kejuruteraan Universiti Sains Malaysia. Skop kajian projek ini dijelaskan dengan lebih terperinci di bawah.

Skop kajian termasuklah:

- i. Pengukuran harmonik di bengkel kimpalan – Data yang diukur dan direkodkan adalah seperti harmonik arus sepanjang tempoh bebanan puncak, perubahan faktor kuasa anjakan (DPF), permintaan kuasa dalam tempoh bebanan puncak, herotan harmonik seluruh voltan (THD_V), dan herotan harmonik seluruh arus (THD_I).
- ii. Analisis harmonik – Setelah semua data yang berkenaan diambil dan direkodkan, beberapa analisis perlu dijalankan. Analisis harmonik termasuklah menentukan tahap herotan pada kualiti kuasa, dan mengenalpasti beban-beban yang menyumbang harmonik tersebut. Selain itu, kesan harmonik yang dihasilkan di loji terhadap sistem kuasa perlu dikaji.
- iii. Rekabentuk penuras – Satu penuras direka supaya dapat meningkatkan faktor kuasa dan menuras harmonik arus dominan yang tertentu. Dengan menapis harmonik dominan, herotan harmonik pada sistem kuasa dapat dikurangkan. Kejadian frekuensi salunan (*resonance frequency*) pada penuras akan dikaji semasa mereka penuras tersebut.

Tujuan projek ini dijalankan adalah seperti berikut:

- i. Mengkaji ciri-ciri harmonik yang dihasilkan oleh beban-beban arka kimpalan pada sistem kuasa dan pembetulan faktor kuasa pada sistem kuasa.
- ii. Melakukan pengukuran medan (*field measurement*) secara parktik di loji yang terpilih untuk kajiaan ini dijalankan.
- iii. Menganalisis kesan arus harmonik pada sistem kuasa terhadap salunan sistem (*system resonance*) dan menentukan tahap herotan harmonik di bengkel kimpalan.
- iv. Mereka satu penuras yang sesuai dengan menggunakan teknik beranalisis untuk meningkatkan kualiti kuasa di loji kajian itu.
- v. Mempersembahkan teknik beranalisis dalam peningkatan kualiti kuasa di loji yang mempunyai beban arka supaya teknik itu boleh menjadi rujukan kepada loji kilang lain yang seiras.

1.2 Latar Belakang Harmonik Sistem Kuasa

Harmonik telah lama wujud pada sistem kuasa elektrik. Isu ini semakin diberi perhatian sejak kebelakangan ini. Terdapat dua sebab yang utama isu ini diberi perhatian berat: peningkatan penggunaan bank kapasitor untuk meningkatkan faktor kuasa oleh pembekal elektrik, dan aplikasi penukar (*converter*) elektronik kuasa semakin meluas di industri untuk mencapai kebolehharapan dan kecekapan yang lebih tinggi.

Pembekal elektrik biasanya mengharapkan faktor kuasa yang tinggi supaya kadaran peralatan (*equipment ratings*), kehilangan kuasa talian dan kejatuhan voltan lebih rendah. Walaubagaimanapun, dengan peningkatan beban bukan lurus seperti pemacu kelajuan bolehubah (*variable speed drive*), peranti arka (*arcing devices*) dan kelengkapan elektronik yang merupakan sumber harmonik, ia akan berinteraksi dengan bank kapasitor pembetulan faktor kuasa dan berlakunya amplifikasi voltan dan arus. Amplifikasi voltan dan arus ini akan menyebabkan kegagalan kelengkapan berfungsi dengan baik [1].

1.3 Kajian Pembetulan Faktor Kuasa

Demi mendapat kelebihan ekonomi yang paling baik dari kuasa elektrik, kedua-dua penggunaan dan penjanaan kuasa elektrik perlu beroperasi pada tahap kecekapan yang tinggi. Untuk mencapai ini, faktor kuasa yang tinggi di seluruh kuasa sistem adalah penting [2].

Faktor kuasa yang boleh diterima bagi kebanyakan aplikasi ialah sekitar 0.95. Mungkin juga faktor kuasa yang lebih tinggi diperlukan pada situasi tertentu. Untuk bank kapasitor pembetulan faktor kuasa beroperasi dengan lebih memuaskan, faktor tambahan seperti berikut perlu dipertimbangkan:

- Ciri-ciri salunan yang boleh diterima.
- Amplifikasi voltan dan arus yang boleh diterima.
- Mengekalkan (*sustain*) voltan lampau (*overvoltage*) dalam julat $\pm 5\%$
- Ciri-ciri koordinasi penebatan (*insulation*) yang boleh diterima.

1.4 Penuras Harmonik

Beban bukan lurus akan menghasilkan arus harmonik. Arus harmonik ini akan mengalir ke rangkaian sistem kuasa dan akhirnya mengalir balik ke sumbernya. Arus harmonik ini akan membawa pelbagai kesan negatif kepada sistem kuasa dan seterusnya menyebabkan sistem kuasa itu tidak stabil. Arus harmonik ini tidak dapat kita elakkan selagi beban bukan lurus itu diperlukan oleh pengguna. Jadi kita harus mencari jalan untuk meminimalkan kesan buruk harmonik ini terhadap sistem kuasa. Salah satu cara untuk menghalang arus harmonik ini daripada mengalir dalam sistem kuasa ialah memasang penuras. Penuras ini berfungsi untuk menuraskan arus harmonik yang wujud dalam sistem kuasa.

Terdapat dua jenis penuras harmonik, iaitu penuras aktif dan penuras pasif. Penuras pasif ialah penuras yang terdiri daripada komponen pasif seperti perintang, kapasitor dan reaktor. Sambungan komponen-komponen pasif ini kemudiam ditala (*tuned*) bagi frekuensi harmonik tertentu yang ingin ditapis. Salah satu jenis penuras harmonik pasif yang tipikal ialah kapasitor disambung secara seri dengan induktor untuk menjadi satu atau lebih litar atau cabang pada sistem kuasa dan ditalakan supaya menerima tertib arus harmonik yang tertentu. Dengan ini, arus harmonik pada tertib yang tertentu itu akan mengalir antara sumber harmonik dengan cabang penuras yang dipasang dan ia tidak lagi mengalir balik ke rangkaian sistem kuasa. Dengan kata lain, herotan disebabkan oleh tertib harmonik tersebut dapat diminimalkan. Dalam sesetengah aplikasi seperti loji yang berbeban relau arka, beberapa penuras pasif akan dipasang secara selari untuk menuras arus harmonik yang ketara bagi beberapa tertib frekuensi tertentu. Penuras pasif ini lebih ekonomik diaplikasikan.

