

**ANALISA DAN REKABENTUK PENSUISAN PEMODULATAN LEBAR  
DENYUT (PWM) DENGAN MENGGUNAKAN TEKNIK PENSUISAN  
LEMBUT UNTUK APLIKASI PENURAS KUASA AKTIF**

**Oleh**

**Mohd Faizal Bin Mohd Zaini**

**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 2005**

## ABSTRACT

This final year project, which is entitled “Analysis and Design of Pulse Width Modulation (PWM) by Using Soft Switching Technique for the Application of Active Power Filter”, is intended for analyzing and designing of PWM circuit by using the soft switching technique for the use of power device switching in active power filter. This switching technique can be used for power device switching in performing the process of turn-on and turn-off on a fixed time, whether at zero current or at zero voltage. Hence, power device switching can be performed without any constraint or all of a sudden. This is the product of zero current switching and zero voltage switching, which causes current to be in the same phase with the source voltage. PWM technique that has been chosen is sinusoidal pulse width modulation (SPWM). Soft switching technique has been implemented in order to overcome problems on energy losses of power devices during high-frequency switching and on reducing the electromagnetic interference (EMI). Power device that has been used as components in the inverter circuit is insulated gate bipolar transistor (IGBT). In order to achieve this project objective, literature reviews have been done on PWM techniques, on soft switching techniques, and on inverter that used IGBT. Then, inverter circuit with PWM soft switching is designed by using SIMCAD V4.1 and PSPICE V9.2. The software simulation for the circuit is compared with theory to verify the circuit. Prototype has been developed after confirming the software simulation results. From the final results, it is found that PWM switching with the soft switching technique can be used to reduce losses and subsequently, to decrease the distortion and harmonic at the output.

## ABSTRAK

Projek tahun akhir ini yang bertajuk “Analisis Dan Rekabentuk Pensuisan Lebar Denyut Termodulat (PWM) Dengan Menggunakan Teknik Pensuisan Lembut Untuk Aplikasi Penuras Kuasa Aktif”, bertujuan untuk menganalisa dan merekabentuk litar pensuisan lebar denyut termodulat (PWM). Selain itu, projek ini juga bertujuan untuk mengaplikasikan teknik pensuisan lembut pada litar pensuisan PWM bagi kegunaan pensuisan peranti kuasa dalam penuras kuasa aktif. Pensuisan ini dapat digunakan untuk pensuisan peranti kuasa bagi melakukan proses buka dan tutup pada masa yang ditetapkan iaitu pada arus sifar ataupun pada voltan sifar. Dengan ini pensuisan peranti kuasa tidak dilakukan secara paksa ataupun tiba-tiba. Ini adalah hasil daripada pensuisan arus sifar dan pensuisan voltan sifar yang menyebabkan arus sefasa dengan voltan sumber. Teknik lebar denyut termodulat yang dipilih ialah lebar denyut termodulat bentuk sinus (SPWM). Manakala teknik pensuisan lembut diaplikasikan untuk mengatasi masalah kehilangan tenaga peranti kuasa semasa pensuisan yang berfrekuensi tinggi dan mengurangkan gangguan elektromagnetik (EMI). Peranti kuasa yang digunakan sebagai komponen dalam litar penyongsang, adalah transistor dwikutub get tertebat (IGBT-Insulated Gate Bipolar Transistor). Untuk mencapai objektif projek ini, kajian ilmiah tentang pemodulatan lebar denyut, teknik pensuisan lembut iaitu konfigurasi pensuisan voltan sifar dan penyongsang menggunakan transistor dwikutub get tertebat dilakukan. Kemudian rekabentuk litar penyongsang dengan masukan get isyarat SPWM dan pendekatan teknik pensuisan lembut dibina menggunakan perisian SIMCAD V4.1 dan PSPICE V9.2. Perbandingan dengan teori dilakukan untuk mengesahkan litar yang telah dibina. Rekabentuk prototaip dilaksanakan selepas simulasi litar diperolehi. Daripada keputusan akhir, didapati kesan daripada pensuisan lembut penyongsang dengan masukan get isyarat pemodulatan lebar denyut dapat mengurangkan kehilangan dan seterusnya mengurangkan herotan dan harmonik pada keluaran.

## PENGHARGAAN

Alhamdulillah syukur ke hadrat Illahi atas limpah dan kurnianya dapatlah saya menyiapkan projek tahun akhir ini.

Pertama sekali, saya ingin menyampaikan setinggi-tinggi penghargaan kepada pihak Universiti Sains Malaysia kerana menjadikan projek tahun akhir sebagai satu keperluan pengijazahan kepada para mahasiswa dan mahasiswi. Secara tidak langsung, ini mendedahkan kami kepada dunia dan cabaran sebenar dalam bidang pembangunan projek-projek kejuruteraan. Kemahiran dan pengalaman dapat pelajari pada masa hadapan kami di bidang industri, namun pendedahan awal adalah yang paling penting.

Seterusnya, saya ingin menyampaikan jutaan terima kasih kepada penyelia saya Prof. Madya Dr. Che Mat Hadzer Bin Mahmud yang banyak membantu dalam membangunkan projek ini.

Tidak lupa juga ribuan penghargaan buat Encik Izhar Bin Abu Bakar, selaku pembantu penyelia projek tahun akhir ini, yang telah banyak menyumbangkan idea dan tunjuk ajar yang amat berguna bagi pembangunan projek tahun akhir ini. Projek tahun akhir ini tidak dapat dilakukan tanpa tunjuk ajar dan panduan dari beliau. Segala dorongan, tunjuk ajar serta buah fikiran yang diberikan telah banyak membantu dalam menjayakan projek ini.

Sekalung penghargaan juga tidak dilupakan buat kedua-dua ibu-bapa saya, Mohd. Zaini Bin Basir dan Zainon Binti Othman. Segala sokongan dan kasih sayang mereka yang tidak berbelah bagi telah memberikan semangat kepada saya untuk terus berjuang bagi menjayakan projek tahun akhir ini.

Akhir sekali, saya ingin mengucapkan ribuan terima kasih kepada semua pihak yang terlibat dan telah memberikan sumbangan dalam pembangunan projek tahun akhir ini, sama ada secara langsung atau tidak langsung.

Terima kasih.

Mohd. Faizal bin Mohd. Zaini

28 Februari 2005.

## ISI KANDUNGAN

	Muka Surat
ABSTRACT	ii
ABSTRAK	iii
PENGHARGAAN	iv
ISI KANDUNGAN	v-vi
SENARAI GAMBARAJAH	vii-ix
SENARAI JADUAL	ix
PRAKATA	x
<b>BAB 1 PENDAHULUAN</b>	
1.1 Pengenalan	2
1.2 Objektif Projek	2
1.3 Pensuisan Peranti Kuasa	3
1.4 Pemodulatan Lebar Denyut (PWM)	3
1.5 Teknik Pensuisan Lembut	4
1.6 Penyongsang PWM	4
1.7 Metodologi	5
1.8 Kesimpulan	5
<b>BAB 2 KAJIAN ILMIAH</b>	
2.1 Pengenalan	6
2.2 Pensuisan PWM	6
2.3 Teknik Pensuisan Lembut	13
2.4 IGBT	17
2.5 Penyongsang	19
2.6 Penyongsang PWM	20
2.7 Kesimpulan	22

### **BAB 3 SIMULASI LITAR PENSUISAN SPWM DAN**

#### **PENYONGSANG DENGAN PENSUISAN LEMBUT**

3.1 Pengenalan	23
3.2 Rekabentuk Litar Pensuisan SPWM	23
3.3 Rekabentuk Penyongsang SPWM dengan Pensuisan Lembang	28
3.4 Analisa Output	40
3.5 Kesimpulan	42

### **BAB 4 PEMBANGUNAN PROTOTAIP**

4.1 Pengenalan	43
4.2 Senarai Komponen	43
4.3 Pembangunan Prototaip	44
4.4 Keputusan Eksperimen	46
4.6 Kesimpulan	48

### **BAB 5 KESIMPULAN**

49

### **RUJUKAN**

**LAMPIRAN A : CARTA GANTT PERJALANAN PROJEK**

**LAMPIRAN B : GAMBARAJAH BLOK REKABENTUK LITAR**

**LAMPIRAN C : HELAIAN DATA IGBT MODEL IRG4PF50WD**

**LAMPIRAN D : HELAIAN DATA OP-AMP MODEL LM741**

## SENARAI GAMBARAJAH

#	Tajuk Gambarajah	Mukasurat
1	Rajah 2.1 : Penjanaan PWM tunggal.	7
2	Rajah 2.2 : Isyarat ke get dan voltan keluaran.	7
3	Rajah 2.3 : Penjanaan PWM berganda.	8
4	Rajah 2.4 : PWM berganda.	8
5	Rajah 2.5 : Penjanaan PWM bentuk sinus.	9
6	Rajah 2.6 : Isyarat SPWM.	9
7	Rajah 2.7 : Gambarajah blok penjanaan SPWM	10
8	Rajah 2.8 : Penjanaan keluaran gelombang segiempat.	11
9	Rajah 2.9 : Penjanaan keluaran gelombang segitiga.	11
10	Rajah 2.10 : Penjanaan isyarat SPWM	12
11	Rajah 2.11 : Penyongsang isyarat SPWM.	12
12	Rajah 2.12 : Perbandingan penggunaan teknik pensuisan dalam litar PWM.	14
13	Rajah 2.13 : Perlaksanaan ZVS pada IGBT.	15
14	Rajah 2.14 : Pensuisan IGBT pada ZCS.	15
15	Rajah 2.15 : Perlaksanaan ZCS pada IGBT.	16
16	Rajah 2.16 : Pensuisan IGBT pada ZCS.	16
17	Rajah 2.17 : Gambarajah blok penyongsang resonan pensuisan voltan sifar.	17
18	Rajah 2.18 : Struktur binaan IGBT.	18
19	Rajah 2.19 : Simbol IGBT.	18
20	Rajah 2.20 : Penyongsang.	19
21	Rajah 2.21 : Gelombang keluaran penyongsang.	19
22	Rajah 2.22 : Penyongsang kutub resonan untuk sebahagian fasa.	20
23	Rajah 2.23 : Keluaran penyongsang kutub resonan untuk sebahagian fasa.	20
24	Rajah 2.24 : Litar penyongsang rangkaian DC resonan.	21
25	Rajah 2.25 : Keluaran penyongsang rangkaian DC resonan.	21
26	Rajah 3.1 : Litar penjanaan gelombang segitiga.	23
27	Rajah 3.2 : Keluaran gelombang segiempat	24

