

PEMBANGUNAN PENURAS KUASA AKTIF SAMBUNGAN SELARI DALAM
MENGURANGKAN HARMONIK

Oleh

Norhasniza bt Md Razali

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

Mac 2006

ABSTRAK

Penuras kuasa aktif menggunakan pensuisan elektronik kuasa untuk menjana arus harmonik yang akan membatalkan arus-arus harmonik yang dihasilkan oleh beban tidak linear. Sehubungan itu, projek ini dibangunkan dengan menggunakan topologi penyongsang sumber voltan tiga-fasa sebagai penuras kuasa aktif dengan kaedah kawalan Pemodulatan Lebar Denyut Bersinus (SPWM) dengan frekuensi pensuisan yang tinggi bagi menghasilkan keluaran arus setiap fasa yang akan membatalkan harmonik yang terhasil akibat penggunaan beban tidak linear pada sistem talian penghantaran tiga fasa. Projek dimulakan dengan menjalankan kajian ilmiah mengenai topologi yang terlibat, seterusnya proses merekabentuk serta simulasi litar menggunakan perisian PSPICE 9.1 dan kemudian diikuti dengan pembangunan prototaipnya. Kedua-dua kaedah analog serta digital diaplikasikan terhadap rekabentuk litar-litar untuk pensuisan MOSFET pada penuras serta litar keseluruhan bagi memastikan keluaran yang dihasilkan adalah mengikut spesifikasi yang dikehendaki. Objektif projek untuk merekabentuk satu penuras aktif kuasa berjaya dicapai secara simulasi dan juga praktikal namun pengurangan harmonik pada talian hanya berjaya dibuktikan secara simulasi. Litar pembuktian secara praktikal tidak dapat diteruskan disebabkan faktor kekangan masa.

ABSTRACT

An active power filter uses power electronic to generate harmonic current that will cancel the harmonic currents from a nonlinear load. This project is using the three-phase Voltage Source Inverter (VSI) topology as the active power filter with the Sinusoidal Pulse-Width Modulation technique of high frequency switching to produce current outputs of each phase that will cancel the harmonics produced by the usage of nonlinear loads at the three phase transmission line system. This project is started by studying the involved topology, and then designing and simulating circuits using PSPICE V9.1 software. After that, the practical circuits are developed. Both analog and digital methods are applied to the MOSFET switching circuits design in the filter and also for the overall circuits to make sure that the outputs are within the specifications decided. The objective of the project that is to design an active power filter was achieved in both simulation and practically. While the harmonics decrement only can be proved by simulation. The practical circuit cannot be continued because of the lack of time.

PENGHARGAAN

Bismillahirrahmanirrahim.

Segala pujian bagi Allah, Tuhan sekalian alam kerana dengan limpah kurnia serta izin-Nya, saya telah diberi kekuatan serta kemampuan untuk menyiapkan laporan Projek Tahun Akhir ini. Oleh itu, saya ingin mengambil kesempatan ini untuk melahirkan rasa penghargaan saya kepada semua pihak serta individu yang terlibat secara langsung ataupun tidak langsung dalam menjayakan projek ini.

Jutaan terima kasih yang tidak terhingga kepada penyelia Projek Tahun Akhir saya iaitu Prof. Madya Dr Che Mat Hadzer b. Mahmud yang telah memberikan peluang kepada saya untuk menjalankan projek di bawah bimbingan beliau. Setinggi-tinggi penghargaan juga saya tujukan kepada En. Mohd Izhar b. Abu Bakar dan En. Nazir Abdullah yang tidak pernah jemu memberikan informasi serta tunjuk ajar sepanjang proses pembangunan prototaip yang dijalankan. Segala ilmu yang dicurahkan akan terus menjadi ingatan saya sehingga ke akhir hayat.

Sekalung penghargaan kepada Ketua Juruteknik, En. Mohd Naim b. Abdullah dan En. Ahmad Shaukhi Noor di atas segala bantuan dalam penyediaan komponen projek serta penggunaan peralatan di makmal Elektronik serta Elektrik Kuasa. Tidak lupa juga jutaan terima kasih kepada semua juruteknik serta pembantu makmal yang turut sama membantu dalam menjayakan projek ini.

Akhir kata, terima kasih kepada semua rakan seperjuangan yang memberikan pelbagai idea yang bernas bagi tujuan penambahbaikan projek ini. Juga tidak lupa, setinggi-setinggi penghargaan saya tujukan kepada kedua ibu bapa saya yang amat memahami serta sentiasa memberikan sokongan padu di atas usaha saya ini. Sesungguhnya hanya Allah sahaja yang dapat membalas jasa baik kalian.

TERIMA KASIH.

ISI KANDUNGAN

	Muka Surat
ABSTRAK	i
ABSTRACT	ii
PENGHARGAAN	iii
ISI KANDUNGAN	iv

BAB I PENDAHULUAN

1.1 Pengenalan	1
1.2 Objektif Projek	1
1.3 Penyongsang SPWM	2
1.4 Modulasi Lebar Denyut Bersinus (SPWM)	2
1.5 Pensuisan Peranti Kuasa	3
1.6 Metodologi	3
1.7 Kesimpulan	4

BAB 2 KAJIAN ILMIAH

2.1 Pengenalan	5
2.2 Harmonik	6
2.3 Analisa Harmonik	7
2.3.1 Siri Fourier	8
2.3.2 Herotan Arus pada Talian	9
2.3.3 Jumlah Herotan Harmonik (THD)	10
2.3.4 Faktor Kuasa	11
2.4 Beban Tidak Linear	11
2.5 Kawalan Pensuisan PWM	13
2.5.1 PWM Sinus (SPWM)	15
2.5.2 SPWM Tiga-Fasa	17
2.6 Litar Penuras Kuasa Aktif	19

2.6.1	Penyongsang Sumber Voltan Kawalan PWM	19
2.6.2	Penyongsang Sumber Voltan Tiga-Fasa	21
2.6.3	Isyarat Kawalan Penyongsang Sumber Voltan	22
2.7	Lengah Pensuisan Get	25
2.8	Peranti Kuasa MOSFET	25
2.9	Kesimpulan	28

BAB 3 REKABENTUK DAN SIMULASI

3.1	Pengenalan	29
3.2	Litar Penyongsang Sumber Voltan Tiga-Fasa	29
3.3	Litar Pensuisan SPWM	30
3.3.1	Litar Penjana Gelombang Segitiga	30
3.3.2	Litar Penjana Gelombang Sinus	32
3.3.3	Litar Penjanaan Isyarat SPWM	33
3.3.4	Litar Songsangan Keluaran SPWM	35
3.3.5	Litar Pengayun Gelombang Segiempat	36
3.3.6	Litar Pembanding Gelombang Segiempat dan Keluaran SPWM	38
3.4	Litar Lengah Pensuisan	39
3.5	Litar Pemacu Get MOSFET	40
3.6	Kesimpulan	41

BAB 4 KAJIAN KES

4.1	Pengenalan	42
4.2	Sebelum Penurasan	42
4.2.1	Litar Rektifier Tetimbang Penuh Tiga-Fasa	42
4.2.2	Simulasi Litar	43
4.2.3	Analisis Fourier	45
4.2.4	Analisis THDi	46

4.4	Selepas Penurasan	47
4.4.1	Keluaran Penuras Kuasa Aktif	48
4.4.2	Simulasi Litar	49
4.4.3	Analisis Fourier	50
4.4.4	Analisis THDi	51
4.5	Keputusan Keseluruhan	53
4.5.1	Perbandingan Spektrum Harmonik	53
4.5.2	Peratus Pengurangan Harmonik	54
4.6	Kesimpulan	54

BAB 5 PEMBANGUNAN PROTOTAIP

5.1	Pengenalan	55
5.2	Litar Pensuisan SPWM	55
5.2.1	Litar Penjana Gelombang Segitiga	56
5.2.2	Litar Penjana Gelombang Sinus	56
5.2.3	Litar Keluaran SPWM	58
5.2.4	Litar Pengayun Gelombang Segiempat	58
5.2.5	Litar Pembanding Gelombang Segiempat dan Keluaran SPWM	59
5.3	Litar Lengah Pensuisan	60
5.4	Litar Penyongsang Tiga-Fasa	60
5.5	Sistem Lengkap Penuras Kuasa Aktif	61
5.6	Keluaran Penuras Kuasa Aktif	61
5.7	Kesimpulan	63

BAB 6 PERBINCANGAN

6.1	Pencapaian Projek	64
6.2	Masalah Yang Dihadapi	64
6.3	Hal-hal Berbangkit	65

6.4 Cadangan Penambahbaikan	65
6.5 Kesimpulan	65

RUJUKAN

LAMPIRAN A: GAMBARAJAH KESELURUHAN

LAMPIRAN B: HELAIAN DATA LM741

LAMPIRAN C: HELAIAN DATA LM324

LAMPIRAN D: HELAIAN DATA IR2110

LAMPIRAN E: HELAIAN DATA IXTH20N60

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Pengenalan

Herotan harmonik yang menjejaskan kualiti kuasa elektrik telah menjadi satu isu yang serius dan adalah menjadi tanggungjawab para jurutera untuk mengurangkan harmonik dalam sistem kuasa elektrik di negara ini. Definisi harmonik adalah arus ataupun voltan yang mempunyai frekuensi gandaan daripada frekuensi asas yang dibekalkan. Kewujudan harmonik pada sistem kuasa menjadi semakin penting dengan meningkatnya penggunaan beban tidak linear di mana arus tidak berkadar terus dengan voltan, contohnya komputer, televisyen, dan juga beban-beban elektronik kuasa seperti rektifier dan konverter [1]. Pengaruh harmonik ke atas sistem kuasa adalah pada punca kuasa iaitu transformer dan penjana, talian serta pada beban. Penuras kuasa aktif adalah salah satu kaedah untuk mengurangkan pengaruh harmonik pada talian memandangkan ia dapat membatalkan kesemua frekuensi harmonik pada talian secara keseluruhan [2].