Dalam pengaplikasian penuras, pertimbangan yang terperinci diperlukan. Sesetengah penuras akan berinteraksi dengan galangan (*impedance*) sumber sistem kuasa membentuk salunan selari (*parallel resonance*). Salunan selari ini akan menyebabkan amplifikasi voltan lampau dan penguatan arus pada penuras dan merosakkan penuras itu. Maka analisis harmonik merupakan salah satu prosedur yang amat penting dalam rekabentuk penuras harmonik.

1.5 Panduan Laporan

Dalam **Bab 1** “Pengenalan”, beberapa isu tentang projek ini telah dibincangkan. Ia termasuk, skop dan objektif projek ini, dan maklumat-maklumat tentang topik projek ini. Latar belakang tentang harmonik sistem kuasa dan pembedahan faktor kuasa dibincangkan dalam bab ini supaya mengutarakan kepentingan projek ini dijalankan. Penuras harmonik juga disentuh dalam bab ini sebagai penyelesaian kepada masalah harmonik dan pembedahan faktor kuasa.

Bab 2, “Kajian Ilmiah” telah membincangkan tentang teori dan kajian projek secara lebih terperinci dari segi ilmiah. Teori-teori yang dikemukakan perlu difahami supaya dapat mengaitkannya dengan kajian projek ini. Topik-topik yang ada dalam bab ini telah banyak membantu untuk memahami tentang harmonik sistem kuasa dan jenis-jenis salunan yang berkaitan dengan kajian projek ini.

Bab yang seterusnya bertajuk “Pengukuran Harmonik”. Bab ini membincangkan cara-cara pengukuran dibuat di lokasi kajian projek ini iaitu bengkel kimpalan. Data-data hasil daripada pengukuran dipersembahkan di bab ini. Sistem kuasa pada Pusat Pengajian Kejuruteraan Mekanik, PPKM dan bengkel kimpalan juga dibincangkan dalam bab ini.

Bab 4, “Analisis Harmonik”, membincangkan tentang cara-cara analisis dijalankan ke atas data-data yang dikumpul semasa pengukuran pada lokasi kajian. Analisis harmonik memfokus kepada dua isu iaitu herotan harmonik terhadap sistem kuasa dan salunan sistem apabila harmonik wujud dalam sistem kuasa. Analisis herotan harmonik telah dibuat dari tiga aspek iaitu herotan semasa permintaan maksimum, herotan semasa THD_i maksimum dan purata herotan sepanjang bebanan puncak.

Setelah analisis harmonik dilakukan, **Bab 5** pula merupakan “Pembetulan Faktor Kuasa”. Dalam bab ini, satu bank kapasitor dicadangkan supaya dipasang pada sistem kuasa di bengkel kimpalan. Selain itu, analisis dijalankan supaya mengenalpasti kesan-kesan yang dibawa setelah kapasitor yang dicadangkan itu dipasang pada sistem kuasa di bengkel kimpalan.

Bab 6, “Kawalan harmonik”, membincangkan tentang cara dan prosedur merekabentuk suatu penuras harmonik di sistem kuasa. Cara rekabentuk adalah dengan mengubahsuai kapasitor pembetulan faktor kuasa. Teknik analitikal bagi merekabentuk penuras harmonik dipersembahkan dalam bab ini. Bab ini boleh dijadikan satu rujukan kepada mereka yang ingin merekabentuk satu penuras pasif untuk meningkatkan kualiti kuasa di tempat-tempat berharmonik.

Bab yang terakhir sekali ialah “Kesimpulan”. Dalam bab ini, kesimpulan yang diperoleh setelah kajian projek ini dibuat dibincangkan. Kesimpulan yang dibuat diharapkan boleh memberi sedikit sebanyak idea kepada mereka yang ingin menjalankan kajian harmonik pada masa akan datang nanti.

BAB 2

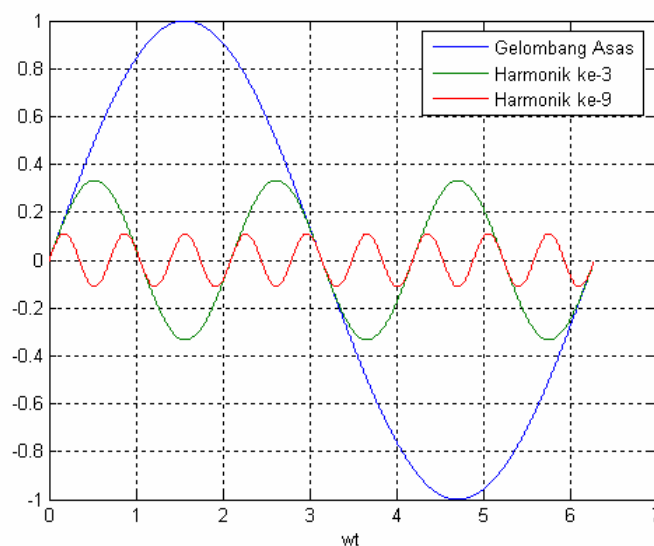
KAJIAN ILMIAH

2.1 Harmonik Sistem Kuasa

Sebelum proyek ini dilakukan, sedikit sebanyak kajian dari aspek akademik telahpun dijalankan. Kajian ilmiah ini adalah penting supaya kita dapat mengenalpasti, memahami dan menyelesaikan masalah secara tepat dan sesuai. Dalam bahagian ini, harmonik sistem kuasa akan dibincangkan.

2.1.1 Pengenalan

Harmonik sistem kuasa biasanya merujuk kepada arus harmonik atau voltan harmonik. Definisi “harmonik” ialah gelombang yang mempunyai frekuensi gandaan frekuensi asasnya. Jadi, harmonik voltan atau arus merujuk kepada voltan atau arus yang mempunyai frekuensi gandaan frekuensi asasnya. Sebagai contoh, suatu gelombang arus yang mempunyai frekuensi f , harmonik arus akan mempunyai frekuensi $2f, 3f, \dots, 7f$ dan sebagainya. **Rajah-2.1** menunjukkan suatu gelombang asasi sinus dan harmonik ketiga dan harmonik kesembilan bagi gelombang asasi itu.



Rajah-2.1: Contoh gelombang asasi dan gelombang harmoniknya.

Daripada **Rajah-2.1**, didapati jika gelombang asasi mempunyai frekuensi f , maka harmonik ketiga mempunyai frekuensi $3f$, dan harmonik kesembilan mempunyai frekuensi $9f$. Secara umum, harmonik $ke-n$ mempunyai frekuensi nf .