28	Rajah 3.3 : Keluaran gelombang segitiga	24
29	Rajah 3.4 : Litar penjanaan SPWM.	25
30	Rajah 3.5 : Perbandingan isyarat pembawa dan isyarat rujukan.	25
31	Rajah 3.6 : Keluaran SPWM.	26
32	Rajah 3.7 : Penjana SPWM dengan pemulih DC.	26
33	Rajah 3.8 : Gelombang keluaran.	27
34	Rajah 3.9 : Litar SPWM dengan dua keluaran berbeza fasa sebanyak 180°.	27
35	Rajah 3.10 : Keluaran SPWM 0°-180° dan keluaran SPWM 180°-360°.	28
36	Rajah 3.11 : Litar penyongsang sefasa titian separa.	28
37	Rajah 3.12 : Keluaran penyongsang titian separa.	29
38	Rajah 3.13 : Litar penyongsang sefasa titian penuh.	29
39	Rajah 3.14 : Keluaran penyongsang titian penuh.	30
40	Rajah 3.15 : Litar Penyongsang dengan komponen L dan C.	30
41	Rajah 3.16 : Gelombang keluaran berbentuk sinus.	31
42	Rajah 3.17 : Litar penyongsang SPWM tanpa pensuisan lembut.	32
43	Rajah 3.18 : Voltan pengumpul-pemancar $V_{ce}$ .	32
44	Rajah 3.19 : Voltan beban, $V_o$ .	33
45	Rajah 3.20 : Arus yang melalui beban, $I_o$ .	33
46	Rajah 3.21 : Litar Penyongsang SPWM dengan pensuisan lembut.	34
47	Rajah 3.22 : Voltan pengumpul-pemancar, $V_{CE}$ .	34
48	Rajah 3.23 : Voltan beban, $V_o$ .	34
49	Rajah 3.24 : Arus melalui beban, $I_R$ .	35
50	Rajah 3.25 : Litar penyongsang SPWM dengan pensuisan voltan sifar.	36
51	Rajah 3.26 : Voltan pengumpul-pemancar, $V_{CE}$ untuk setiap IGBT.	36
52	Rajah 3.27 : Voltan beban, $V_o$ .	36
53	Rajah 3.28 : Arus yang melalui beban, $V_o$ .	37
54	Rajah 3.29 : Pensuisan Get IGBT 1.	37
55	Rajah 3.30 : Voltan pengumpul- pemancar, $V_{CE1}$ .	38
56	Rajah 3.31 : Arus keluaran, $I_o$ .	38
57	Rajah 3.32 : Pertukaran Gelombang.	39
58	Rajah 4.1 : Litar penyongsang SPWM dengan pensuisan voltan sifar.	44



59	Rajah 4.2 : Gambar litar penyongsang SPWM dengan pensuisan voltan sifar.	45
60	Rajah 4.3 : Gambar litar pensuisan SPWM.	45
61	Rajah 4.4 : Litar penyongsang sefasa titian separa dengan pensuisan voltan sifar.	46
62	Rajah 4.5 : Gelombang segitiga.	46
63	Rajah 4.6 : Gelombang isyarat SPWM.	47

### **SENARAI JADUAL**

#	Tajuk Jadual	Mukasurat
1	Jadual 2.1 : Perbandingan antara Pensuisan Lembut dan Pensuisan Keras.	13
2	Jadual 3.1 : Perbandingan Keputusan Simulasi Dengan Nilai Teori.	40
3	Jadual 4.1 : Komponen untuk litar pensuisan SPWM.	43
4	Jadual 4.2 : Komponen untuk litar penyongsang safasa titian separa.	44

## **PRAKATA**

Projek Tahun Akhir ini adalah berkisar tentang analisa dan rekabentuk pensuisan pemodulatan lebar denyut (PWM) yang menggunakan teknik pensuisan lembut. Pensuisan ini digunakan pada peranti kuasa yang diaplikasikan dalam litar penuras kuasa aktif. Pembangunan awal projek ini adalah melibatkan pelaksanaan kajian ilmiah. Kajian ilmiah tentang pemodulatan lebar denyut (PWM), teknik pensuisan lembut dan penuras kuasa aktif iaitu penyongsang dilakukan dengan merujuk kepada buku-buku rujukan, jurnal-jurnal dan laman-laman web. Kajian ilmiah ini diterangkan dalam Bab 2. Daripada kajian ilmiah yang dilakukan rekabentuk litar dilakukan menggunakan perisian SIMCAD V4.1 dan ORCAD – PSPICE V9.2. Butiran rekabentuk litar diterangkan secara terperinci dalam Bab 3. Prototaip dibina dan eksperimen dilakukan bagi memastikan litar berjaya dibina. Pembangunan prototaip dan keputusan eksperimen diterangkan dalam Bab 4. Dengan ini, diharapkan agar projek ini dapat mencapai objektifnya, iaitu bagi mengatasi masalah pensuisan yang dihadapi dalam pensuisan penyongsang IGBT.

## **BAB 1**

### **PENDAHULUAN**

#### 1.1 Pengenalan.

Objektif pelaksanaan projek, pensuisan pemodulatan lebar denyut, teknik pensuisan lembut dan penyongsang PWM diterangkan dalam bab ini. Berdasarkan objektif projek iaitu untuk mengatasi masalah dalam pensuisan, pensuisan pemodulatan lebar denyut dan teknik pensuisan lembut diaplikasikan dalam litar penyongsang. Penyongsang dengan isyarat SPWM sebagai masukan get dan komponen LC sebagai komponen pensuisan lembut direkabentuk dalam projek ini.

#### 1.2 Objektif Projek.

Pada dasarnya, projek ini dilaksanakan untuk menganalisa dan merekabentuk litar pensuisan pemodulatan lebar denyut (PWM) yang menggunakan teknik pensuisan lembut untuk mengurangkan kehilangan tenaga semasa pensuisan dan gangguan elektromagnetik dalam operasi penuras kuasa aktif. Objektif projek ini ialah merekabentuk litar pensuisan pemodulatan lebar denyut (PWM) bagi masukan ke get peranti kuasa. Kemudian, teknik pensuisan lembut diimplementasikan pada litar ini untuk aplikasi penuras kuasa aktif. Dengan ini, peranti kuasa transistor dwikutub get tertebat (IGBT) melakukan operasi tutup dan buka suis pada masa yang dikehendaki. Ini dapat mengelakkan IGBT dari rosak akibat pensuisan secara paksaan atau tiba-tiba. Kehilangan tenaga semasa pensuisan cuba diatasi kerana proses pensuisan yang berfrekuensi tinggi melibatkan operasi tutup dan buka litar yang pantas. Maka untuk mengatasinya, pensuisan perlulah dilakukan pada ketika voltan sifar ataupun arus sifar. Pensuisan voltan sifar dan arus sifar merupakan teknik pensuisan lembut yang akan digunakan di dalam projek ini.

### 1.3 Masalah Pensuisan Peranti Kuasa.

Terdapat masalah yang timbul dalam pensuisan penyongsang IGBT. Antara masalah yang kerap dihadapi ialah kehilangan tenaga semasa pensuisan dan gangguan elektromagnetik [1]. Terdapat pelbagai peranti kuasa yang dihasilkan seperti diod kuasa, thyristor, TRIAC, SIT, MOSFET kuasa, MCT dan IGBT. Antara ciri-ciri yang membezakan antara satu peranti kuasa dengan yang lain ialah kepatasannya dalam pensuisan. peranti kuasa. Contohnya, transistor dwikutub get tertebat (IGBT) model IRG4P50WD merupakan peranti kuasa yang mempunyai frekuensi pensuisan yang tinggi iaitu sehingga 100KHz seperti yang diterangkan dalam helaian data pada Lampiran C. Apabila berfungsi sebagai suis peranti kuasa, litar ini dapat melakukan proses tutup dan buka litar mengikut frekuensi pensuisan pada masukan get. Ini melibatkan kehilangan tenaga dan seterusnya menjadikan peranti kuasa panas dan lama-kelamaan akan menyebabkan peranti kuasa rosak. Masalah-masalah ini cuba di atasi menggunakan teknik pensuisan PWM dengan teknik pensuisan lembut.

### 1.4 Pemodulatan Lebar Denyut.

Jenis bekalan kuasa yang paling umum adalah bekalan pensuisan. Ia biasanya digunakan pada litar yang melibatkan penggunaan peranti kuasa seperti IGBT. Unit-unit ini menggunakan PWM untuk mengawal voltan keluaran. Tujuan voltan keluaran dikawal adalah untuk mengatasi masalah keragaman pada voltan input DC, untuk pengaturan voltan penapis kuasa aktif dan untuk kawalan voltan atau frekuensi malar berdasarkan keperluan pengguna (Rashid M.H.,1993). Bekalan-bekalan pada masa kini menggunakan pelbagai konfigurasi litar PWM. Antaranya ialah PWM Tunggal, PWM Berbilang dan PWM Bentuk Sinus. Dalam setiap kes, isyarat logik PWM 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 [2] [3] ataupun penguat kendalian 741 [4]. Teknik penghasilan isyarat lebar jalur termodulat ini ialah dengan melakukan perbandingan dua isyarat iaitu isyarat pembawa dan isyarat modulasi. Isyarat pemodulatan lebar denyut akan diterangkan lebih lanjut dalam Bab 2.