1.2 Objektif Projek

Tujuan utama projek ini adalah untuk merekabentuk satu penuras kuasa aktif dengan menggunakan kawalan pensuisan teknik pemodulatan lebar denyut sinus (SPWM) bagi mengurangkan pengaruh harmonik pada talian penghantaran sistem kuasa tiga-fasa. Penuras kuasa aktif menggunakan konsep elektronik kuasa untuk menghasilkan komponen harmonik yang akan membatalkan komponen harmonik yang dihasilkan oleh beban tidak linear [2]. Herotan harmonik disebabkan beban tak linear ini adalah masalah yang paling kompleks dalam sejarah industri elektrik kuasa. Kewujudan harmonik dalam sistem kuasa akan memberi kesan kepada faktor kuasa dan mengakibatkan kehilangan kuasa pada talian penghantaran tiga-fasa. Hal ini akan mempengaruhi kualiti kuasa sistem yang sebenar. Antara tanda-tanda berlakunya herotan adalah kegagalan fungsi pada komponen-komponen sistem kuasa, kerosakan pada perkakasan, kepanasan lampau dan faktor kuasa yang rendah [3]. Kesan harmonik ke atas pengurangan faktor kuasa akan turut mempengaruhi jumlah herotan harmonik (THD). Dengan ini, rekabentuk penuras kuasa aktif dengan kawalan

modulasi lebar denyut akan mengurangkan gangguan harmonik pada sistem elektrik kuasa dan seterusnya meningkatkan kualiti kuasa yang dibekalkan kepada pengguna.

1.3 Penyongsang SPWM

Konfigurasi penuras kuasa aktif bagi projek ini adalah menggunakan penyongsang dengan kawalan SPWM yang mampu menghasilkan isyarat keluaran yang berkualiti tinggi pada tahap harmonik arus yang minima [2]. Voltan keluaran adalah menghampiri sinusoidal. Fungsi suatu litar penyongsang ialah untuk menukar voltan masukan dc kepada voltan keluaran simetri ac. Voltan keluaran yang dihasilkan akan mempunyai nilai magnitud yang dikehendaki. Perubahan voltan keluaran boleh dihasilkan pada frekuensi tetap ataupun frekuensi berubah [4]. Gandaan bagi inverter adalah nisbah voltan keluaran ac terhadap voltan masukan dc. Pada keadaan lurus, bentuk gelombang keluaran adalah bersinus. Tetapi secara praktik ianya tidak lurus disebabkan oleh kehadiran harmonik. Bagi penggunaan kuasa rendah dan pertengahan, bentuk keluaran segiempat atau mirip segiempat boleh diterima. Tetapi untuk litar berkuasa tinggi, bentuk keluaran yang bersinus perlu dihasilkan [5]. Kemunculan peranti pensuisan berkelajuan tinggi boleh mengurangkan kesan harmonik di dalam litar menerusi teknik-teknik pensuisan yang cekap. Jenis-jenis penyongsang dapat dikelaskan kepada sistem satu fasa ataupun tiga fasa. Biasanya untuk kecekapan kuasa yang lebih baik, sistem tiga fasa akan digunakan. Suatu penyongsang dengan masukan voltan tetap dipanggil penyongsang punca voltan (VSI) manakala penyongsang dengan masukan arus tetap dipanggil penyongsang punca arus (CSI) [5].

1.4 Modulasi Lebar Denyut Bersinus (SPWM)

Aplikasi penyongsang dalam penuras kuasa aktif memerlukan pengawalan untuk voltan keluaran mengikut keperluan. Antara tujuan kawalan voltan bagi litar penyongsang adalah untuk mendapatkan penyesuaian terhadap perubahan voltan masukan dc, menghasilkan pengaturan voltan yang lebih baik dan mendapatkan kawalan mantap untuk voltan dan frekuensi. Cara kawalan yang paling berkesan ialah dengan mengubah gandaan inverter menerusi kawalan Modulasi Lebar Denyut (PWM). Antara teknik yang digunakan ialah PWM Tunggal, PWM Berganda dan PWM Bersinus [5]. Projek ini dijalankan dengan menggunakan kaedah kawalan PWM bersinus. Dalam setiap kes, isyarat SPWM memacu

transistor kuasa pensuisan pada masukan get, manakala keluaran transistor kuasa tersebut memacu beban. Terdapat pelbagai cara untuk menghasilkan isyarat termodulat ini. Antaranya ialah dengan menggunakan pemasa NE555 ataupun penguat kendalian 741 [6]. Teknik penghasilan isyarat lebar jalur termodulat ini ialah dengan melakukan perbandingan dua isyarat masukan iaitu isyarat pembawa segitiga dan isyarat rujukan sinus. Konsep asas kaedah SPWM ialah pembahagian masa kepada beberapa masa tutup dan buka untuk tempoh yang berubah-ubah [6]. Nilai rms voltan ac adalah dikawal oleh tempoh tutup ('on') pensuisan peranti kuasa. Kelebihan kawalan SPWM ialah ia boleh digunakan untuk aplikasi pensuisan berfrekuensi tinggi dan dengan ini, herotan harmonik dapat dikurangkan [7].

1.5 Pensuisan Peranti Kuasa

Pensuisan peranti kuasa adalah amat penting dalam aplikasi satu litar penyongsang. Terdapat pelbagai peranti kuasa yang boleh digunakan . Antaranya ialah BJT, MOSFET, IGBT dan GTO. Ciri-ciri yang membezakan antara satu peranti dengan peranti yang lain ialah kepantasan pensuisannya [5]. Peranti kuasa ini boleh beroperasi sebagai suis dengan mengenakan isyarat kawalan kepada terminal get pada transistor. Keluaran yang dikehendaki boleh diperolehi dengan mengubah-ubah masa operasi peranti pensuisan ini [5]. MOSFET dan IGBT merupakan peranti kuasa kawalan voltan. Walaupun keduanya mempunyai kelajuan pensuisan melebihi BJT, namun MOSFET mempunyai kelajuan pensuisan yang paling tinggi. Operasi satu MOSFET kuasa memerlukan impedans masukan yang tinggi serta arus masukan yang kecil. Ia banyak digunakan dalam aplikasi pengubah berfrekuensi tinggi dengan kuasa yang rendah [8].

1.6 Metodologi

Secara kasar, pelaksanaan projek ini dimulakan dengan menjalankan kajian ilmiah bagi tajuk-tajuk yang berkaitan dengan projek ini. Kajian ilmiah yang dijalankan meliputi kajian teori secara lebih mendalam terhadap kaedah kawalan PWM serta rekabentuknya, teknik pensuisan SPWM, rekabentuk untuk litar penuras kuasa aktif tiga fasa, isyarat kawalan untuk pemicuan get pada litar penuras serta ciri-ciri dan kelebihan peranti kuasa (transistor) yang digunakan. Pada awal bahagian ini juga, kajian dijalankan terhadap masalah harmonik

serta punca-puncanya dan rekabentuk penuras kuasa aktif sebagai penyelesaian masalah ini. Seterusnya, projek diteruskan dengan merekabentuk litar penuras kuasa aktif . Simulasi litar dengan menggunakan perisian PSpice V9.1 serta keputusannya ditunjukkan pada bahagian ini. Litar akan direkabentuk dengan menggunakan perisian terlebih dahulu sebelum membangunkan prototaip. Ini bertujuan untuk mendapatkan jangkaan bagi voltan keluaran litar. Pelaksanaan yang terakhir dalam projek ini adalah pembangunan prototaip litar penuras kuasa aktif sambungan selari dengan kawalan SPWM. Bahagian ini terdiri daripada dua fasa iaitu pembangunan litar untuk pensuisan SPWM dan litar penuras kuasa aktif untuk aplikasi secara selari ke sistem talian tiga fasa. Analisa dijalankan ke atas setiap keputusan simulasi serta eksperimen yang diperoleh dan dibandingkan dengan keputusan teori.