2.1.2 Perwakilan Harmonik Secara Siri Fourier

Suatu gelombang yang terherot boleh diwakili oleh suatu persamaan matematik. Perwakilan siri Fourier merupakan satu cara yang sangat berkesan untuk mengkaji dan menganalisis herotan harmonik. Siri Fourier membolehkan kita melihat suatu gelombang yang terherot secara penguraian, iaitu gelombang terherot tersebut akan diuraikan kepada komponen asasi dan komponen-komponen harmoniknya.

Umumnya, setiap gelombang berkala boleh dikembangkan secara persamaan matematik dalam bentuk siri Fourier. Persamaan siri Fourier adalah seperti Persamaan (2.1), dan pekali siri Fourier ditunjukkan dalam Persamaan (2.2), (2.3), (2.4), (2.5), dan (2.6) [6].

$$f(t) = A_0 + \sum_{h=1}^{\infty} [a_h \cos(h\omega_0 t) + b_h \sin(h\omega_0 t)] \quad (2.1a)$$

$$f(t) = A_0 + \sum_{h=1}^{\infty} A_h \sin(h\omega_0 t + \varphi_h) \quad (2.1b)$$

dimana,

$f(t)$: *fungsi berkala dengan frekuensi f .*

$A_1 \sin(\omega_0 t + \varphi_1)$: *mewakili komponen asasi.*

$A_h \sin(h\omega_0 t + \varphi_h)$: *mewakili komponen harmonik ke- h dengan amplitud A_h dan frekuensi $h\omega_0$ dan fasa φ_h .*

$$A_0 = \frac{1}{T} \int_0^T f(t) dt = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} f(t) d\omega_0 t \quad (2.2)$$

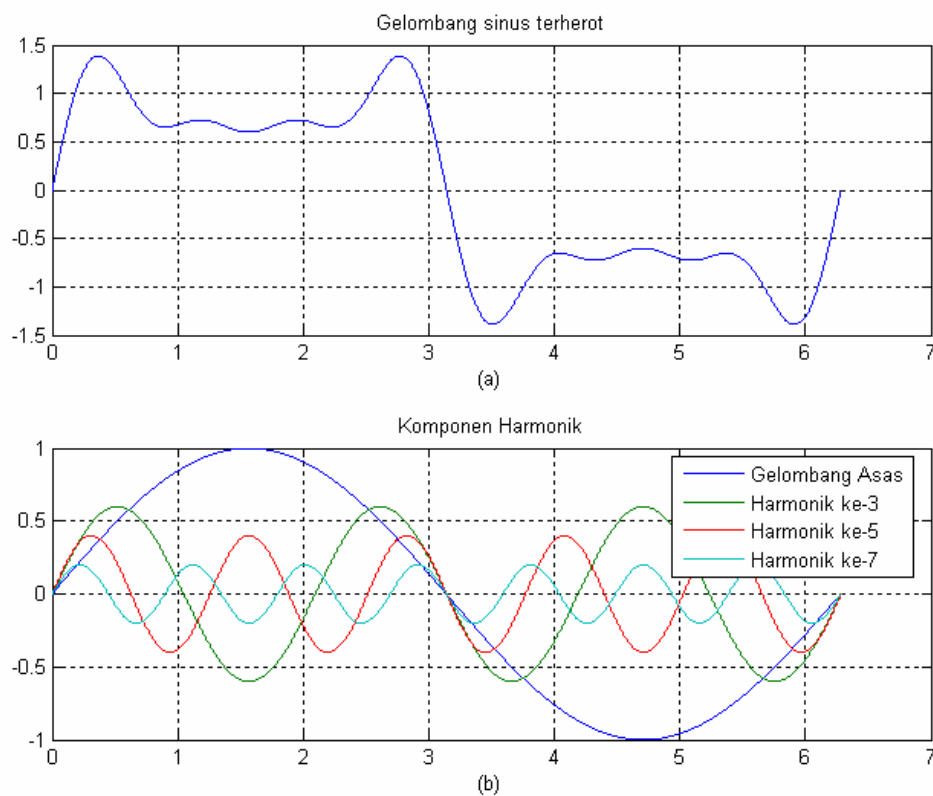
$$a_h = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \cos(h\omega_0 t) dt = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(t) \cos(hx) dx \quad (2.3)$$

$$b_h = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \sin(h\omega_0 t) dt = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(t) \sin(hx) dx \quad (2.4)$$

$$A_h = \sqrt{a_h^2 + b_h^2} \quad (2.5)$$

$$\varphi_h = \tan^{-1} \left(\frac{a_h}{b_h} \right) \quad (2.6)$$

Siri Fourier membolehkan kita menganalisis gelombang yang terherot dengan lebih mudah. Ini kerana persamaan siri Fourier merupakan kombinasi gelombang-gelombang harmonik dengan gelombang asasinya. **Rajah-2.2** dapat menjelaskan hal ini.



Rajah-2.2: (a). Gelombang terherot; (b). Komponen yang membentuk gelombang terherot itu.

Rajah-2.2(a) menunjukkan satu contoh gelombang terherot dan gelombang terherot ini dapat diuraikan kepada komponen-komponen seperti yang ditunjukkan pada **Rajah-2.2(b)**. Komponen yang membentuk gelombang terherot itu ialah harmonik ketiga, harmonik kelima dan harmonik ketujuh. Persamaan matematik secara siri Fourier yang boleh mewakili gelombang terherot pada **Rajah-2.2(a)** adalah seperti berikut:

$$f(t) = A_1 \sin(\omega t) + A_3 \sin(3\omega t) + A_5 \sin(5\omega t) + A_7 \sin(7\omega t) \quad (2.7)$$