### 1.5 Teknik Pensuisan Lembut.

Pensuisan diperlukan untuk memacu sesuatu peranti kuasa. Namun, proses pensuisan ini menyebabkan kehilangan tenaga. Maka satu langkah perlu diambil untuk mengatasi masalah ini iaitu dengan menggunakan teknik pensuisan lembut. Pada masa kini teknik pensuisan lembut banyak digunakan sebagai penyelesaian kepada kelemahan teknik pensuisan keras. Ini adalah kerana teknik pensuisan lembut dapat mengurangkan kehilangan tenaga semasa pensuisan berfrekuensi tinggi. Selain itu, ia juga dapat mengurangkan lebar jalur pengawal. Masalah berhubung  $dV/dt$  dan gangguan elektromagnetik turut dapat di atasi [1] [5]. Pensuisan lembut dikelaskan kepada dua ciri iaitu pensuisan voltan sifar dan pensuisan arus sifar [6]. Teknik pensuisan lembut ini akan diterangkan secara terperinci dalam Bab 2.

### 1.6 Penyongsang PWM.

Penyongsang merupakan penukar voltan masukan arus terus kepada voltan arus ulang-alik yang simetri. Rekabentuk pensuisan adalah aspek terpenting dalam rekabentuk penyongsang DC-AC PWM. Untuk menerangkan konsep DC-AC, sambungan litar penyongsang titian separa diambil kira. Bagi sambungan ini, litar akan menjanakan gelombang voltan AC segiempat merentasi beban daripada satu bekalan DC yang malar [7]. Antara kegunaan penyongsang DC-AC ialah ia dapat diaplikasikan untuk menghasilkan kuasa AC 'voltan utama' daripada tenaga DC voltan rendah, iaitu daripada bateri atau panel solar [8]. Ini membuatnya sesuai untuk digunakan sebagai peralatan kuasa AC. Operasi asas kebanyakan penyongsang adalah seperti di bawah :-

- 1) Pada awalnya, penyongsang menukarkan masukan DC ke AC
- 2) Kemudian, isyarat AC yang terhasil dinaikkan ke aras voltan utama dengan menggunakan pengubah.
- 3) Penyongsang dipastikan berfungsi pada kecekapan yang tinggi supaya tenaga maksima daripada bateri/panel solar dapat ditukar ke voltan AC utama.

### 1.7 Metodologi.

Secara kasar, pelaksanaan projek ini dimulakan dengan kajian ilmiah bagi tajuk-tajuk yang berkaitan dengan projek ini. Seterusnya, projek diteruskan dengan merekabentuk dan simulasi litar. Pelaksanaan akhir projek ialah rekabentuk pembangunan prototaip litar pensuisan PWM dengan teknik pensuisan lembut. Bagi perkara pertama, iaitu kajian ilmiah, ia dilakukan untuk memahami dengan lebih mendalam tentang pensuisan pemodulatan lebar denyut, pensuisan lembut, dan penyongsang SPWM. Kajian tentang kegunaan dan kelebihan serta cara membina litar dilaksanakan. Seterusnya, perkara kedua iaitu simulasi litar, ia dilakukan dengan menggunakan perisian SimCad V4.1 dan PSPICE V9.2. Litar direkabentuk menggunakan perisian ini terlebih dahulu sebelum membina prototaip untuk mendapatkan jangkakan bagi voltan keluaran litar. Litar yang telah direkabentuk adalah litar penyongsang, litar pensuisan SPWM dan litar penyongsang dengan teknik pensuisan lembut. Langkah selanjutnya ialah pembangunan prototaip. Ia dibahagikan kepada dua fasa iaitu litar pensuisan SPWM dan litar penyongsang dengan teknik pensuisan lembut. Eksperimen dan analisa dijalankan terhadap keputusan eksperimen, keputusan simulasi dan perbandingan dengan teori.

### 1.8 Kesimpulan.

Daripada bab 1 ini, jelas diketahui dan difahami tentang objektif projek ini dijalankan. Hipotesis awal ialah penyongsang PWM dengan teknik pensuisan lembut dapat dibina dan kehilangan semasa pensuisan dapat diatasi. Seterusnya harmonik dan herotan dapat dikurangkan serta peranti kuasa dapat beroperasi dalam jangka hayat yang lebih panjang.

## BAB 2

### KAJIAN ILMIAH

#### 2.1 Pengenalan.

Kajian ilmiah dijalankan sebagai analisa awal tentang projek ini. Daripada kajian tentang pensuisan PWM, teknik pensuisan lembut dan penyongsang PWM telah memberikan idea bagaimana untuk melaksanakan projek ini. Kajian ini tertumpu kepada rekabentuk pensuisan PWM dan penyongsang dengan teknik pensuisan lembut. Selain itu turut dikaji kegunaan dan kelebihan bagi pensuisan PWM dan teknik pensuisan lembut.

#### 2.2 Pensuisan PWM.

Pensuisan pemodulatan lebar denyut satu teknik pensuisan yang menggunakan isyarat termodulat. Isyarat termodulat boleh diimplimentasikan dalam litar penyongsang. PWM dalam litar penyongsang digunakan untuk melaraskan gandaan penyongsang bagi memperoleh voltan output boleh ubah, (Rashid, M.H.,1993). Pemodulatan lebar denyut dibahagikan kepada tiga jenis iaitu pemodulatan lebar denyut tunggal, pemodulatan lebar denyut berganda dan pemodulatan lebar denyut bentuk sinus.

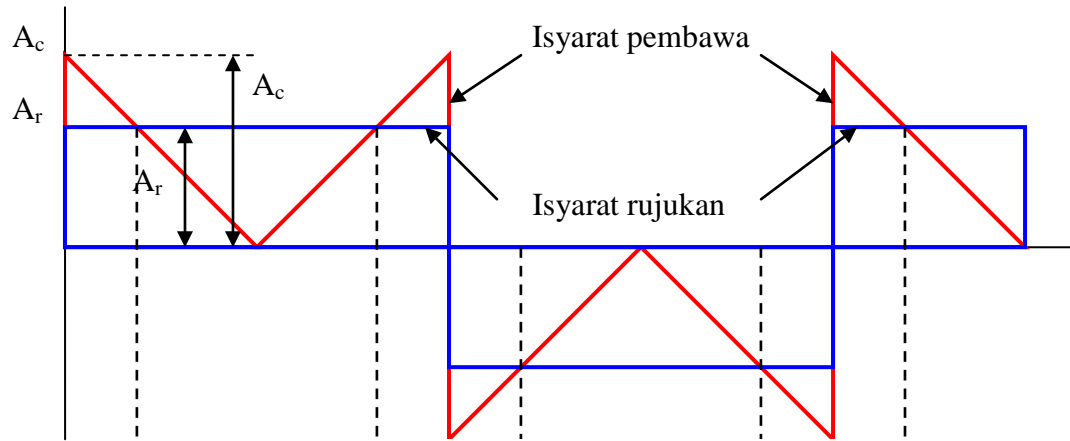
##### a) Lebar Denyut Pemodulatan Tunggal.

PWM tunggal mempunyai hanya satu denyut dalam setengah kitar dan lebar denyut dilaraskan untuk mengawal voltan keluaran penyongsang. Dalam Rajah 2.1 menunjukkan penjanaan isyarat PWM tunggal dan Rajah 2.2 menunjukkan isyarat PWM tunggal. Isyarat penggetan ini dijanakan dengan membandingkan isyarat rujukan segiempat beramplitud  $A_r$ , dengan isyarat pembawa segitiga yang beramplitud  $A_c$ . Frekuensi isyarat rujukan,  $f_r$  menentukan frekuensi asas bagi voltan keluaran manakala frekuensi pembawa,  $f_c$  menentukan frekuensi pensuisan,  $f_s$ . Dengan membandingkan  $A_r$  dari 0 ke  $A_c$ , lebar denyut,  $\delta$  dapat ditentukan dari 0 ke  $180^\circ$ . Manakala daripada nisbah  $A_r$  kepada  $A_c$  dikenali sebagai indeks modulasi,  $M$  yang merupakan pembolehubah kawalan. Indeks modulasi dipermudahkan dalam persamaan berikut :-