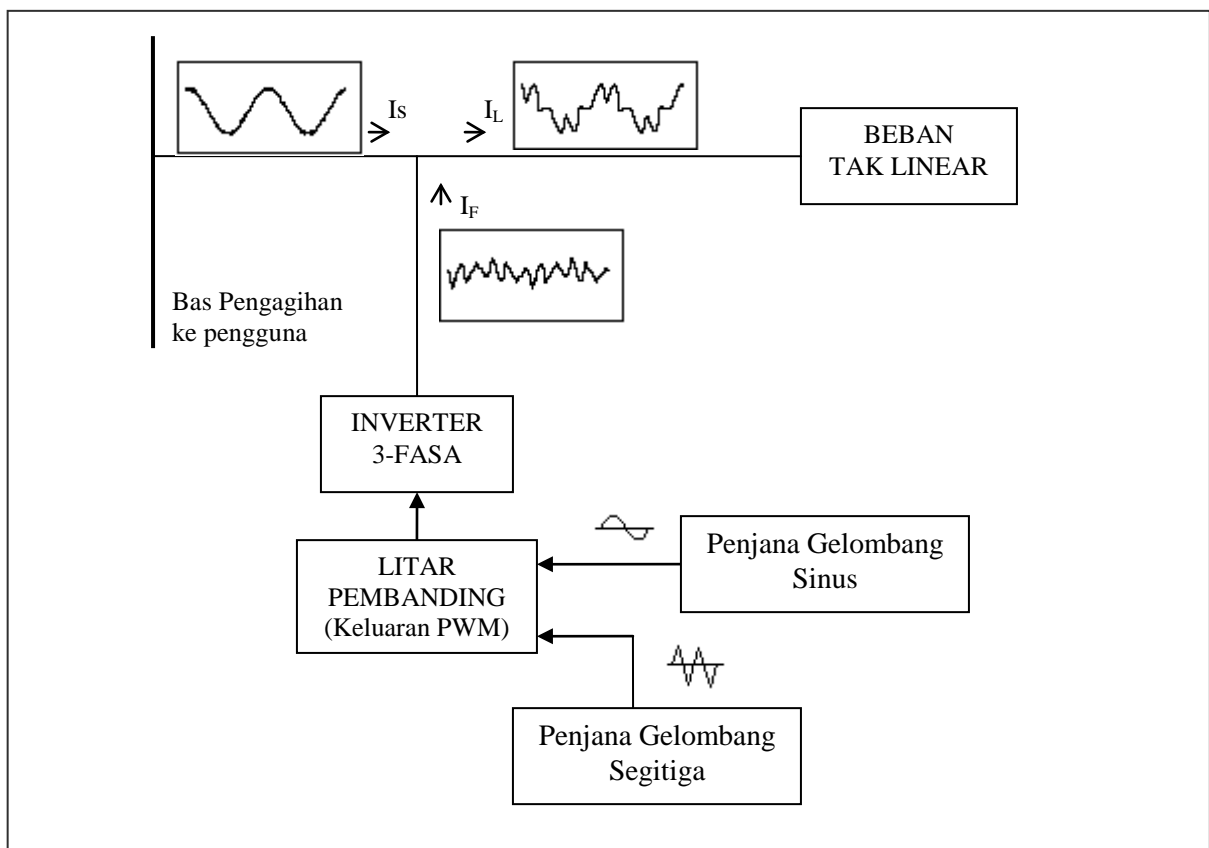
1.7 Kesimpulan

Objektif projek serta pengenalan awal mengenai topologi satu penuras kuasa aktif dengan aplikasi penyongsang SPWM telah dapat difahami. Penggunaan kawalan SPWM untuk pensuisan serta kawalan voltan pada penuras kuasa aktif adalah satu kaedah yang amat efektif. Hipotesis awal projek ini adalah masalah harmonik pada talian dapat dikurangkan dengan penggunaan penuras kuasa aktif sambungan selari.

KAJIAN ILMIAH

2.1 Pengenalan

Kajian secara teori perlu dijalankan terlebih dahulu sebelum proses seterusnya dapat dijalankan. Topologi penuras kuasa aktif yang dibangunkan ini adalah menggunakan penyongsang sumber voltan tiga-fasa dengan kawalan pensuisan pemodulatan lebar denyut sinus dan disambung secara selari ke talian penghantaran seperti dalam Rajah 2.1 [1,2].



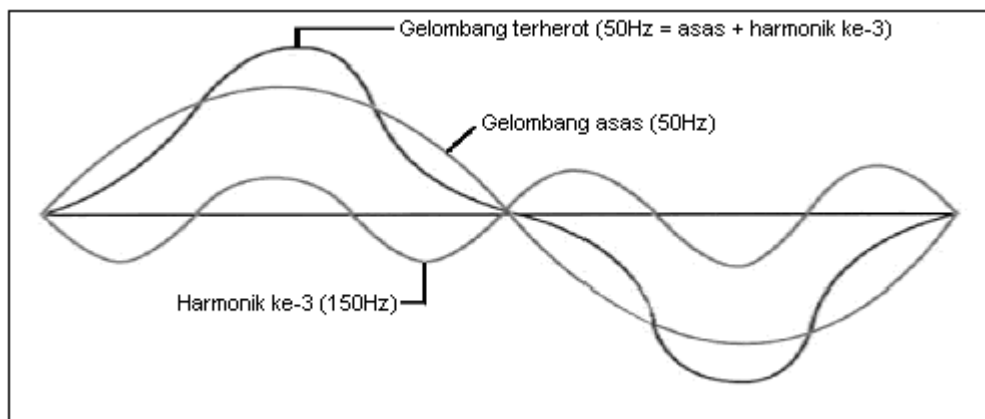
Rajah 2.1: Diagram menunjukkan komponen penuras kuasa aktif sambungan selari dan konsep pembatalan arus harmonik.

Rajah 2.1 menunjukkan konsep pembatalan arus harmonik agar arus pada talian adalah menghampiri sinusoidal seperti yang dibekalkan. Konfigurasi penuras ini adalah penuras kuasa aktif sambungan selari kerana disambung secara selari dengan beban pada sistem dan sesuai untuk mengurangkan herotan harmonik arus [2]. Kelebihan penuras kuasa aktif

sambungan selari berbanding penuras pasif adalah ia merupakan pengehad sendiri dari segi pembatalan harmonik. Oleh itu, kes beban lampau terhadap penuras disebabkan harmonik daripada sistem pembekal pengguna tidak perlu dibimbangkan [2].

2.2 Harmonik

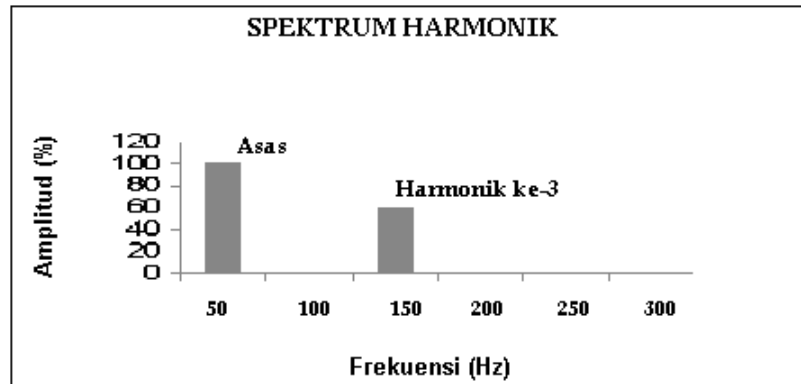
Harmonik adalah voltan atau arus sinus yang mempunyai frekuensi berganda daripada frekuensi operasi pembekal kuasa sistem iaitu frekuensi asas (biasanya 50 atau 60Hz) [3]. Oleh itu, bagi sistem kuasa dengan frekuensi asas f_0 , frekuensi harmonik ke- h adalah hf_0 . Harmonik adalah terdiri daripada harmonik genap dan harmonik ganjil. Namun dalam analisa, hanya harmonik ganjil diambil kira memandangkan harmonik genap tidak mempunyai komponen dc dan saling membatalkan. Berikutan peningkatan dalam penggunaan beban-beban tidak linear pada sistem kuasa, gelombang voltan dan arus mengalami herotan. Secara asasnya, voltan dan arus adalah berbentuk sinus yang sempurna. Herotan daripada bentuk sinus ini adalah merupakan harmonik [3]. Oleh itu, gelombang sinus adalah terbahagi kepada komponen frekuensi asas dan juga komponen frekuensi-frekuensi harmonik seperti ditunjukkan dalam Rajah 2.2 [1].



Rajah 2.2: Bentuk gelombang terherot yang terdiri daripada komponen asas dan harmonik ke-3.

Dengan ini, dapat dirumuskan bahawa gelombang voltan dan arus sinus yang tulen tidak mempunyai herotan dan harmonik manakala gelombang tidak sinus mempunyai herotan dan harmonik. Dalam domain frekuensi, suatu isyarat adalah digambarkan melalui spektrum harmonik yang lengkap dengan magnitud dan sudut fasa setiap komponen harmonik.

Gelombang yang sama ditunjukkan dalam bentuk domain frekuensi adalah ditunjukkan pada Rajah 2.3 di bawah [1].



Rajah 2.3: Spektrum harmonik bagi bentuk gelombang pada Rajah 2.

Harmonik dalam sistem kuasa merupakan isyarat yang tidak dikehendaki, di mana ia boleh menyebabkan lebih voltan dan pemanasan lampau pada sistem, gangguan pada sistem telekomunikasi, kegagalan fungsi pada geganti dan juga ralat dalam pengukuran peralatan [2]. Ini semua adalah kesan-kesan buruk harmonik daripada segi penggunaan. Kewujudan harmonik pada sistem kuasa akan menjejaskan faktor kuasa dan menyebabkan peningkatan kehilangan kuasa [1]. Arus harmonik akan menghasilkan voltan harmonik yang akan mempengaruhi kualiti kuasa sebenar pada sistem. Oleh itu, kesan-kesan harmonik akan mengurangkan faktor kuasa (pf) dan juga meningkatkan jumlah herotan harmonik (THD) [1].