\uparrow
 komponen asas

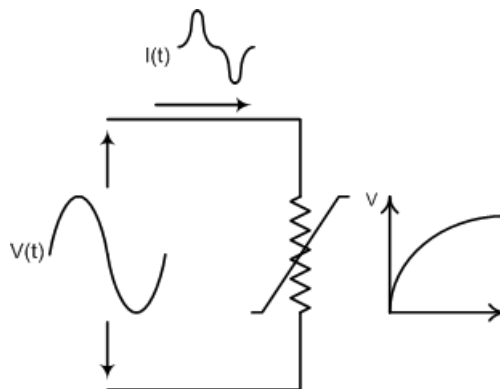
\uparrow
 harmonik ke-3

\uparrow
 harmonik ke-5

\uparrow
 harmonik ke-7

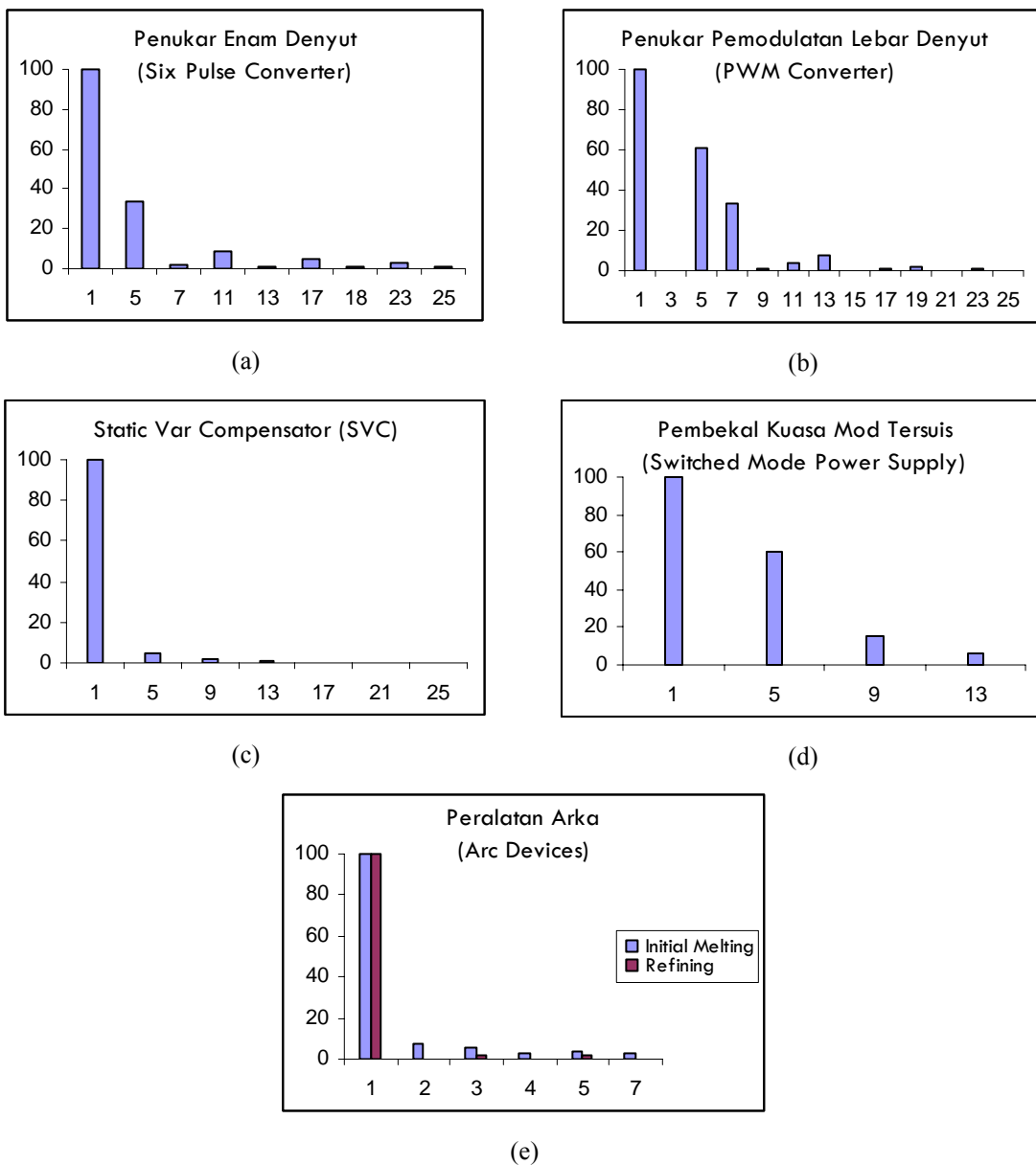
2.1.3 Jenis Sumber Harmonik

Beban yang menghasilkan arus harmonik kepada sistem kuasa yang membekalkan kuasa elektrik kepadanya dikatakan sumber harmonik. Beban yang menghasilkan harmonik ini adalah beban bukan lurus. Definisi bagi beban bukan lurus ialah beban yang mengalirkan arus tidak berkadar dengan voltan yang dibekalkan kepadanya. Dengan kata lain, hubungan arus dan voltan beban itu tidak linear. **Rajah-2.3** menunjukkan suatu beban bukan lurus dibekalkan suatu voltan sinus, keluaran arus adalah terherot [5].



Rajah-2.3: Arus $I(t)$ yang mengalir pada beban bukan lurus.

Daripada **Rajah-2.3**, didapati arus yang mengalir bukan dalam bentuk sinus seperti voltan, arus itu mempunyai bentuk gelombang terherot. Beban-belan yang bukan lurus ialah sumber harmonik. Beban-belan ini adalah seperti penukar (*converter*), penukar pemodulan lebar denyut (*pulse width modulated, PWM converters*), *cycloconverters*, peralatan arka (*arcing devices*), *static var compensator*, dan pembekal kuasa mod tersuis (*switched mode power supplies*). Tiap-tiap satu jenis sumber harmonik ini mempunyai spektrum harmonik yang berbeza. **Rajah-2.4** menunjukkan spektrum harmonik bagi sumber harmonik yang berlainan [4].



Rajah-2.4: Spektrum harmonik bagi jenis sumber harmonik yang berlainan.

2.1.4 Herotan Harmonik

Herotan harmonik biasanya diukur dengan parameter herotan harmonik seluruh (*total harmonic distortion, THD*). Parameter *THD* ini boleh mengukur tahap herotan bagi arus dan juga voltan. Herotan harmonik seluruh voltan (*THD_v*) mengukur tahap herotan voltan manakala herotan harmonik seluruh arus (*THD_i*) pula mengukur tahap herotan arus. Persamaan (2.8) merupakan formula bagi menghitung *THD_v* dan Persamaan (2.9) merupakan formula bagi menghitung *THD_i*.

$$THD_v = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} V_h^2}}{V_1} = \frac{\sqrt{V_2^2 + V_3^2 + V_4^2 + V_5^2 \dots}}{V_1} \quad (2.8)$$

$$THD_i = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} I_h^2}}{I_1} = \frac{\sqrt{I_2^2 + I_3^2 + I_4^2 + I_5^2 \dots}}{I_1} \quad (2.9)$$

dimana, V_1 : nilai rms voltan asasi
 V_h : nilai rms voltan tertib harmonik ke- h
 I_1 : nilai rms arus asasi
 I_h : nilai rms arus tertib harmonik ke- h

Dalam menjalankan suatu kajian harmonik pada sistem kuasa, setelah voltan harmonik, arus harmonik, dan *THD* dihitung, parameter-parameter tersebut perlu dibandingkan dengan piawaian yang ditetapkan oleh organisasi tertentu. IEEE, IEC, EN dan NORSOK mempunyai piawaian masing-masing. Biasanya piawaian IEEE dirujuk dan paling kerap digunakan. IEEE ialah Institusi Jurutera Elektrik dan Elektronik di Amerika Syarikat (*Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc, New Jersey, USA*) [9]. **Jadual-2.1** dan **Jadual-2.2** masing-masing menunjukkan piawaian had herotan voltan dan herotan arus yang ditetapkan oleh IEEE.