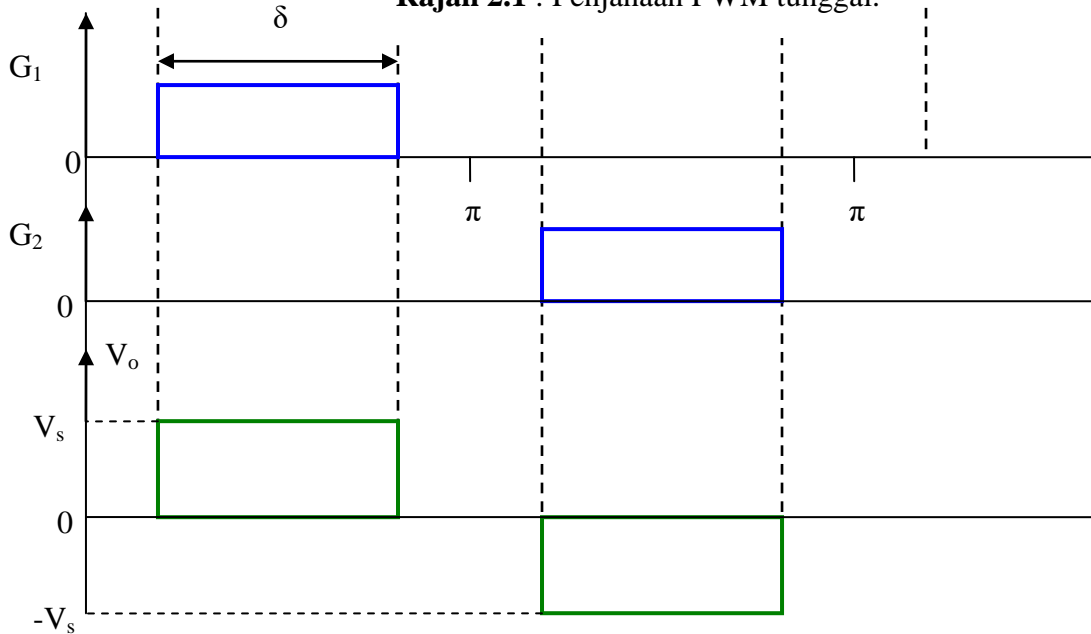
$$M = A_r / A_c \quad (2.1)$$

Bagi voltan keluaran rms boleh ditentukan melalui persamaan :-

$$V_o = V_s \sqrt{\delta/\pi} \quad (2.2)$$



**Rajah 2.1 :** Penjanaan PWM tunggal.

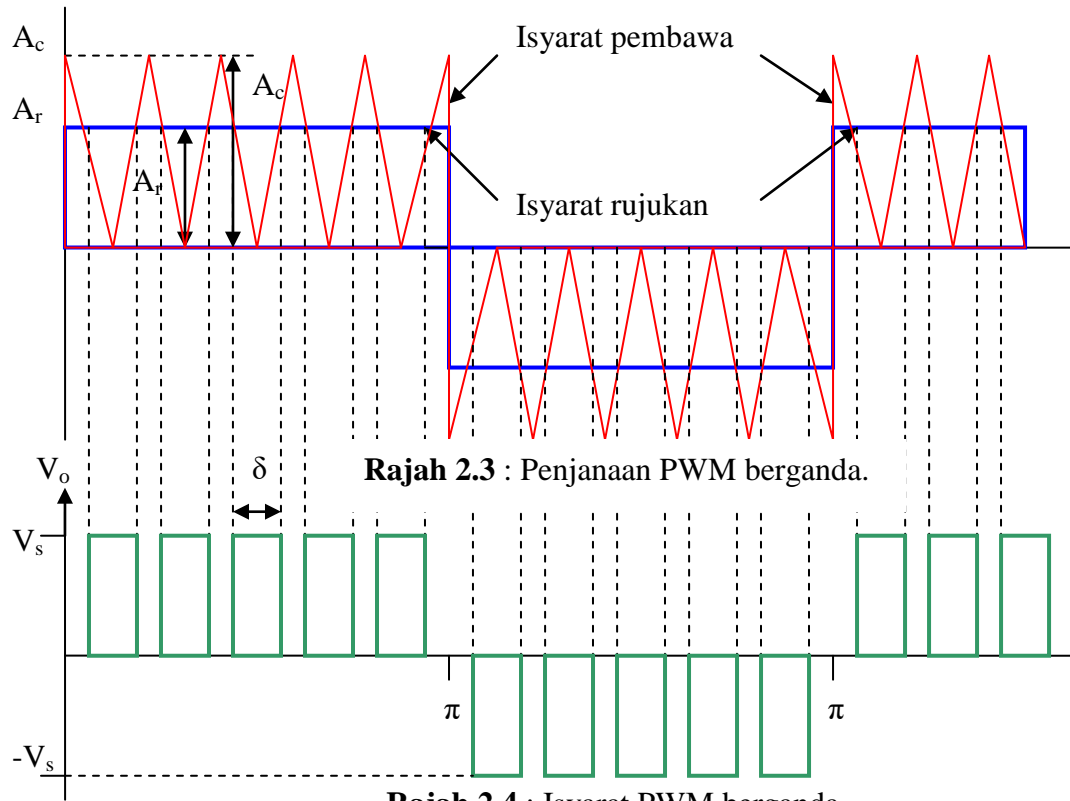


**Rajah 2.2 :** Isyarat ke get dan voltan keluaran.

b) Lebar Denyut Pemodulatan Berganda.

PWM berganda atau dikenali sebagai PWM seragam (Uniform Pulse Width Modulation, UPWM) mempunyai beberapa denyut dalam setiap separuh kitar. Maka voltan keluaran juga mempunyai beberapa output dalam setengah kitar.





Penjanaan isyarat PWM ini merupakan isyarat penggetan untuk transistor untuk proses buka dan tutup dalam pensuisan. Ini ditunjukkan dalam Rajah 2.3 penjanaan isyarat PWM seragam dan Rajah 2.4 menunjukkan isyarat PWM berganda. Seperti mana PWM tunggal frekuensi keluaran,  $f_o$  ditentukan oleh frekuensi rujukan,  $f_r$  Bilangan denyut,  $p$  per setengah kitar ditentukan oleh frekuensi pembawa,  $f_c$ . Bilangan denyut ditentukan melalui persamaan berikut :-

$$p = f_c / 2f_o = m_f / 2 \quad (2.3)$$

dimana  $m_f$  ialah nisbah modulasi frekuensi

$$m_f = f_c / f_o \quad (2.4)$$

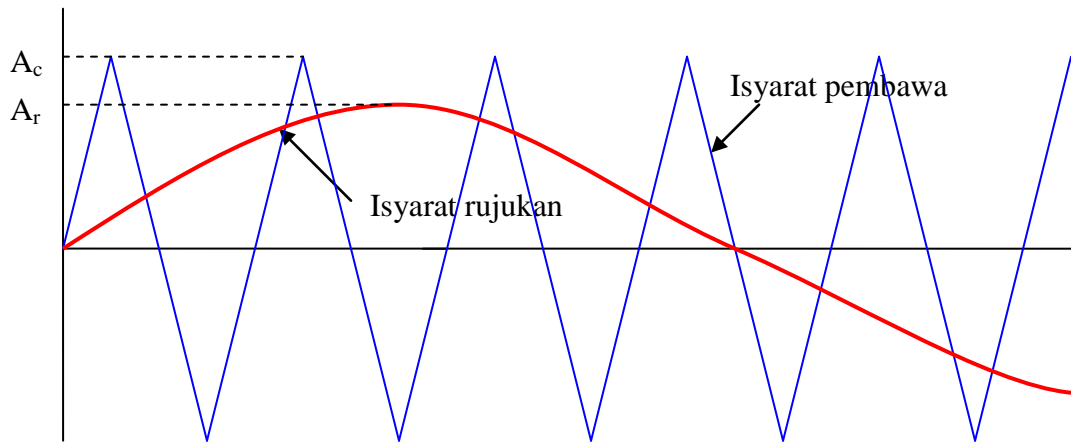
Kepelbagaian indeks modulasi,  $M$  adalah dari 0 ke 1 mengubah lebar jalur,  $\delta$  dari 0 ke  $\pi/p$  seterusnya mengubah voltan keluaran dari 0 ke  $V_s$ . Voltan keluaran rms boleh ditentukan melalui persamaan di bawah :-

$$V_o = V_s \sqrt{(p\delta/\pi)} \quad (2.5)$$

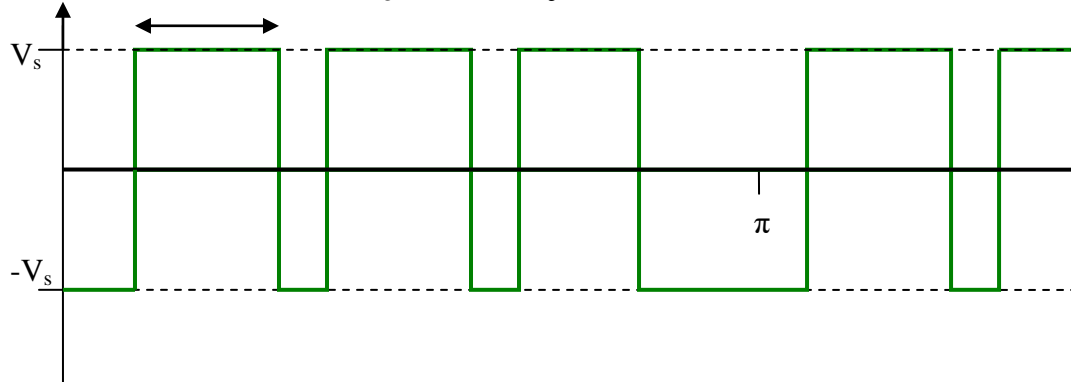
Frekuensi pensuisan yang tinggi untuk tutup dan buka litar pada transistor kuasa akan mengurangkan amplitud pada harmonik tertib rendah dan meningkatkan amplitud pada harmonik tertib tinggi. Tetapi peningkatan frekuensi pensuisan menyebabkan peningkatan kehilangan pensuisan.

c) Lebar Denyut Termodulat Bentuk Sinus.

Ciri-ciri PWM bentuk sinus sama seperti PWM berganda iaitu mengekalkan lebar untuk setiap denyut. PWM bentuk sinus juga mengurangkan faktor herotan sekaligus mengurangkan harmonik tertib rendah. Isyarat penggetan ini terjana daripada perbandingan isyarat rujukan bentuk sinus berfrekuensi,  $f_r$  dengan isyarat pembawa bentuk segitiga berfrekuensi,  $f_c$ . PWM bentuk sinus biasanya digunakan untuk aplikasi industri dan dikenali sebagai SPWM.  $f_r$  menentukan frekuensi keluaran  $f_o$  dan amplitud puncak  $A_r$  mengawal modulasi indeks,  $M$  kemudian mengawal keluaran voltan rms,  $V_o$ . Rajah 2.5 menunjukkan penjanaan SPWM dan Rajah 2.6 menunjukkan isyarat SPWM. Bilangan denyut dalam setengah kitar bergantung kepada frekuensi pembawa. Penjanaan SPWM juga dapat dilakukan dengan menggunakan isyarat segitiga searah. Kelebihan SPWM adalah dapat memperbaiki ciri-ciri harmonik dan herotan selain daripada mengurangkan kehilangan semasa pensuisan.