2.3 Analisa harmonik

Antara analisa yang terlibat mengenai herotan yang berlaku akibat harmonik adalah menggunakan Siri Fourier untuk mendapatkan persamaan bagi gelombang yang terherot, analisa terhadap nilai rms arus yang terherot, menggunakan rumus Jumlah Herotan Harmonik (THD) untuk mendapatkan peratus herotan arus ataupun voltan yang berlaku serta analisa mengenai faktor kuasa yang terjejas disebabkan harmonik.

2.3.1 Siri Fourier

Jumlah gelombang-gelombang sinus adalah dirujuk sebagai siri Fourier, dinamakan sempena seorang ahli matematik yang hebat yang menjumpai konsep ini. Kelebihan menggunakan siri Fourier untuk mewakili gelombang-gelombang terherot adalah ia lebih mudah untuk mendapatkan sambutan sistem terhadap masukan sinus [3]. Sistem akan dianalisa secara berasingan bagi setiap harmonik. Seterusnya, keluaran bagi setiap frekuensi digabungkan untuk membentuk satu siri Fourier yang baru, di mana gelombang keluaran boleh dikira, jika diperlukan. Biasanya, hanya magnitud harmonik diambil perhatian [4]. Apabila kedua-dua bahagian positif dan negatif separuh kitaran gelombang mempunyai bentuk yang sama, siri Fourier hanya mengandungi harmonik ganjil. Ini memudahkan lagi kajian terhadap sistem kuasa memandangkan kebanyakan peralatan yang menghasilkan harmonik kelihatan sama sahaja bagi kedua-dua polariti [4]. Biasanya, harmonik dengan aturan yang lebih tinggi (melebihi had antara harmonik ke-20 sehingga ke-50) boleh diabaikan dalam analisa sistem kuasa kerana menghasilkan harmonik yang kecil sahaja. Walaupun harmonik tersebut boleh menyebabkan gangguan terhadap peranti-peranti elektronik kuasa, tetapi biasanya ia tidak menjejaskan sistem kuasa [1]. Sebarang gelombang berkala boleh diwakili oleh gelombang-gelombang sinus bersiri yang mempunyai frekuensi dengan gandaan frekuensi asas iaitu harmonik.

Jika $f(t)$ adalah satu gelombang berkala dengan frekuensi asas, ω_0 , perwakilan siri Fourier bagi $f(t)$ adalah seperti berikut [1]:

$$f(t) = a_0 + a_1 \cos \omega_0 t + a_2 \cos 2\omega_0 t + \dots + b_1 \sin \omega_0 t + b_2 \sin 2\omega_0 t + \dots \quad \dots(2.1)$$

$$= a_0 + a_n \cos(n\omega_0 t) + b_n \sin(n\omega_0 t) \quad \dots(2.2)$$

di mana;

$$a_0 = \frac{1}{T} \int_0^T f(t) dt \quad \text{(komponen dc)} \quad \dots(2.3)$$

$$a_n = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \cos n\omega_0 t dt \quad \dots(2.4)$$

$$b_n = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \sin n\omega_0 t dt \quad \dots(2.5)$$

Daripada Persamaan (2.3) sehingga Persamaan (2.5), didapati:

$$a_0 = \frac{1}{T} \left[\int_0^T 1 \cdot dt + \int_T^{2T} -1 \cdot dt \right] = 0 \quad \dots(2.6)$$

$$a_n = \frac{2}{T} \left[\int_0^T 1 \cdot \cos n\omega t \cdot dt + \int_T^{2T} -1 \cdot \cos n\omega t \cdot dt \right] = 0 \quad \dots(2.7)$$

$$b_n = \frac{2}{T} \left[\int_0^T 1 \cdot \sin n\omega t \cdot dt + \int_T^{2T} -1 \cdot \sin n\omega t \cdot dt \right] \quad \dots(2.8)$$

$$b_n = \frac{4}{n\pi} \quad \text{jika } n \text{ bernilai ganjil}$$

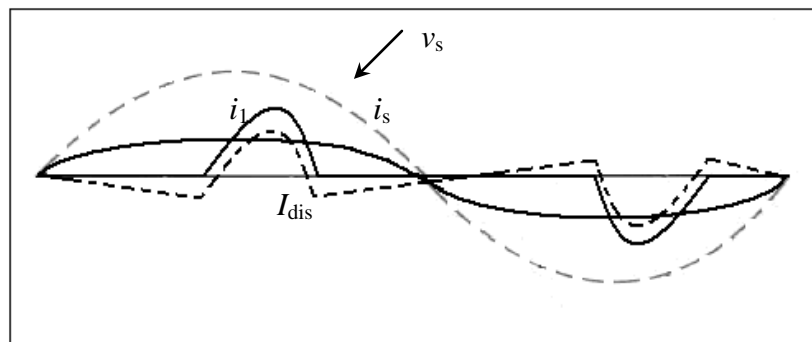
$$= 0 \quad \text{jika } n \text{ bernilai genap}$$

Oleh itu, $f(t)$ boleh diwakili sebagai persamaan berikut:

$$f(t) = \frac{4}{\pi} \left[\sin \omega t + \frac{1}{3} \sin 3\omega t + \frac{1}{5} \sin 5\omega t + \frac{1}{7} \sin 7\omega t + \dots \right] \quad \dots(2.9)$$

2.3.2 Herotan Arus pada Talian

Rajah 2.4 menunjukkan satu arus, i_s yang dihasilkan oleh penggunaan peralatan elektronik kuasa yang terherot daripada gelombang sinus [1].



Rajah 2.4: Herotan arus talian

Arus yang terherot ini boleh menyebabkan herotan pada voltan masukan. Namun, herotan pada voltan masukan adalah sangat kecil dan untuk memudahkan analisa, voltan masukan dianggap sinus tulen dengan frekuensi asas ($\omega_1 = \omega$ dan $f_1 = f$). Persamaan bagi voltan masukan adalah seperti berikut [1]:

$$v_s = \sqrt{2} V_s \sin \omega_1 t \quad \dots(2.10)$$

Arus masukan pada keadaan tetap adalah jumlah komponen Fourier (harmonik) dan ditunjukkan oleh persamaan (2.11) di mana i_s dianggap tidak mempunyai komponen dc.

$$i_s(t) = i_1(t) + \sum_{h \neq 1} i_h(t) \quad \dots(2.11)$$

Nilai rms, I_s bagi arus talian di atas boleh dikira dan hasilnya adalah berdasarkan Persamaan (2.12) berikut di mana $T_1 = 1/f_1 = 2\pi/\omega_1$.

$$I_s = \left(I_1^2 + \sum_{h \neq 1} I_h^2 \right)^{1/2} \quad \dots(2.12)$$

Jumlah herotan pada gelombang arus (di sini adalah arus masukan) boleh dihitung dengan menggunakan indeks jumlah herotan harmonik (THD) [3] seperti yang akan dinyatakan pada Bahagian 2.3.3. Komponen herotan pada arus, i_{dis} berdasarkan Persamaan (2.11) adalah ditunjukkan oleh Persamaan (2.12) berikut:

$$i_{dis}(t) = i_s(t) - i_1(t) = \sum_{h \neq 1} i_h(t) \quad \dots(2.13)$$

Dalam bentuk rms, persamaan untuk arus, i_{dis} adalah diberikan seperti berikut:

$$I_{dis} = \left[I_s^2 - I_1^2 \right]^{1/2} = \left(\sum_{h \neq 1} I_h^2 \right)^{1/2} \quad \dots(2.14)$$

2.3.3 Jumlah Herotan Harmonik (THD)

Jumlah herotan harmonik ataupun THD paling kerap digunakan untuk mengukur tahap kualiti kuasa. THD didefinisikan sebagai nisbah nilai rms jumlah komponen harmonik terhadap nilai rms komponen asas [4]. THD boleh dikira samada untuk voltan ataupun arus. Kebiasaannya, nilai THD diungkapkan dalam bentuk peratusan seperti berikut [4].

$$THD_v = \frac{\sqrt{\sum_{h \neq 1} (V_h^2)}}{V_1} \times 100 \quad \dots(2.15)$$

$$THD_i = \frac{\sqrt{\sum_{h \neq 1} (I_h^2)}}{I_1} \times 100 \quad \dots(2.16)$$

Nilai THD adalah sifar bagi gelombang sinus tulen. Ia akan meningkat secara tidak tetap dengan peningkatan herotan pada gelombang. Nilai THD sebanyak 5% ditetapkan bagi memastikan pengaruh harmonik terhadap sistem kuasa adalah rendah [4].

2.3.4 Faktor Kuasa (PF)

Faktor kuasa adalah didefinisikan sebagai nisbah kuasa nyata, P terhadap kuasa ketara, S. Kuasa nyata adalah kuasa sebenar yang digunakan pada litar elektrik dan unitnya adalah watt (W). Manakala kuasa ketara pula adalah hasil darab voltan dan arus pada litar dan unitnya adalah voltampere (VA) [4]. Secara ringkasnya, faktor kuasa boleh dinyatakan sebagai jumlah arus yang menyumbang kepada kuasa nyata pada beban. Faktor kuasa dengan nilai 1.00 menunjukkan bahawa 100% arus adalah menyumbang kepada kuasa pada beban dan dipanggil faktor kuasa sempurna. Ini bermakna tiada sebarang perbezaan antara kuasa nyata dan kuasa ketara [1]. Faktor kuasa dengan nilai 0 pula menunjukkan bahawa tiada sebarang arus menyumbang kepada kuasa pada beban [1]. Secara ideal, bangunan-bangunan industri mempunyai faktor kuasa 0.9 ke bawah. Dengan ini, faktor kuasa boleh digunakan untuk mengukur kecekapan kuasa dalam sistem. Faktor kuasa menjadi lebih kompleks dengan kewujudan kuasa harmonik dalam sistem elektrik.