Jadual-2.1: IEEE 519 Had Herotan Voltan

Voltan Bus pada PCC	V_h Tunggal, %	THD Voltan, %
$V < 69$ kV	3.0	5.0
$69 \leq V \leq 161$ kV	1.5	2.5
$V \geq 161$ kV	1.0	1.5

Jadual-2.2: IEEE 519 Had Herotan Arus

Herotan Arus Harmonik Maksimum, Peratusan I_L (%)						
Tertib Harmonik Tunggal (Harmonik Ganjil)						
I_{SC} / I_L	$h < 11$	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$H \geq 17$	TDD (%)
< 20	4.0	2.0	1.5	0.6	0.3	5
20-50	7.0	3.5	2.5	1.0	0.5	8
50-100	10	4.5	4.0	1.5	0.7	12
100-1000	12	5.5	5.0	2.0	1.0	15
> 1000	15	7.0	6.0	2.5	1.4	20

Harmonik genap adalah 25% daripada had harmonik ganjil. TDD merujuk kepada Herotan Permintaan Seluruh (Total Demand Distortion) dan ia adalah berdasarkan arus permintaan maksimum purata pada frekuensi asasi pada titik gandingan sepunya, PCC (point of common coupling).

- I_{SC} = Arus litar pintas maksimum pada PCC
- I_L = Arus (asasi) beban semasa permintaan maksimum pada PCC
- h = Tertib harmonik

Piwaian IEEE 519 hanya merujuk kepada nilai arus atau voltan yang diukur pada titik gandingan sepunya, PCC (point of common coupling) sistem kuasa [8]. Titik gandingan sepunya ialah titik di antara pembekal kuasa dengan pengguna sistem kuasa elektrik. Jika pengukuran bukan dibuat pada PCC maka piwaian IEEE 519 adalah tidak sesuai digunakan.

2.2 Hubungan Harmonik dengan Faktor Kuasa

Dalam bahagian ini, hubungan antara harmonik dengan faktor kuasa akan dibincangkan. Sebelum membincang tentang faktor kuasa, fokus diberikan kepada kuasa terlebih dahulu. Terdapat tiga kuantiti yang berkaitan dengan kuasa iaitu S kuasa ketara (*apparent power*), P kuasa aktif (*active power*) dan Q kuasa reaktif (*reactive power*). Kadang-kala, kuasa ketara juga dikenali sebagai kuasa kompleks (*complex power*) dan kuasa aktif dikenali sebagai kuasa nyata (*real power*). Formula bagi menghitung kuasa ketara S ialah seperti Persamaan (2.10), manakala kuasa aktif ditunjukkan pada Persamaan (2.11)

$$S = V_S I_S \quad (2.10)$$

$$P = V_S I_{S1} \cos \theta \quad (2.11)$$

dimana,

θ : sudut fasa antara voltan dengan arus.

V_S : voltan rms sistem

I_S : arus rms sistem

I_{S1} : arus rms asasi

Faktor kuasa ditakrifkan sebagai nisbah bagi kuasa aktif dengan kuasa ketara sepertimana yang ditunjukkan dalam Persamaan (2.12).

$$pf = \frac{P}{S} = \frac{V_S I_{S1} \cos \theta}{V_S I_S} = \frac{I_{S1} \cos \theta}{I_S} \quad (2.12)$$

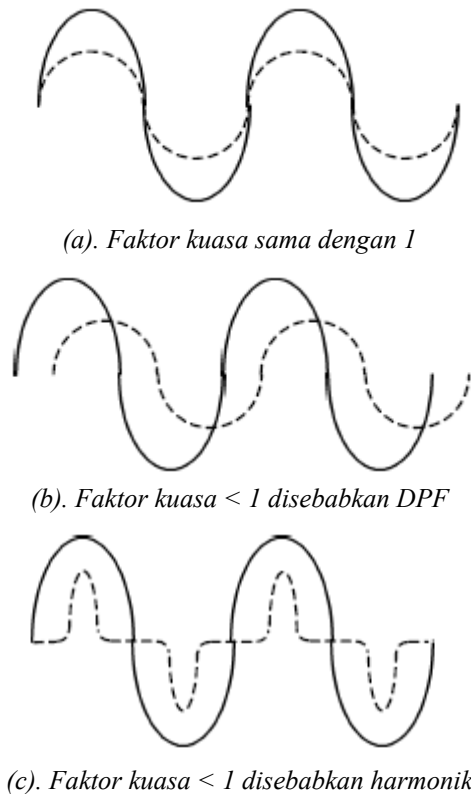
Pada masa lampau, faktor kuasa hanya bergantung kepada $\cos \theta$ yang juga dikenali faktor kuasa anjakan (*DPF*). Dengan peningkatan beban bukan lurus di dalam sistem kuasa, kesan herotan harmonik terhadap faktor kuasa tidak boleh diabaikan. Persamaan (2.12) boleh ditulis dalam bentuk Persamaan (2.13), dan dengan menggunakan Persamaan (2.9), Persamaan (2.13) boleh dikaitkan dengan THD_i seperti ditunjukkan pada Persamaan (2.14) [5].

$$pf = \frac{I_{s1}}{I_s} DPF \quad (2.13)$$

$$pf = \frac{1}{\sqrt{1 + THD_i^2}} DPF \quad (2.14)$$

Merujuk kepada Persamaan (2.14), dapat disimpulkan bahwa dengan peningkatan herotan arus harmonik faktor kuasa akan mengurang. Jadi kawalan harmonik dan faktor kuasa anjakan adalah amat diperlukan demi memastikan faktor kuasa berada pada tahap yang memuaskan.

Rajah-2.5 memberi gambaran yang lebih jelas tentang kejadian faktor kuasa yang rendah akibat daripada faktor kuasa anjakan yang rendah dan herotan harmonik yang tinggi.



Rajah-2.5: Faktor kuasa rendah disebabkan oleh DPF dan herotan harmonik.