**Rajah 2.5 :** Penjanaan PWM bentuk sinus.

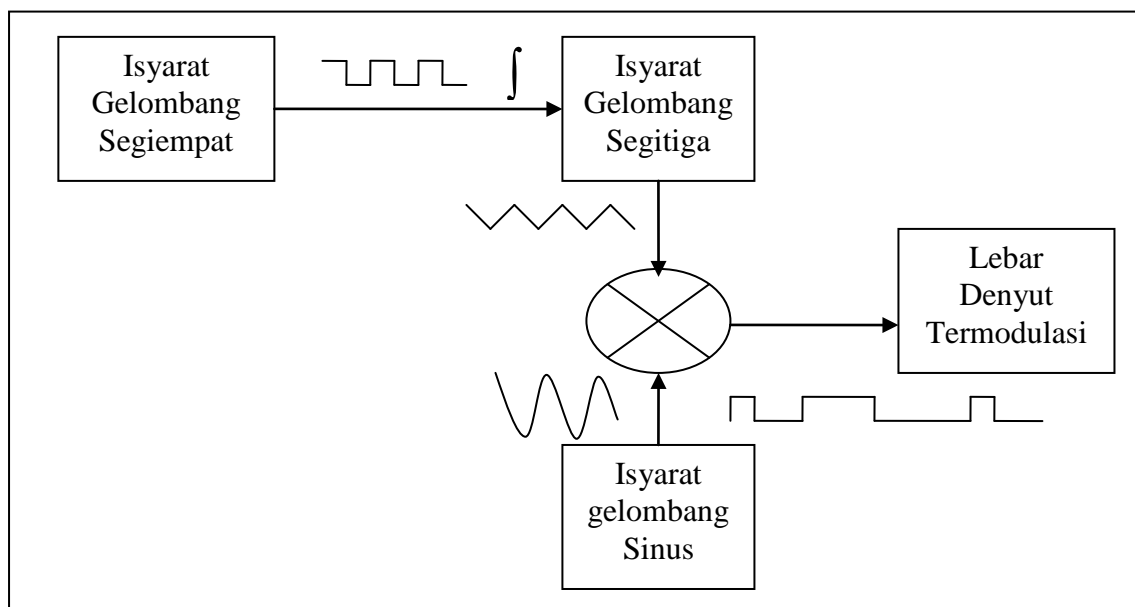


**Rajah 2.6 :** Isyarat SPWM.

Pensuisan SPWM dipilih sebagai isyarat masukan ke get dalam projek ini. Ini kerana pensuisan SPWM mempunyai banyak kelebihan berbanding PWM tunggal dan PWM berganda atau seragam. Kelebihan SPWM ialah dapat mengekalkan lebar yang bagi semua denyut pada setiap kitar. SPWM juga dapat mengurangkan faktor herotan sekaligus harmonik tertib rendah. Ia juga mempunyai kehilangan pensuisan yang rendah pada pensuisan berfrekuensi tinggi. Selain itu untuk kemudahan, sumber Vac dari pembekal (Tenaga Nasional Berhad) sebagai isyarat rujukan dapat digunakan terus tanpa perlu mengubah frekuensinya.

d) Penjanaan SPWM.

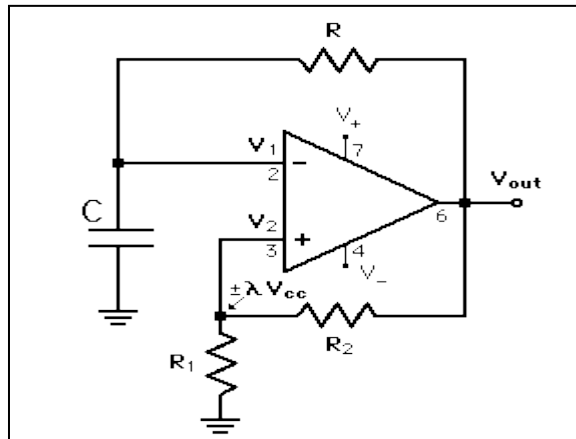
Seperti mana yang diterangkan dalam subtopik-subtopik di atas untuk menjanakan PWM memerlukan dua isyarat iaitu isyarat pembawa segitiga dan isyarat rujukan. Bagi penjanaan isyarat SPWM isyarat rujukan adalah berbentuk sinus. Kedua-dua isyarat ini kemudiannya dibandingkan. Ini semua dapat diringkaskan melalui Rajah 2.7 gambarajah blok penjanaan isyarat SPWM.



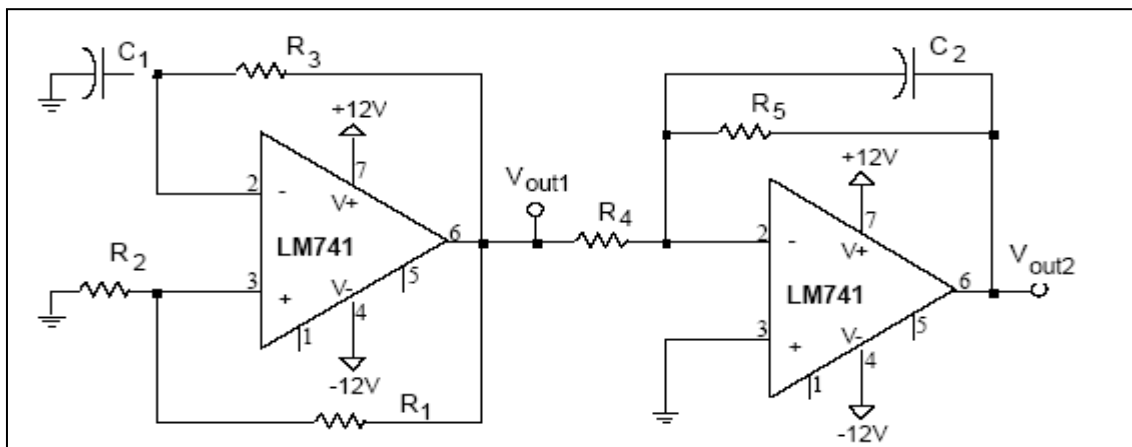
**Rajah 2.7 :** Gambarajah blok penjanaan SPWM.

Dalam projek ini penjanaan isyarat segitiga dan perbandingan isyarat dilakukan menggunakan penguat kendalian (Op-Amp). Model penguat kendalian yang dipilih ialah LM741. Fungsi dan litar-litar operasi penguat kendalian diaplikasikan untuk mendapatkan isyarat yang dikehendaki [9]. Penjanaan isyarat pembawa segitiga

memerlukan dua penguat kendalian. Penjanaan ini gelombang segiempat dilakukan terlebih dahulu kemudian disongsangkan untuk memperoleh gelombang segitiga. Rajah 2.8 menunjukkan penyambungan pada penguat kendalian untuk mendapatkan keluaran gelombang segiempat manakala Rajah 2.9 menunjukan penyambungan dua penguat kendalian untuk menghasilkan keluaran gelombang segitiga [9].

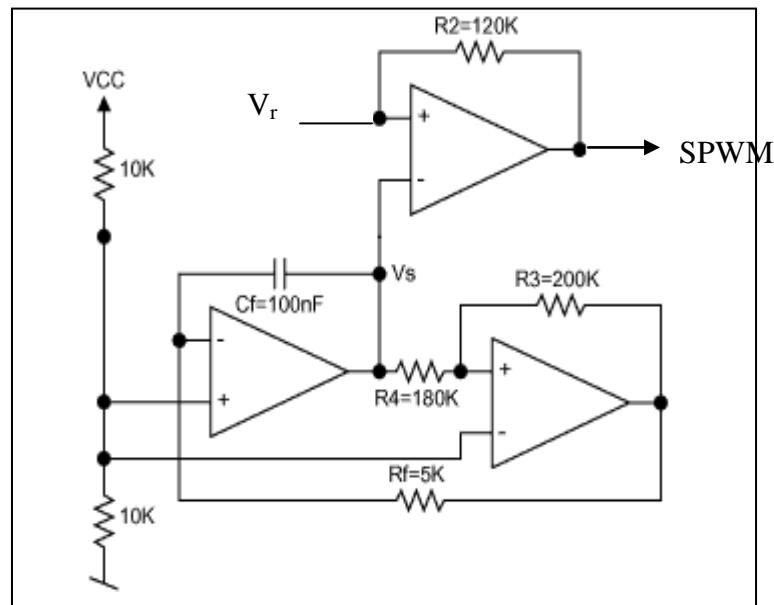


**Rajah 2.8** : Penjanaan keluaran gelombang segiempat.



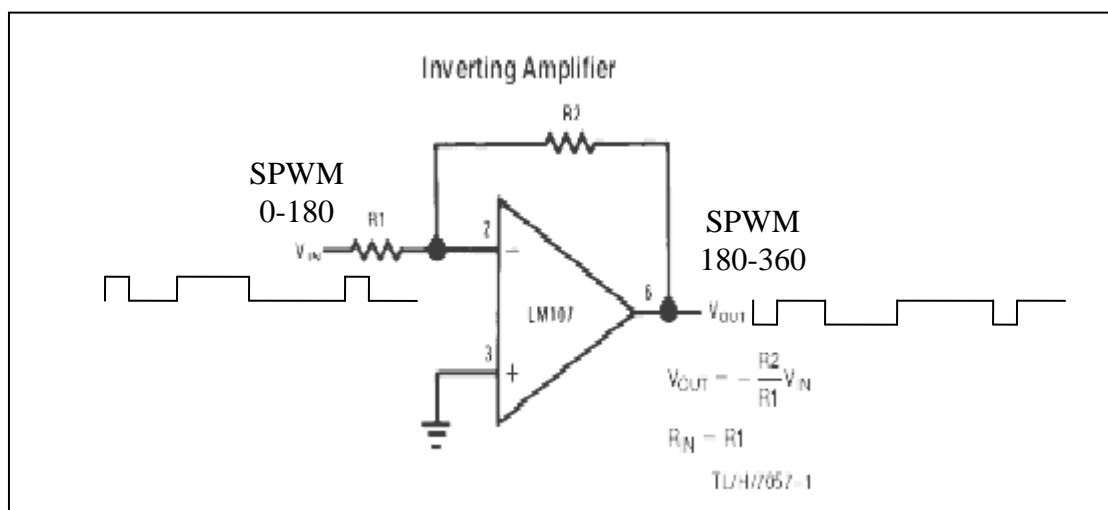
**Rajah 2.9** : Penjanaan keluaran gelombang segitiga.