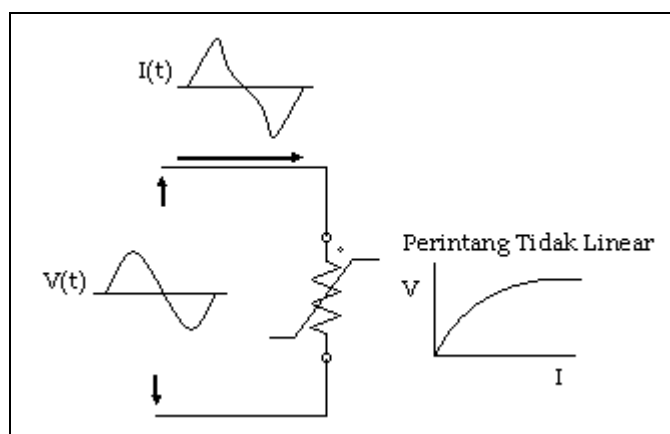
Nilai kuasa purata berdasarkan Rajah 2.4 adalah seperti berikut [1]:

$$\begin{aligned}
 P &= \frac{1}{T_1} \int_0^{T_1} p(t) dt = \frac{1}{T_1} \int_0^{T_1} v_s(t) i_s(t) dt \\
 &= \frac{1}{T_1} \int_0^{T_1} \sqrt{2} V_s \sin \omega t \cdot \sqrt{2} I_1 \sin(\omega t - \phi_1) dt \\
 P &= V_s I_1 \cos \phi_1
 \end{aligned}
 \tag{2.17}$$

2.4 Beban Tidak Linear

Penggunaan beban daripada peralatan-peralatan elektronik kuasa (beban tak linear) yang bertambah untuk meningkatkan kecekapan serta pengawalan sistem telah menyebabkan tahap herotan harmonik pada beban dan kesannya pada keseluruhan sistem kuasa semakin diambil perhatian [3]. Beban tidak linear menghasilkan arus yang tidak berkadaran terus

dengan kitaran voltan, contohnya komputer, televisyen, lampu kalimantang, rektifier, pembekal kuasa dengan mod suis, motor dan pemacu dengan kelajuan boleh ubah, mesin fotokopi dan mesin faks [4]. Rajah 2.5 di bawah menunjukkan konsep penggunaan satu perintang tidak linear ringkas yang mempunyai lengkungan voltan terhadap arus seperti dalam rajah dengan satu voltan masukan sinus. Walaupun voltan masukan adalah sinus yang sempurna, tetapi arus yang terhasil didapati mengalami herotan [4]. Peningkatan voltan sebanyak beberapa peratus boleh menyebabkan arus berganda dan menghasilkan bentuk gelombang yang berbeza. Ini adalah contoh sumber herotan harmonik dalam sistem kuasa.

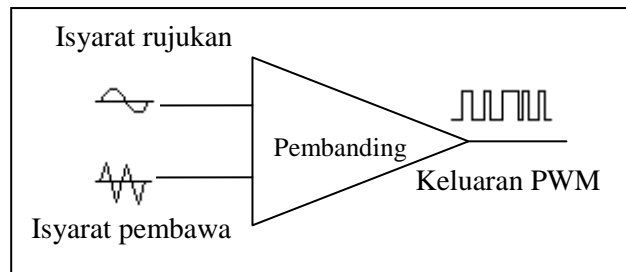


Rajah 2.5: Herotan arus disebabkan beban perintang tidak linear

Beban tidak linear menjanakan arus harmonik yang akan mengalir daripada beban ke sumber pembekal kuasa dengan mengikut laluan yang mempunyai impedans yang paling kecil. Arus harmonik ini akan bergabung dengan arus asas yang seterusnya akan menghasilkan gelombang arus tidak sinus [5]. Herotan harmonik disebabkan beban tak linear adalah masalah yang paling kompleks dalam sejarah industri elektrik kuasa. Contoh beban tidak linear dalam sistem kuasa adalah penggunaan rektifier diod titi yang diaplikasikan secara meluas dalam peralatan berkuasa tinggi kerana ia dapat menghasilkan keluaran dengan amplitud riak yang lebih rendah dan frekuensi riak yang lebih tinggi [7]. Selain itu, litar titi hanya memerlukan 3 sambungan wayar ke sumber ac. Namun, penggunaan rektifier ini menghasilkan arus yang terherot pada bekalan kuasa ac. Komponen harmonik ini akan memberikan kesan yang tidak diinginkan ke atas sistem ac ataupun menyebabkan gangguan terhadap peralatan-peralatan yang berdekatan dengannya.

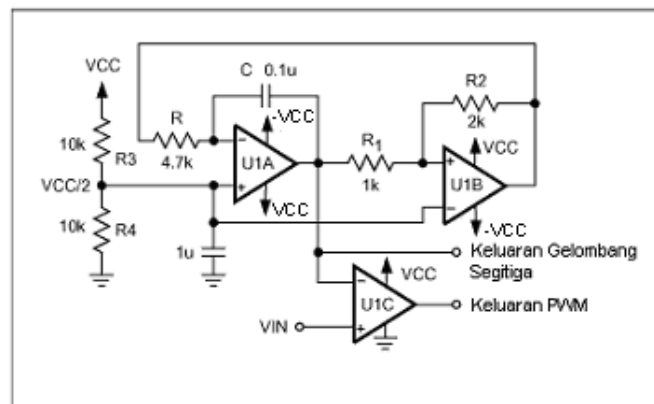
2.5 Kawalan Pensuisan PWM

Kawalan PWM boleh digunakan untuk pelbagai aplikasi termasuk pengaturan voltan, kawalan aras kuasa dan kawalan kelajuan kipas. Dalam projek ini, kawalan PWM digunakan bagi mengawal voltan serta kandungan harmonik pada keluaran penyongsang [9]. PWM adalah satu teknik yang mampu mengawal litar masukan dalam bentuk analog untuk menghasilkan isyarat keluaran dalam bentuk digital dan boleh diimplementasikan dalam litar penyongsang. Dua blok asas yang diperlukan untuk menghasilkan keluaran PWM adalah penjana gelombang segitiga dan pembanding seperti ditunjukkan dalam Rajah 2.6 [10].



Rajah 2.6: Blok asas untuk menghasilkan keluaran PWM.

Litar PWM boleh dilaksanakan dengan menggunakan 3 penguat kendalian. Penggunaan penguat kendalian membolehkan pelbagai aplikasi yang luas. Penguat kendalian berkuasa rendah boleh digunakan dalam sistem berkuasa rendah manakala penguat kendalian berfrekuensi tinggi boleh digunakan untuk PWM berfrekuensi tinggi [9]. Rajah 2.7 menunjukkan contoh litar untuk menjanakan keluaran gelombang segitiga serta litar pembanding untuk penjanaan keluaran PWM [11].



Rajah 2.7: Litar penjanaan gelombang segitiga dan PWM

Bagi menghasilkan keluaran gelombang segitiga, satu kombinasi litar pengamir (U1A) dan juga litar dwistabil (U1B). Litar pengamir adalah litar laluan rendah dengan frekuensi sudut pada dc. Ia menyebabkan pengecasan dan nyahcas kapasitor secara linear yang menghasilkan satu gelombang berbentuk segitiga [11]. Memandangkan litar pengamir adalah jenis menyongsang, maka ciri-ciri bagi litar dwistabil perlu disongsangkan. Oleh itu, litar dwistabil yang dikehendaki di sini adalah dari jenis tak menyongsang. Litar dwistabil adalah litar yang mempunyai 2 keadaan stabil. Litar tersebut boleh kekal dalam keadaan stabil samada secara tidak tetap ataupun berpindah ke keadaan stabil yang lain hanya apabila perlu dipicu [11]. Nilai frekuensi bagi gelombang segitiga akan ditentukan oleh R, C, R1 dan R2 seperti ditunjukkan oleh Persamaan (2.18). Nisbah R2 dan R1 mempengaruhi frekuensi operasi dan amplitud gelombang.

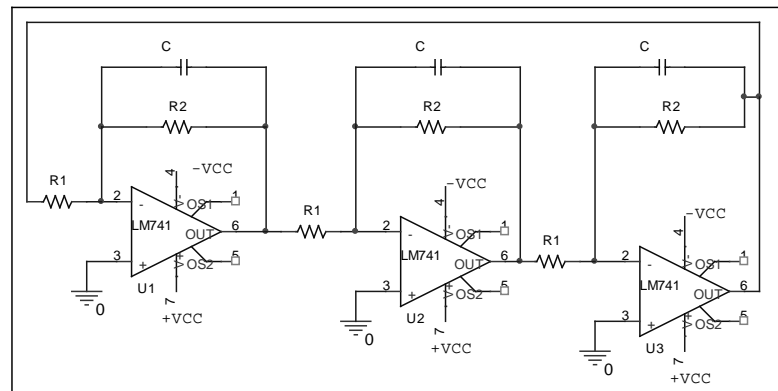
$$f = \frac{R_2}{4RCR_1} \quad \dots(2.18)$$

Seterusnya, litar pembanding (U1C) digunakan untuk menghasilkan modulasi di antara dua isyarat, iaitu isyarat pembawa segitiga dengan isyarat rujukan, Vin. Satu penguat kendalian boleh digunakan sebagai litar pembanding. Konsepnya adalah satu isyarat rujukan akan disambung pada masukan positif penguat (+) manakala isyarat pembawa akan disambung pada masukan negatif penguat (-). Konfigurasi litar yang ditunjukkan dalam Rajah 2.7 membenarkan PWM beroperasi pada satu unit bekalan kuasa [9].