2.3 Salunan (*Resonance*)

2.3.1 Pengenalan

Salunan (*resonance*) merupakan satu perkara yang penting apabila kajian dilakukan pada sesuatu sistem kuasa yang mengandungi harmonik. Ini kerana dalam sistem kuasa yang berharmonik, galangan bagi beban induktif dan kapasitif akan sentiasa berubah mengikut frekuensi arus yang mengalir melaluinya. Salunan akan berlaku pada tertib harmonik yang tertentu apabila reaktans induktif litar sama dengan reaktans kapasitifnya seperti yang ditunjukkan pada Persamaan (2.15) [3].

$$X_{Lr} = \omega_r L = X_{Cr} = \frac{1}{\omega_r C} \quad (2.15)$$

Pada frekuensi salunan,

$$\omega_r = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad \text{rad / saat} \quad (2.16a)$$

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} = \frac{f_o}{\omega_o\sqrt{LC}} = f_o \sqrt{\frac{X_C}{X_L}} \quad \text{Hz} \quad (2.16b)$$

Tertib harmonik pada salunan ialah,

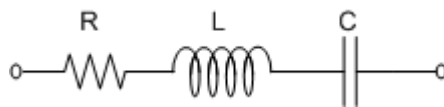
$$h_r = \frac{f_r}{f_o} = \frac{1}{\omega_o\sqrt{LC}} \quad (2.17a)$$

$$= \sqrt{\frac{X_C}{X_L}} \quad (2.17b)$$

Terdapat dua jenis salunan iaitu salunan siri (*series resonance*) dan salunan selari (*parallel resonance*). Bahagian yang seterusnya akan membincangkan salunan siri dan selari dengan lebih terperinci.

2.3.2 Salunan Siri (Series Resonance)

Salunan siri berlaku apabila suatu litar sesiri RLC (seperti yang ditunjukkan pada **Rajah-2.6**) mempunyai reaktans induktif dan kapasitif yang sama pada tertib harmonik tertentu. Apabila salunan siri berlaku, galangan litar akan menjadi sangat rendah, ini bermaksud suatu voltan menguja yang rendah akan mengakibatkan arus yang sangat besar [3].



Rajah-2.6: Litar RLC sesiri

Galangan setara bagi litar pada **Rajah-2.6** ialah

$$Z(h) = R + j \left(hX_L - \frac{X_C}{h} \right) \quad (2.18a)$$

$$|Z(h)| = \sqrt{R^2 + \left(hX_L - \frac{X_C}{h} \right)^2} \quad (2.18b)$$

dimana,

R : rintangan bagi perintang

X_L : kearuhan bagi induktor pada frekuensi asasi

X_C : kemuatan bagi kapasitor pada frekuensi asasi

h : tertib harmonik

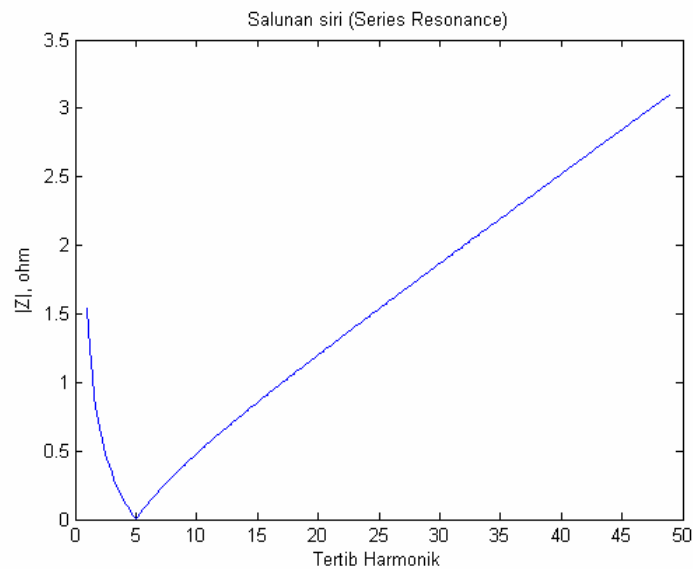
Semasa salunan berlaku pada tertib harmornik $ke-h_r$ galangan bagi L dan C ialah

$$h_r X_L = \frac{X_C}{h_r} = X_r$$

Jadi, galangan bagi litar menjadi resistif tulen iaitu

$$Z(h_r) = R$$

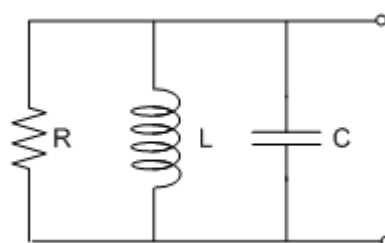
Rajah-2.7 di bawah menunjukkan ciri galangan bagi suatu litar sesiri RLC pada tertib harmonik yang berlainan. Daripada **Rajah-2.7** didapati salunan siri berlaku dekat dengan harmonik ke-5. Apabila salunan siri berlaku galangan litar menjadi sangat rendah.



Rajah-2.7: Ciri galangan salunan siri pada litar RLC

2.3.3 Salunan Selari (Parallel Resonance)

Salunan selari berlaku pada litar RLC selari apabila reaktans induktif dan reaktans kapasitif mempunyai nilai yang sama pada tertib harmonik tertentu. Apabila salunan selari berlaku, galangan setara litar RLC tersebut akan menjadi sangat tinggi. Jadi arus menguja yang rendah mengalir melalui litar tersebut akan menyebabkan voltan yang sangat tinggi. **Rajah-2.8** menunjukkan satu litar RLC selari [3].



Rajah-2.8: Litar RLC selari

Galangan setara bagi litar pada **Rajah-2.8** ialah

$$Z(h) = \frac{-jRX_L X_C}{R\left(hX_L - \frac{X_C}{h}\right) - jX_L X_C} \quad (2.19a)$$

$$|Z(h)| = \frac{RX_L X_C}{\sqrt{\left[R\left(hX_L - \frac{X_C}{h}\right)\right]^2 + [X_L X_C]^2}} \quad (2.19b)$$