Isyarat rujukan berbentuk sinus mestilah mempunyai amplitud voltan maksimum rendah dari amplitud voltan isyarat segitiga bagi mengelakan modulasi lampau. Kemudian kedua-isyarat dibandingkan menggunakan satu lagi penguat kendalian. Rajah 2.10 menunjukkan penyambungan penguat kendalian untuk mendapatkan isyarat keluaran SPWM [9].



**Rajah 2.10** : Penjanaan isyarat SPWM

Bagi masukan ke get transistor kuasa pada litar penyongsang sefasa dua isyarat SPWM yang berbeza fasa sebanyak  $180^\circ$  diperlukan. Maka keluaran SPWM pertama hendaklah disongsang menggunakan penguat kendalian bagi memperoleh isyarat SPWM kedua yang berbeza fasa. Rajah 2.11 menunjukkan sambungan bagi mendapatkan SPWM yang berbeza fasa sebanyak  $180^\circ$ .



**Rajah 2.11** : Penyongsang isyarat SPWM.

Setelah isyarat SPWM dijanakan teknik pensuisan lembut akan diaplikasikan dalam litar penyongsang bagi mengurangkan kehilangan semasa pensuisan.

### 2.3 Teknik Pensuisan Lembut.

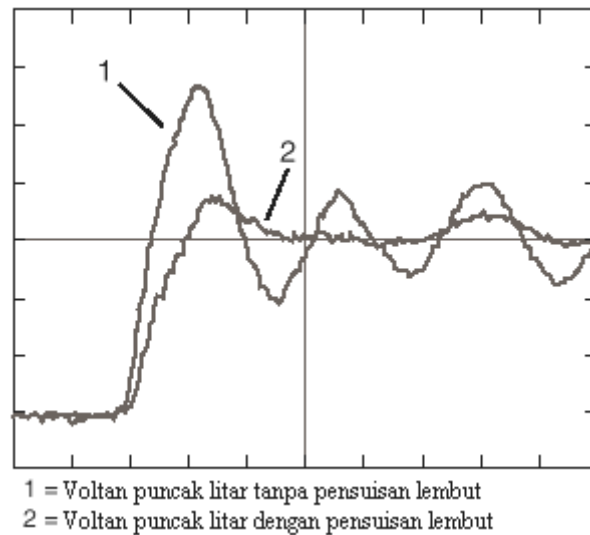
Pensuisan lembut merupakan satu teknologi untuk mengelakkan get transistor daripada mengalami kehilangan kuasa semasa pensuisan atau menerima gangguan elektromagnetik. Kehilangan pensuisan dengan aplikasi pensuisan lembut lebih rendah berbanding pensuisan keras. Teknik pensuisan lembut ini telah digunakan dalam perkakasan memasak elektromagnetik, pensuisan pembekal kuasa dan sebagainya. Dengan pembinaan transistor-transistor berhalaju tinggi, teknologi ini telah digunapakai dalam litar-litar penukar dan penyongsang untuk aplikasi-aplikasi kuasa yang besar. Jadual 2.1 menunjukkan perbandingan antara pensuisan lembut dan pensuisan keras dari pelbagai segi [1] [3].

**Jadual 2.1:** Perbandingan antara pensuisan lembut dan pensuisan keras.

Ciri-ciri Perbandingan	Pensuisan Lembut	Pensuisan Keras
Aplikasi	Sukar digunakan untuk aplikasi penukar dan penyongsang	Lebih mudah digunakan untuk aplikasi penukar dan penyongsang
Kos	Melibatkan kos yang tinggi	Melibatkan kos yang rendah
Kehilangan semasa pensuisan berfrekuensi tinggi	Rendah	Tinggi
dV/dt merentasi transistor	Rendah, kira-kira 50% daripada pensuisan keras	Tinggi dan terhad
dI/dt melalui transistor	Rendah	Tinggi
Kawasan Operasi Selamat (Safe Operating Area, SOA)	Kecil	Luas
Gangguan elektromagnetik	Kurang	Lebih
Voltan puncak	Rendah	Tinggi

Daripada Jadual 2.1 dapat diketahui bahawa operasi penyongsang dengan teknik pensuisan lembut lebih baik berbanding pensuisan keras. Dengan ini pendekatan teknik pensuisan lembut adalah bersesuaian bagi mengatasi masalah-masalah pensuisan

SPWM yang berkaitan. Dalam Rajah 2.12 menunjukkan perbandingan voltan puncak antara teknik pensuisan lembut dengan teknik pensuisan keras. Didapati litar dengan pensuisan lembut mempunyai voltan puncak yang rendah berbanding voltan puncak bagi litar tanpa pensuisan lembut, [10].

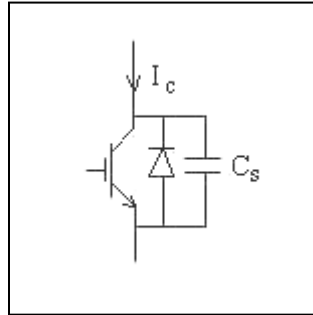


**Rajah 2.12** : Perbandingan penggunaan teknik pensuisan dalam litar PWM.

Pensuisan lembut boleh dikelaskan kepada dua ciri utama iaitu a) pensuisan voltan sifar dan b) pensuisan arus sifar.

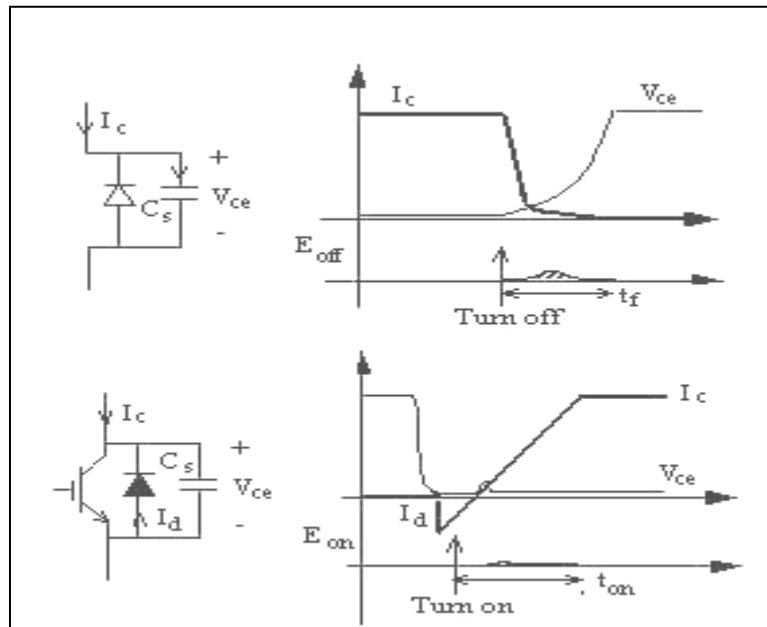
a) Pensuisan Voltan Sifar (ZVS).

Pada pensuisan voltan sifar pensuisan IGBT tutup dan buka litar adalah pada voltan sifar. Penyambungan untuk pensuisan voltan sifar ditunjukkan dalam Rajah 2.13. Satu kapasitor yang diletakkan selari dengan IGBT dikenali sebagai kapasitor “Snubber”. Ini bertujuan untuk mengehadkan  $dV/dt$  merentasi IGBT. Diod anti selari juga diletakkan pada IGBT. IGBT dihidupkan pada voltan sifar dengan cara mengambil alih arus daripada diod anti selari manakala IGBT dimatikan apabila kapasitor mengehadkan  $dV/dt$  yang merentasi IGBT.



**Rajah 2.13** : Pelaksanaan ZVS pada IGBT.

Ilustrasi pensuisan IGBT dapat dilihat melalui Rajah 2.14. Semasa litar terbuka, arus melalui kapasitor dan mencas kapasitor sehingga voltan kapasitor sama dengan  $V_{dc}$  pada masa  $t=t_f$  di mana  $t_f$  ialah masa antara litar terbuka hingga  $V_c=V_{ce}=V_{dc}$ . Semasa litar tertutup, voltan kapasitor disetkan semula supaya tiada kehilangan dalam litar. Terdapat arus yang merentasi diod anti selari,  $I_D$  sebelum arus merentasi IGBT berubah dari sifar ke  $I=I_C$ .



**Rajah 2.14** : Pensuisan IGBT pada ZCS.

Kelebihan ZVS ialah penggunaan sepenuhnya peranti kapasitans parasitik dan pengendalian yang cekap bagi kesan baik pulih diod songsangan. ZVS dipilih untuk diimplementasikan dalam litar penyongsang bagi mengatasi masalah kehilangan semasa pensuisan dan gangguan elektromagnetik.