Tujuan PWM adalah untuk mengawal amplitud voltan keluaran dan juga mengawal saiz satu atau lebih komponen harmonik pada keluaran. Oleh itu, implementasi yang mungkin adalah menggunakan bilangan denyut tertentu bagi setiap separuh kitar dan semua denyut mempunyai lebar yang sama [12]. Kaedah ini boleh mengurangkan amplitud keluaran namun kandungan harmonik masih kekal tinggi. Teknik ini hanya sesuai untuk mengurangkan amplitud voltan, maka ia perlu diubahsuai untuk penyesuaian bagi kawalan harmonik. Terdapat pelbagai teknik kawalan PWM yang boleh digunakan [5]. Antaranya ialah PWM tunggal, PWM berganda, PWM sinus dan juga PWM sinus ubahsuai. PWM Sinus dipilih untuk diaplikasikan dalam projek ini.

2.5.1 PWM Sinus (SPWM)

Kaedah PWM yang diubahsuai dengan mempelbagaikan lebar setiap denyut dalam satu kitar boleh menghasilkan voltan keluaran yang lebih baik [13]. Pensuisan SPWM mempunyai banyak kelebihan berbanding PWM tunggal dan PWM berganda atau seragam. Selain daripada mengekalkan lebar semua denyut seperti dalam kes PWM berganda, kelebaran setiap denyut boleh diubah-ubah mengikut amplitud gelombang sinus yang dikira pada tengah-tengah denyut yang sama [14]. Faktor herotan serta harmonik tertib rendah (LOH) juga akan dikurangkan dan teknik ini mempunyai kehilangan pensuisan yang rendah pada pensuisan berfrekuensi tinggi. Dalam teknik pensuisan pemodulatan lebar denyut bersinus (SPWM), denyut-denyut yang dihasilkan adalah sama seperti kaedah modulasi denyut berganda. Pensuisan tutup dan buka bagi isyarat SPWM boleh diperoleh dengan membandingkan satu gelombang sinus sebagai isyarat rujukan dengan satu gelombang segitiga berfrekuensi tinggi sebagai isyarat pembawa [10]. Kedua-dua kaedah analog dan digital boleh digunakan untuk menjana isyarat denyut yang dikehendaki. Rajah 2.8 menunjukkan satu litar pengayun anjakan-fasa yang terdiri daripada 3 litar pengamir kehilangan yang bersambung secara kaskad bagi menghasilkan keluaran berbentuk sinus [15].



Rajah 2.8: Litar pengayun anjakan-fasa

Fungsi pindah untuk setiap litar dalam Rajah 2.8 diberikan oleh persamaan berikut [15]:

$$T_1(s) = T_2(s) = T_3(s) = \frac{-1}{R_1 C \left(\frac{s+1}{R_2 C} \right)} \quad \dots(2.19)$$

Persamaan (2.19) akan memberikan gandaan litar sebagai:

$$G = \frac{-(R_2/R_1)^3}{(R_2C_s)^3 + 3(R_2C_s) + 3(R_2C_s)^2 + 1} \quad \dots(2.20)$$

Berdasarkan prinsip pengayun jujukan ke-3, didapati perhubungan antara R1 dan R2 adalah seperti berikut:

$$(R_2/R_1)^3 = 8$$

$$R_2 = 2R_1 \quad \dots(2.21)$$

Jika R1 = R dan R2 = 2R, maka rumus untuk frekuensi ayunan litar diberikan oleh Persamaan (2.22).

$$f_o = \frac{\sqrt{3}}{4\pi R_1 C} \quad \dots(2.22)$$

Litar ini menghasilkan keluaran dengan anjakan fasa sebanyak 120° bagi setiap litar dengan nilai frekuensi yang ditentukan. Jika V₁ dipilih sebagai voltan rujukan, maka:

$$V_1(t) = V_m \sin \omega_o t$$

.....(2.23)

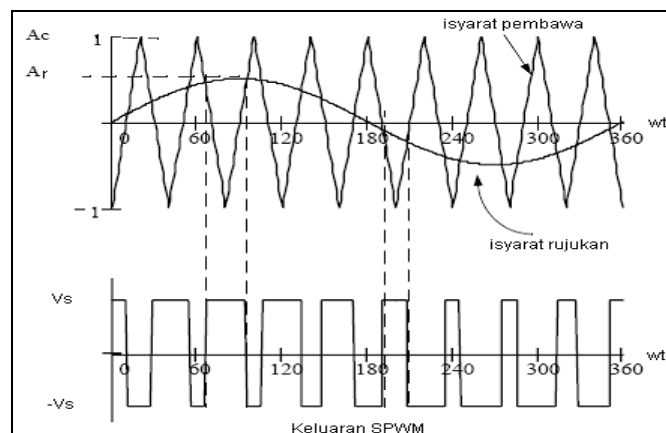
$$V_2(t) = V_m \sin (\omega_o t + 120^\circ)$$

.....(2.24)

$$V_3(t) = V_m \sin (\omega_o t - 120^\circ)$$

.....(2.25)

Rajah 2.9 menunjukkan perbandingan kedua-dua isyarat rujukan dan pembawa yang menghasilkan isyarat keluaran SPWM [10].



Rajah 2.9: Isyarat SPWM diperolehi dengan membandingkan gelombang sinus dan gelombang segitiga.

SPWM biasanya digunakan dalam aplikasi perindustrian. Frekuensi isyarat rujukan, f_r akan menentukan nilai frekuensi keluaran penyongsang, f_o manakala amplitud puncaknya, A_r akan mengawal indeks modulasi, M [5]. Dengan membandingkan isyarat pembawa segitiga satu-arah (separuh kitar positif dan separuh kitar negatif) dengan isyarat rujukan sinus, isyarat penggetan bagi penyongsang akan terhasil. Bilangan denyut bagi setiap separuh kitar yang terhasil akan ditentukan oleh frekuensi pembawa, f_c . Bergantung kepada isyarat voltan samada lebih besar ataupun lebih kecil daripada gelombang pembawa, voltan keluaran positif ataupun negatif boleh terhasil pada keluaran SPWM [10]. Berdasarkan Rajah 2.9, sepanjang tempoh bagi satu gelombang segitiga, voltan purata yang dibekalkan kepada beban adalah berkadar langsung dengan amplitud isyarat rujukan (dianggap tetap). Nilai rms gelombang voltan ac adalah tetap sama dengan voltan keluaran SPWM, maka ini menunjukkan bahawa jumlah herotan harmonik (THD) tidak akan dipengaruhi oleh proses PWM [14]. Komponen harmonik hanya dialih kepada kadar frekuensi yang lebih tinggi dan akan ditapis secara automatik dengan adanya induktans dalam sistem ac. Apabila isyarat rujukan adalah sinus dengan amplitud, A_r dan amplitud isyarat pembawa segitiga adalah A_c , nisbah kedua-duanya adalah indeks modulasi dan ditunjukkan oleh Persamaan (2.26) berikut [14]:

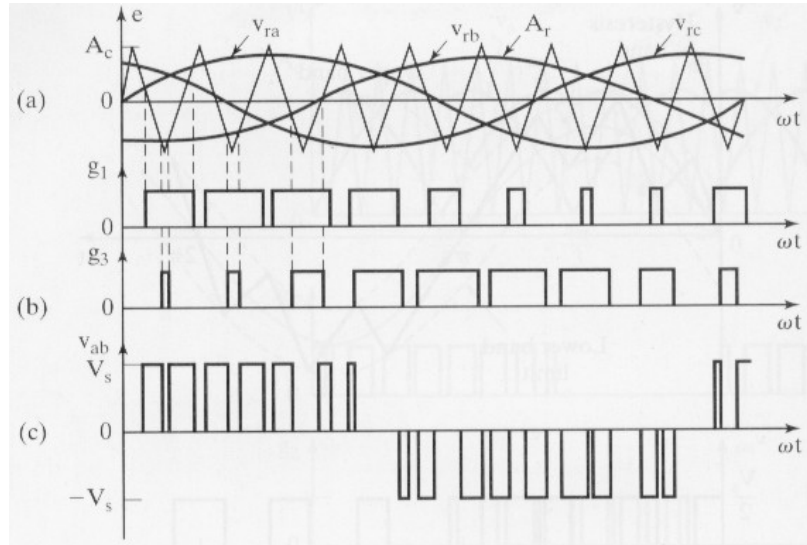
$$m = \frac{A_r}{A_c} \quad \dots(2.26)$$

Dengan mengawal indeks modulasi, amplitud voltan keluaran juga boleh dikawal. Nilai frekuensi pembawa, f_c yang cukup tinggi akan menghasilkan bilangan pensuisan dalam satu kitar yang lebih besar dan ini akan meningkatkan kehilangan kuasa. Oleh itu, nilai frekuensi pensuisan dalam kadar 2-15 kHz adalah dikira cukup sesuai bagi aplikasi sistem kuasa [9].