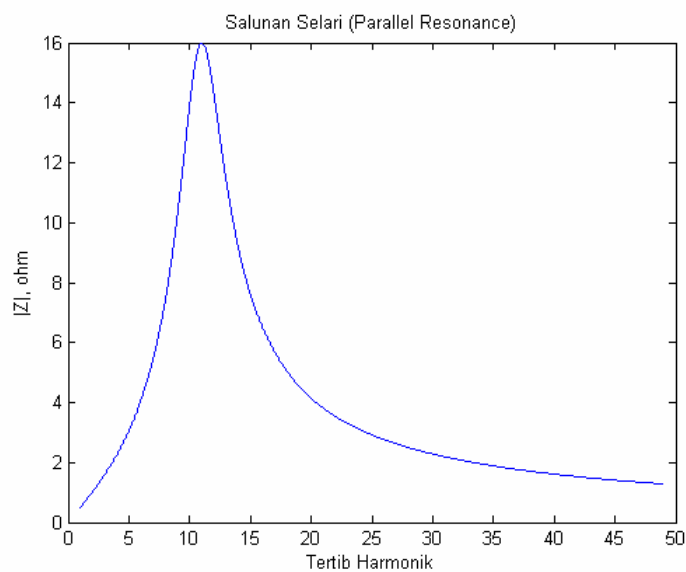
Semasa salunan berlaku pada tertib harmornik $ke-h_r$, galangan bagi L dan C ialah

$$h_r X_L = \frac{X_C}{h_r} = X_r$$

Jadi, galangan bagi litar menjadi resistif tulen iaitu

$$Z(h_r) = R$$

Rajah-2.9 di bawah menunjukkan ciri galangan bagi suatu litar selari RLC pada tertib harmonik yang berlainan. Didapati salunan selari berlaku dekat dengan harmonik ke-11. Apabila salunan selari berlaku galangan litar menjadi tinggi.



Rajah-2.9: Ciri galangan salunan selari pada litar RLC

BAB 3

PENGUKURAN HARMONIK

3.1 Pengenalan

Pengukuran harmonik dalam projek ini semuanya dibuat dengan menggunakan *Fluke 43B Power Quality Analyzer*. Pengukur ini mampu membuat kebanyakan pengukuran pada sistem kuasa. Contoh pengukuran yang dibuat dalam projek ini dengan menggunakan *Fluke 43B* ialah pengukuran bagi arus harmonik, voltan harmonik, arus rms, voltan rms, kuasa aktif, kuasa reaktif, kuasa ketara dan faktor kuasa. **Rajah-3.1** merupakan gambar bagi *Fluke 43B Power Quality Analyzer*.

Nilai arus dan nilai-nilai kuasa yang tercatat oleh *Fluke 43B* adalah setengah daripada nilai sebenar. Ini kerana terdapat dua kabel kemasukan bagi setiap fasa pada papan agihan (*distribution board*) GF/KIM, *Fluke 43B* tidak mampu mengapit (*clamp*) kedua-dua kabel sekali kerana saiz terlalu besar, jadi hanya satu kabel diapit sepanjang pengukuran dijalankan. Gambar-gambar semasa pengukuran dibuat dipamerkan pada **Lampiran B**.



Rajah-3.1 Fluke 43B Power Quality Analyzer

3.2 Sistem Kuasa di Lokasi Kajian

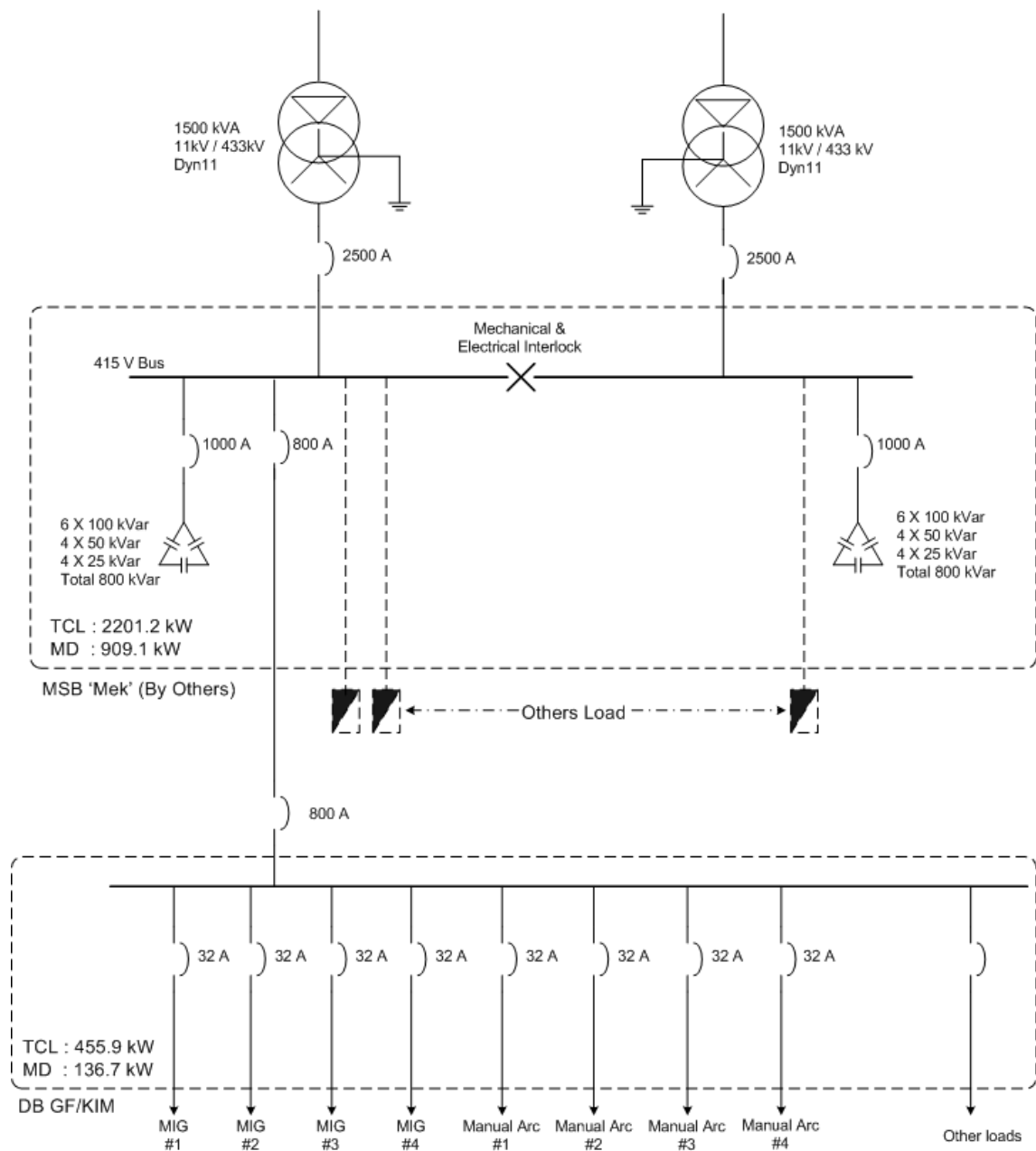
Dalam projek ini, sistem kuasa daripada suatu lokasi dipilih untuk menjalankan kajian tentang harmonik sistem kuasa. Lokasi kajian yang dipilih mesti merupakan suatu loji yang mempunyai beban bukan lurus. Jadi, Bengkel Kimpalan, Pusat Pengajian Kejuruteraan Mekanik (PPKM), Kampus Kejuruteraan Universiti Sains Malaysia dipilih untuk menjalankan kajian harmonik tersebut. **Rajah-3.2** merupakan gambar yang diambil di lokasi pengukuran.