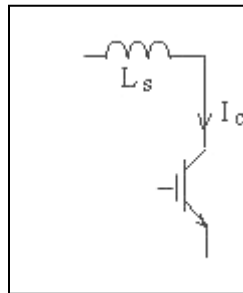


b) Pensuisan Arus Sifar.

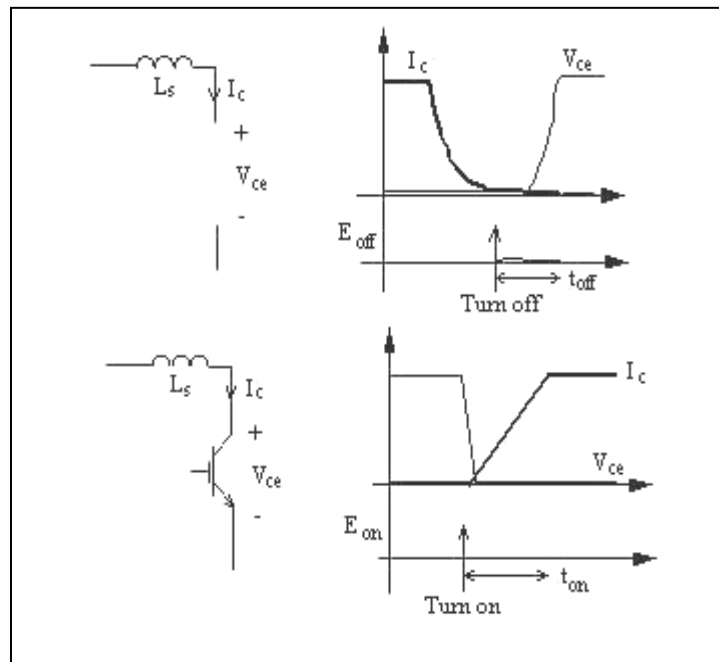
Pada pensuisan arus sifar, pensuisan IGBT tutup dan buka litar adalah pada arus sifar. Seperti dalam Rajah 2.15 induktor diletakkan sesiri dengan IGBT maka IGBT akan membuka litar apabila arus resonan yang melaluinya sifar. Ini dapat dicapai apabila arus menerusi IGBT sifar.

Semasa litar tertutup induktor mengehadkan  $di/dt$  yang melalui IGBT. Kejatuhan voltan menyebabkan kehilangan dikurangkan semasa litar tertutup. Tenaga induktor diresetkan sebelum litar ditutup dengan arus merentasi IGBT sifar. Operasi buka dan tutup litar boleh dilihat dalam Rajah 2.16. Nilai minimum bagi induktor dapat ditentukan melalui persamaan berikut :-

$$L_{\min} = V_{dc} \times t_r / I_c \quad (2.6)$$

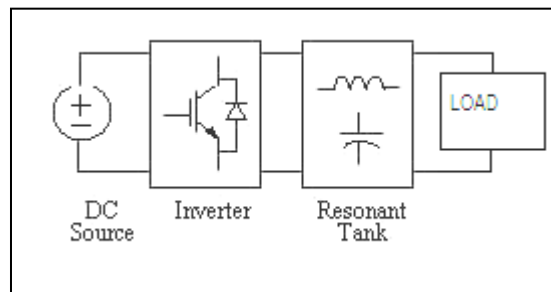


**Rajah 2.15** : Perlaksanaan ZCS pada IGBT.



**Rajah 2.16** : Pensuisan IGBT pada ZCS.

Terdapat tiga topologi pensuisan lembut iaitu mod resonan, mod quasi resonan dan mod pengubah peralihan resonan. Dalam projek ini topologi yang akan diaplikasikan ialah mod resonan yang mempunyai ciri pensuisan voltan sifar. Rajah 2.17 menunjukkan gambarajah blok bagi penyongsang resonan pensuisan voltan sifar yang akan dibina dalam projek ini.

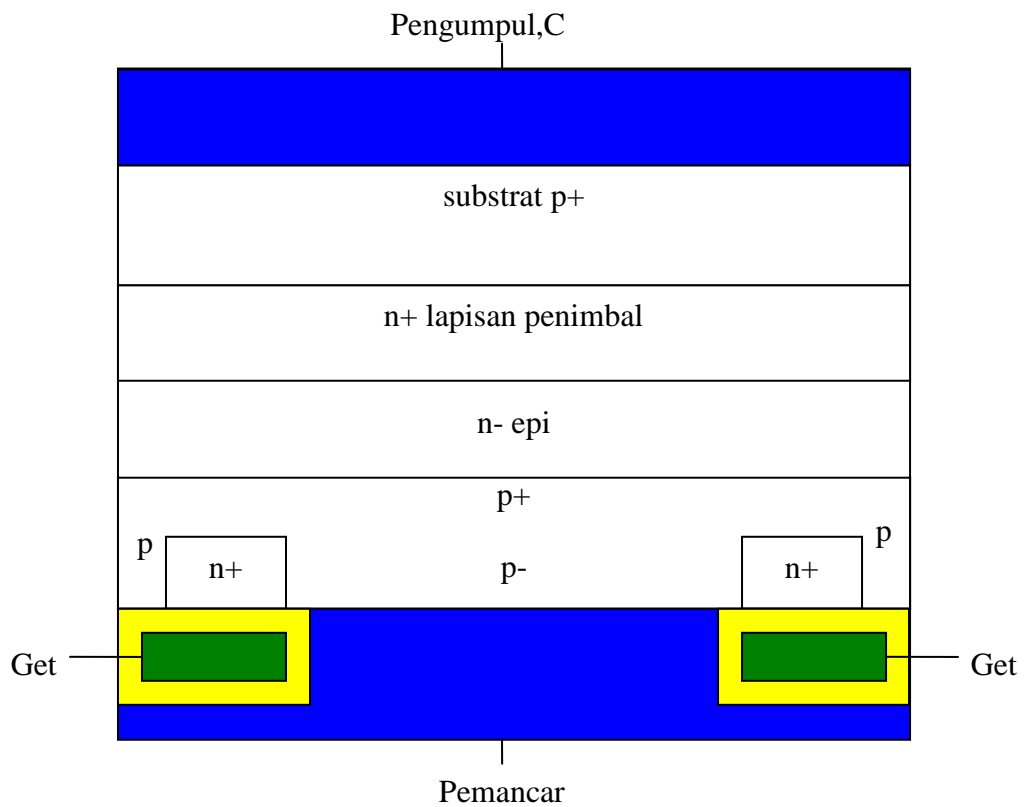


**Rajah 2.17:** Gambarajah blok penyongsang resonan pensuisan voltan sifar.

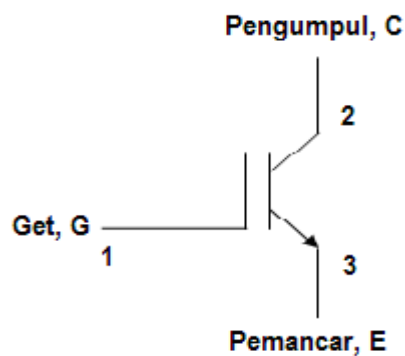
#### 2.4 IGBT.

Kajian ilmiah ke atas IGBT dilakukan kerana pensuisan PWM yang dibina adalah untuk masukan pada get IGBT. Selain itu, IGBT merupakan komponen yang digunakan dalam litar penyongsang.

Transistor dwikutub get tertebat (IGBT) merupakan peranti kuasa yang mempunyai gabungan kebaikan transistor simpang dwikutub (BJT) dan MOSFET (Rashid M.H.,1998). Seperti BJT, IGBT mempunyai kehilangan aliran yang rendah dan tiada masalah keruntuhan voltan kedua serta rintangan salir ke punca yang terkawal. IGBT juga bersifat seperti MOSFET iaitu mempunyai impedan masukan yang tinggi dan voltan terkawal. IGBT mempunyai kehilangan pensuisan dan keberaliran yang rendah. Kelajuan pensuisan IGBT boleh ditingkatkan ke 20KHz. Namun, ini lebih rendah berbanding MOSFET dan lebih baik berbanding BJT. Manakala kadar arusnya boleh ditingkatkan ke 400A,1200V. IGBT didapati banyak digunakan dalam aplikasi kuasa sederhana seperti motor DC dan AC, bekalan kuasa, geganti keadaan pepejal dan sebagainya. IGBT telah dipilih sebagai komponen untuk litar penyongsang. IRG4PF50WD adalah model IGBT yang digunakan. Ia adalah keluaran International Rectifier. Helaian data komponen ini dapat dilihat dalam Lampiran C. Rajah 2.18 di bawah menunjukkan struktur binaan IGBT manakala Rajah 2.19 menunjukkan simbol umum bagi IGBT.



**Rajah 2.18** : Struktur binaan IGBT.

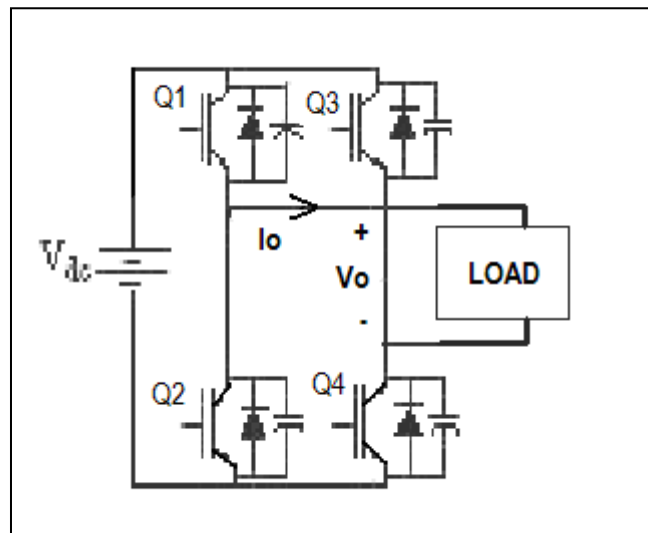


**Rajah 2.19** : Simbol IGBT.

IGBT merupakan komponen yang digunakan dalam litar penyongsang yang berfungsi sebagai suis. Model IRG4PF50WD ini dipilih kerana ia dibina lengkap dengan diod anti selari yang digunakan untuk konfigurasi-konfigurasi titian.