2.5.2 SPWM Tiga-Fasa

Dalam sistem tiga-fasa, nisbah $f_c / f_r = 3k$ perlu diambil kira supaya ketiga-tiga gelombang adalah simetri [2]. Kaedah kawalan SPWM ini memerlukan voltan tiga-fasa yang seimbang dan mesti diatur supaya tiada harmonik genap yang wujud. Oleh itu, syarat-syarat yang

mesti dipenuhi adalah bilangan denyut yang terhasil bagi separuh kitar mestilah bernilai ganjil dan boleh dibahagi tiga [13]. Rajah 2.10 menunjukkan SPWM bagi penyongsang tiga-fasa dengan isyarat rujukan sinus tiga-fasa seimbang, masing-masing berbeza fasa sebanyak 120° [5].



Rajah 2.10: Kawalan SPWM untuk penyongsang tiga fasa. (a) Isyarat rujukan sinus dan pembawa segitiga yang dibandingkan. (b) Isyarat penggetan bagi g_1 dan g_3 yang terhasil. (c) Voltan keluaran pada penyongsang

Teknik kawalan SPWM boleh diaplikasikan terhadap penyongsang tiga fasa. Terdapat tiga gelombang rujukan sinus (V_{ra} , V_{rb} dan V_{rc}), di mana setiap satunya berbeza sebanyak 120° . Satu gelombang pembawa dibandingkan dengan isyarat rujukan bagi setiap fasa untuk menghasilkan isyarat penggetan untuk fasa-fasa tertentu [5].

Amplitud nisbah modulasi (m_a) ditunjukkan oleh Persamaan (2.27) seperti berikut [16]:

$$\therefore m_a = \frac{\text{amplitud puncak } v_r}{\text{amplitud } vc} = \frac{\text{nilai puncak } (V_{A0})_1}{V_{dc} / 2}, \quad \dots(2.27)$$

di mana, $(V_{A0})_1$: komponen frekuensi asas V_{A0}

Manakala nisbah modulasi frekuensi (m_f) pula ditunjukkan oleh Persamaan (2.28) berikut:

$$m_f = \frac{f_s}{f_1} \quad \dots(2.28)$$

di mana,

f_s = frekuensi PWM dan f_1 = frekuensi asas

m_f perlu bernilai integer ganjil kerana sekiranya ia bukan nombor integer, kemungkinan wujudnya subharmonik pada voltan keluaran manakala sekiranya ia tidak bernilai ganjil, komponen dc dan harmonik genap boleh terhasil pada voltan keluaran. Selain itu, m_f juga perlu bernilai gandaan tiga bagi penyongsang PWM tiga fasa supaya harmonik gandaan tiga yang bernilai ganjil dan juga harmonik genap dapat dihapuskan [16].

Pensuisan unikutub dan dwikutub merupakan dua kaedah pensuisan SPWM yang sesuai diaplikasikan. Kedua-dua kaedah ini membandingkan isyarat rujukan dan isyarat pembawa [7]. Bagi pensuisan dwikutub, keluaran ialah samada +Vdc ataupun -Vdc, bergantung kepada isyarat rujukan samada lebih besar atau lebih kecil daripada isyarat pembawa. Bagi pensuisan unikutub pula, keluaran yang dihasilkan hanya mempunyai nilai antara sifar ke positif sahaja ataupun dari negatif ke sifar [7]. Projek ini mengaplikasikan kaedah dwikutub bagi litar pembeding isyarat pembawa dan isyarat rujukan manakala kaedah unikutub bagi isyarat pensuisan SPWM pada MOSFET.

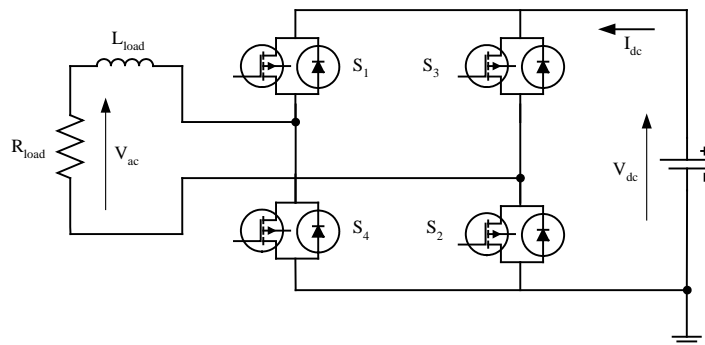
2.6 Litar Penuras Kuasa Aktif

Konsep asas penuras kuasa aktif adalah menggunakan kaedah pensuisan elektronik kuasa untuk menjana isyarat voltan atau arus yang mempunyai magnitud yang sama dengan voltan dan arus harmonik tetapi dalam polariti yang berbeza supaya ia dapat membatalkan arus atau voltan harmonik yang mengalir dalam litar [2]. Oleh itu, aplikasi litar penyongsang yang boleh mengawal harmonik adalah sesuai digunakan. Ia dapat menghasilkan arus atau voltan yang boleh berubah mengikut tahap harmonik yang disebabkan oleh beban tidak linear [8]. Penyongsang dikenali sebagai pengubah dari arus terus (dc) ke arus ulang alik (ac) dan berfungsi untuk menukar suatu masukan dc kepada keluaran ac yang simetri mengikut magnitud voltan dan frekuensi yang dikehendaki [5].

2.6.1 Penyongsang Sumber Voltan Kawalan PWM

Penyongsang dengan masukan voltan yang tetap dipanggil penyongsang sumber voltan. Penyongsang sumber voltan adalah bahagian yang paling penting dalam konfigurasi penuras kuasa aktif. Secara umumnya, litar penyongsang menggunakan kawalan isyarat

PWM untuk menghasilkan satu keluaran voltan ac. Pensuisan penyongsang sumber voltan boleh ditutup dan dibuka seperti yang dikehendaki [9]. Secara asasnya, apabila setiap transistor dihidupkan hanya sekali dalam setiap kitar, satu gelombang segiempat akan terhasil. Namun sekiranya ia dipicu beberapa kali dalam satu kitar, satu gelombang keluaran dengan kawalan harmonik yang lebih baik akan terhasil [10]. Oleh itu, penggunaan penyongsang sumber voltan dengan kawalan PWM memungkinkan pengawalan harmonik pada litar. Rajah 2.11 menunjukkan litar asas satu penyongsang sumber voltan [17].



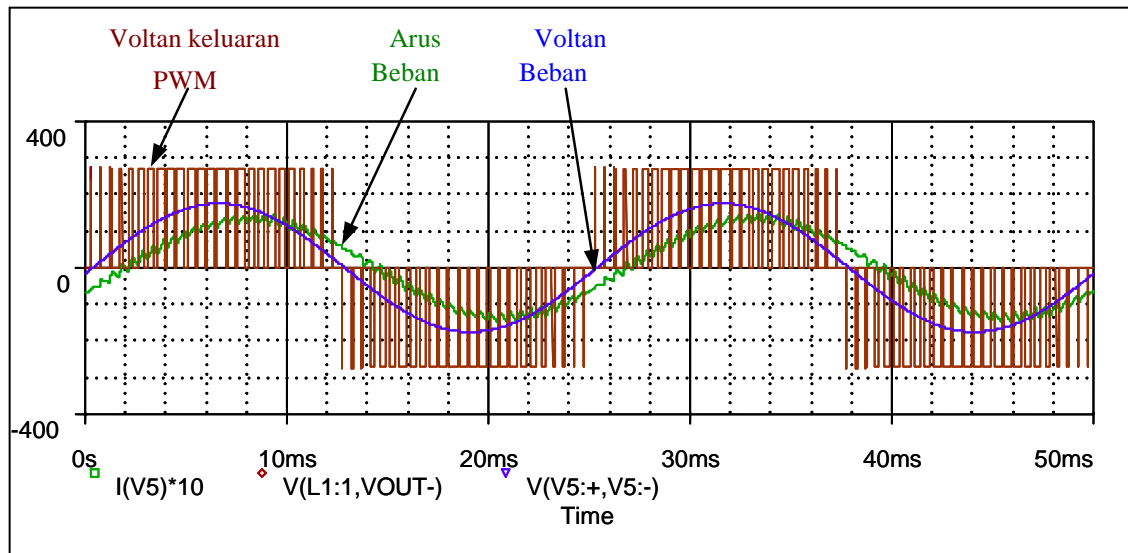
Rajah 2.11: Penyongsang sumber voltan satu fasa

Litar penyongsang terdiri daripada satu pengubah titi dengan pensuisan MOSFET yang setiapnya disambung secara selari dengan diod suapbalik. Diod tersebut akan membenarkan pengaliran arus dalam arah berlawanan apabila suis dibuka. Diod-diod meroda bebas ini menghalang gangguan arus induktif dan ini akan memberikan perlindungan kepada litar daripada voltan lampau fana yang boleh mengakibatkan keruntuhan balikan pada suis IGBT dan MOSFET [17]. Prinsip operasi bagi satu litar penyongsang satu fasa adalah seperti berikut:

- Pada separuh kitar positif, S1 dan S2 beroperasi apabila menerima jujukan denyut berfrekuensi tinggi daripada keluaran PWM.
- Pada separuh kitar negatif pula, S3 dan S4 akan beroperasi.