Dalam bengkel kimpalan, sumber kuasa elektriknya adalah diagihkan oleh papan agihan (*distribution board*) GF/KIM. Kuasa elektrik papan agihan GF/KIM ini adalah dibekalkan oleh bas $415V$ pada papan suis utama (*main switch board*) MSB, dan bas $415V$ tersebut merupakan keluaran sekunder transformer $11kV/433V$.

Rajah-3.3 menunjukkan gambarajah garis tunggal (*single line diagram*) bagi sistem kuasa di bengkel kimpalan yang telah dipermudahkan. **Rajah-A (Lampiran A)** pula merupakan gambarajah garis tunggal bagi sistem kuasa GF/KIM bengkel kimpalan yang sebenar.



Rajah-3.2: Bengkel kimpalan di PPKM



Rajah-3.3 Diagram garis tunggal yang dipermudahkan bagi sistem kuasa bengkel kimpalan.

Daripada **Rajah-3.3**, boleh diperhatikan bahawa terdapat dua transformer yang membekalkan kuasa kepada 415V bar bas di MSB. Bar bas juga dibahagikan kepada dua bahagian, dan diasingkan oleh *interlock*. Pada operasi normal, transformer membekalkan kuasa kepada bar bas masing-masing dan *interlock* tidak menyambungkan kedua-dua bar bas. *Interlock* hanya menyambungkan kedua-dua bar bas pada keadaan kritikal seperti salah satu transformer tidak berfungsi.

Bank kapasitor yang sedia ada pada MSB berfungsi untuk meningkatkan faktor kuasa sistem di PPKM. Kapasitor yang sedia ada ini berkadar $800kVar$. Bar bas $415V$ selain membekal kuasa kepada papan agihan, DB GF/KIM, ia juga membekal kuasa kepada semua DB pada bangunan PPKM.

3.3 Sumber Harmonik

Beban bukan lurus yang disambungkan pada GF/KIM kebanyakannya ialah mesin kimpalan arka elektrik. Terdapat juga sumber harmonik yang lain seperti lampu pendafluor, tetapi ia tidak menyumbangkan peratusan yang ketara semasa bebanan puncak bengkel kimpalan.

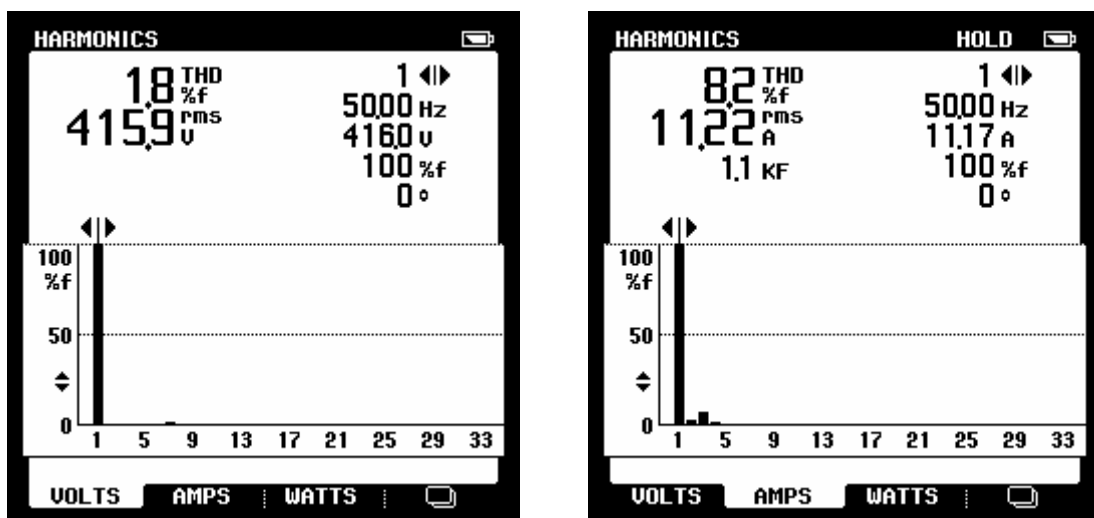
Terdapat dua jenis mesin kimpalan elektrik pada bengkel kimpalan. Mesin-mesin kimpalan itu ialah mesin kimpalan *MIG*, dan mesin kimpalan *Manual Arc*. Mesin kimpalan *MIG* dan *Manual Arc* adalah mesin tiga fasa. Pengukuran telah dibuat ke atas kedua-dua mesin kimpalan dan beban-beban yang lain. Walau bagaimanapun, spektrum harmonik yang dihasilkan oleh mesin kimpalan arka sukar di rekodkan, ini kerana mesin kimpalan arka tidak mempunyai arus yang tetap. Spektrum harmonik yang direkodkan hanya menunjukkan corak harmonik semasa pengukuran dibuat.

3.3.1 Mesin Kimpalan Manual Arc

Jadual-3.1 merupakan bacaan semasa pengukuran oleh *Fluke 43B*. Nilai-nilai untuk kuasa tidak direkodkan kerana nilainya sentiasa berubah. **Rajah-3.4** menunjukkan harmonik voltan dan harmonik arus semasa bagi mesin kimpalan *manual arc*. Didapati herotan harmonik yang diukur tidak tinggi bagi voltan dan juga arus. Akan tetapi, pengukuran yang dibuat ini mungkin tidak tepat kerana corak dan nilai herotannya sentiasa berubah. **Rajah-3.5** menunjukkan bentuk gelombang arus yang terherot.

Jadual-3.1: Harmonik bagi mesin kimpalan *Manual Arc*.

<i>Beban: Mesin Kimpalan Manual Arc</i>						
P	=	~	kW	PF	=	~
S	=	~	kVA	DPF	=	~
Q	=	~	$kVar$	f	=	50 Hz
$V(rms)$	=	415.9	V	THD_V	=	1.8 %
$I(rms)$	=	22.44	A	THD_I	=	8.2 %
<i>Arus Harmonik:</i>						
<i>Tertib Harmonik</i>	<i>Frekuensi, (Hz)</i>	$I_h(rms), (A)$	<i>Peratusan, (%)</i>	<i>Sudut, (°)</i>		
1	50	22.34	100	0		
3	150	1.72	7.7	127		



Rajah-3.4: Spektrum harmonik bagi mesin kimpalan *Manual Arc*