Beban induktans akan menyatukan jujukan denyut yang dijana dan seterusnya menghasilkan voltan sinus (V_{ac}) dan gelombang arus pada beban seperti ditunjukkan dalam Rajah 2.12 [17]. Lebar setiap denyut adalah berubah-ubah mengikut amplitud gelombang sinus. Setiap transistor dalam litar penyongsang adalah dikawal oleh denyut-denyut yang

dikenakan pada get. Oleh itu, isyarat get akan mengandungi beberapa denyut yang dibahagikan sepanjang setiap separuh kitar operasi [17].



Rajah 2.12: Isyarat masukan denyut get dan keluaran voltan ac dan arus satu penyongsang PWM.

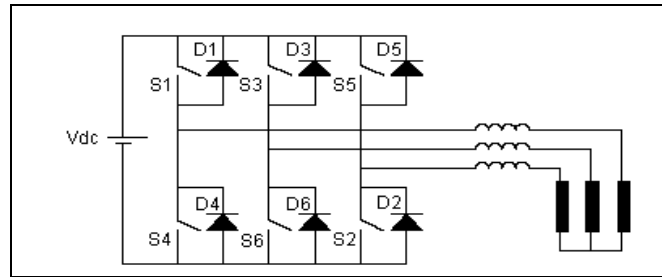
Amplitud komponen asas voltan ac adalah ditunjukkan oleh persamaan berikut [17]:-

$$V_{ac} = \frac{V_{rujukan}}{V_{pembawa}} V_{dc} = m V_{dc} \quad \dots(2.29)$$

Indeks modulasi adalah nisbah voltan ac puncak-ke-puncak ($2V_{ac}$) terhadap voltan dc.

2.6.2 Penyongsang Sumber Voltan Tiga Fasa

Penyongsang tiga fasa boleh dianggap terdiri daripada tiga penyongsang satu fasa dan keluaran setiap penyongsang satu fasa adalah dianjak sebanyak 120° antara satu sama lain [9]. Penyongsang tiga fasa biasanya digunakan untuk aplikasi berkuasa tinggi. Rajah 2.13 menunjukkan penyongsang titi gelombang penuh tiga-fasa yang menggunakan enam MOSFET kuasa, masing-masing dua pada setiap kaki penyongsang [7].

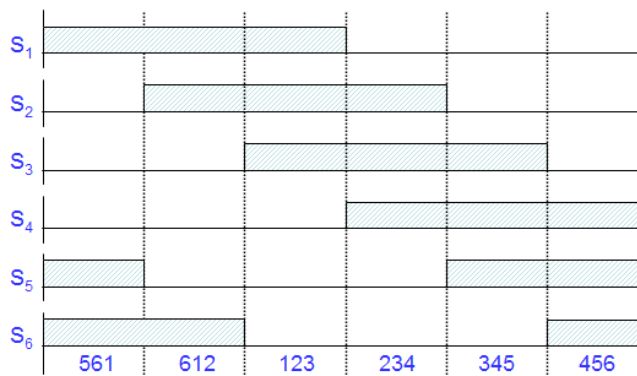


Rajah 2.13: Penyongsang sumber voltan tiga fasa

Satu penghubung dc-neutral boleh dibina pada penyongsang dengan membahagikan 2 kapasitor dc yang sama antara kutub-kutub positif dan negatif penyongsang. Rekabentuk ini digabungkan dengan kawalan-kawalan pensuisan MOSFET kuasa yang berasingan dan membolehkan penuras menyeimbangkan beban-beban yang tidak seimbang ataupun beban-beban satu fasa [7]. Gelombang arus yang dikehendaki boleh diperolehi dengan mengawal pensuisan MOSFET pada penyongsang secara tepat.

2.6.3 Isyarat Kawalan Penyongsang Sumber Voltan Tiga Fasa

Dua jenis isyarat kawalan boleh dikenakan terhadap pensuisan peranti kuasa iaitu pengaliran 180° ataupun pengaliran 120° . Pengaliran 180° menghasilkan pensuisan litar yang lebih baik dan keluaran yang menghampiri sinusoidal [5]. Dengan kaedah ini, setiap transistor akan beroperasi sepanjang 180° seperti ditunjukkan pada Rajah 2.13 [18].

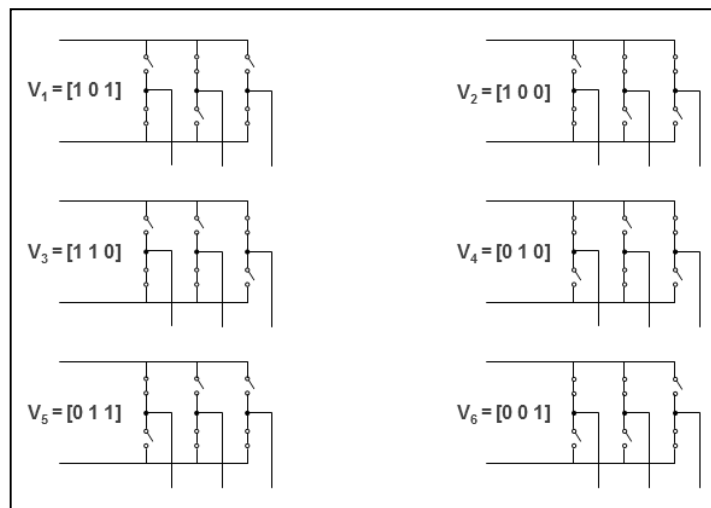


Rajah 2.13: Bentuk gelombang keluaran dan picuan transistor.

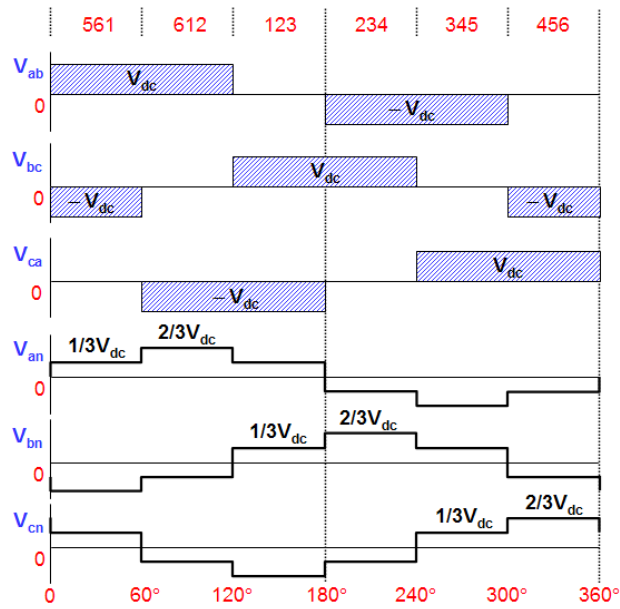
Terdapat enam mod operasi dalam satu kitar dan tempoh setiap mod adalah 60° . Jujukan mod pensuisan pada get adalah seperti berikut:-

561 (V1) → 612 (V2) → 123 (V3) → 234 (V4) → 345 (V5) → 456 (V6) → 561 (V1)

di mana, 561 menunjukkan S5, S6 dan S1 beroperasi. Isyarat penggetan seperti yang ditunjukkan dalam Rajah 2.13 adalah dianjak daripada satu sama lain sebanyak 60° untuk mendapatkan voltan (asas) tiga fasa yang seimbang. Beban boleh disambung samada dalam secara Y ataupun Δ (delta) [18]. Transistor pada mana-mana kaki penyongsang (S1 dan S4, S3 dan S6, atau S5 dan S2) tidak boleh dipicu secara serentak kerana ini boleh menyebabkan litar pintas merentasi talian dc bekalan voltan [5]. Rajah 2.14 dan Rajah 2.15 masing-masing menunjukkan perwakilan setara litar pensuisan untuk mod V1 hingga V6 dan bentuk gelombang keluaran yang terhasil bagi voltan talian dan juga voltan fasa untuk satu penyongsang sumber voltan tiga fasa [18].



Rajah 2.14: Perwakilan setara mod operasi penyongsang untuk satu kitar penuh.



Rajah 2.15: Bentuk gelombang keluaran voltan talian serta voltan fasa penyongsang sumber voltan tiga fasa.

Bagi beban dengan sambungan delta, nilai bagi arus-arus fasa boleh diperolehi secara terus daripada voltan talian. Namun bagi beban dengan sambungan-Y, voltan talian-ke-neutral ataupun voltan fasa perlu diketahui terlebih dahulu untuk mendapatkan arus-arus fasa atau talian. Persamaan bagi setiap voltan talian ketika dengan komponen asas serta harmonik bagi beban sambungan-Y adalah diberikan seperti berikut [5]:

$$v_{ab} = \sum_{n=1,3,5,\dots}^{\infty} \frac{4V_s}{n\pi} \sin \frac{n\pi}{3} \sin n \left(\omega t + \frac{\pi}{6} \right) \quad \dots(2.30)$$

$$v_{bc} = \sum_{n=1,3,5,\dots}^{\infty} \frac{4V_s}{n\pi} \sin \frac{n\pi}{3} \sin n \left(\omega t - \frac{\pi}{2} \right) \quad \dots(2.31)$$

$$v_{ca} = \sum_{n=1,3,5,\dots}^{\infty} \frac{4V_s}{n\pi} \sin \frac{n\pi}{3} \sin n \left(\omega t - \frac{7\pi}{6} \right) \quad \dots(2.32)$$

Didapati daripada Persamaan (2.30) sehingga Persamaan (2.32), harmonik-harmonik triplen ($n = 3, 9, 15, \dots$) adalah sifar bagi voltan talian.