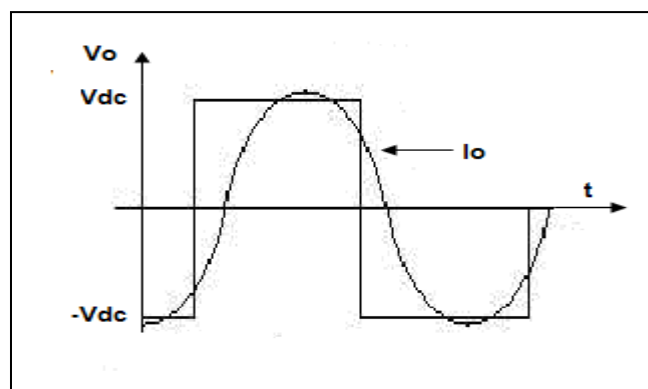
## 2.5 Penyongsang.

Pengubah dari DC ke AC dikenali sebagai penyongsang dan berfungsi untuk menukar masukan DC kepada keluaran AC yang simetrikal mengikut magnitud voltan dan frekuensi yang dikehendaki (Rashid M.H.,1998). Terdapat dua jenis penyongsang iaitu a) penyongsang satu fasa dan b) penyongsang tiga fasa. Penyongsang yang diaplikasikan dalam projek ini ialah penyongsang satu fasa. Rajah 2.20 menunjukkan binaan bagi penyongsang satu fasa.



**Rajah 2.20** : Penyongsang.

Penyongsang satu fasa mempunyai 4 IGBT. Ia beroperasi dengan  $Q_1$  beroperasi serentak dengan  $Q_4$  manakala  $Q_2$  dengan  $Q_3$ . Apabila  $Q_1$  dan  $Q_4$  dihidupkan,  $Q_2$  dan  $Q_3$  dimatikan. Voltan pada beban adalah sama dengan voltan masukan  $V_{dc}$ ,  $V_o = V_{dc}$ . Apabila  $Q_2$  dan  $Q_3$  dihidupkan manakala  $Q_1$  dan  $Q_4$  dimatikan, voltan keluaran adalah  $-V_{dc}$ ,  $V_o = -V_{dc}$ . Gelombang keluaran ditunjukkan dalam rajah 2.21.



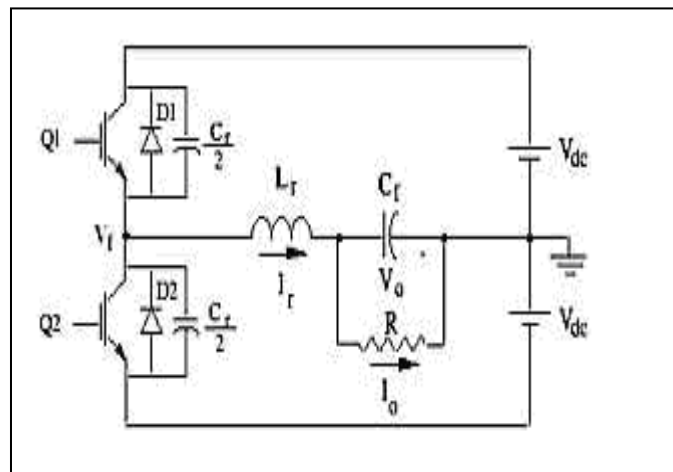
**Rajah 2.21** : Gelombang keluaran penyongsang.

## 2.6 Penyongsang PWM dengan pensuisan lembut.

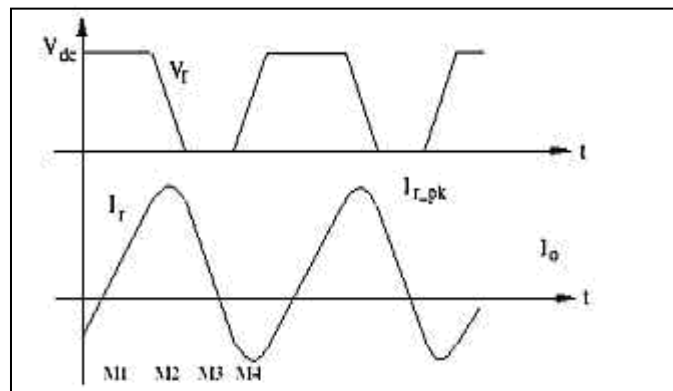
Bahagian selanjutnya ialah untuk menggabungkan keempat-empat konsep SPWM, pensuisan lembut-pensuisan voltan sifar, IGBT dan penyongsang. SPWM digunakan sebagai masukan ke get setiap IGBT yang digunakan sebagai komponen litar penyongsang. Untuk mengurangkan kehilangan pensuisan, teknik pensuisan lembut diaplikasikan. Terdapat dua topologi bagi pensuisan lembut dengan penyongsang SPWM iaitu penyongsang kutub resonan dan penyongsang rangkaian DC resonan [11].

### a) Penyongsang kutub resonan.

Ia merupakan antara topologi terawal yang diaplikasikan untuk kegunaan penyongsang. Penyongsang kutub resonan ini cenderung menggunakan satu set komponen reaktif L-C untuk setiap fasa penyongsang. Rajah 2.22 menunjukkan sambungan untuk penyongsang kutub resonan dan gelombang keluaran ditunjukkan dalam Rajah 2.23.



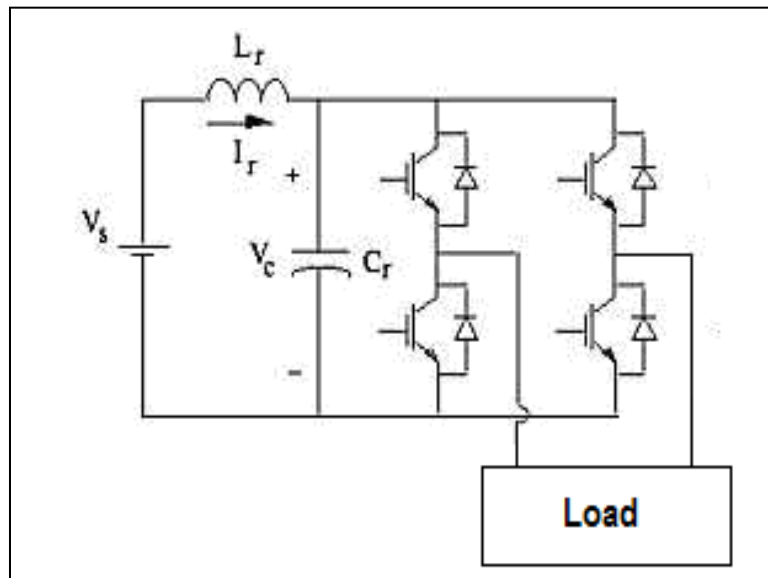
**Rajah 2.22** : Penyongsang kutub resonan untuk sebahagian fasa.



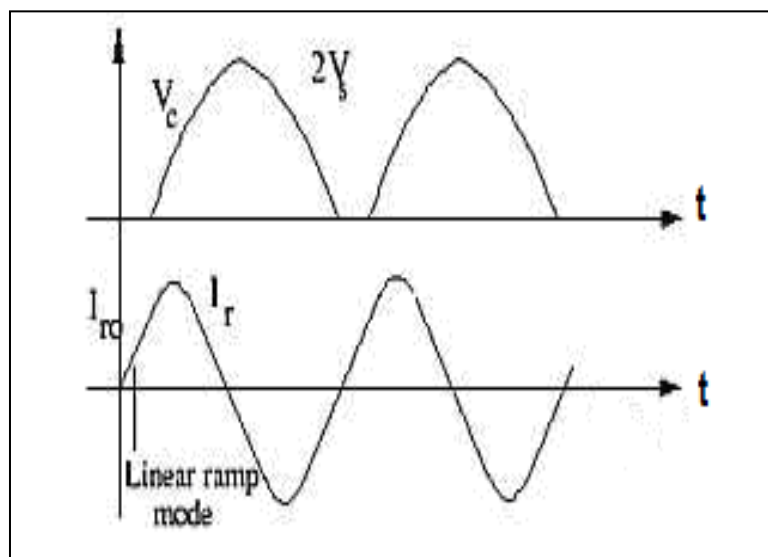
**Rajah 2.23** : Keluaran penyongsang kutub resonan untuk sebahagian fasa.

b) Penyongsang rangkaian DC resonan.

Penyongsang rangkaian DC resonan ini menggunakan satu set komponen resonan untuk satu litar penyongsang. Rajah 2.24 menunjukkan sambungan untuk penyongsang rangkaian DC resonan (RDCLI) dan gelombang keluaran ditunjukkan dalam Rajah 2.25.



**Rajah 2.24** : Sambungan penyongsang rangkaian DC resonan.



**Rajah 2.25** : Keluaran penyongsang rangkaian DC resonan.

## 2.7 Kesimpulan.

Pensuisan PWM, teknik pensuisan lembut, IGBT dan penyongsang telah dikaji dan difahami. Kesimpulannya penyongsang PWM sefasa akan dibina dalam projek ini. Penyongsang sefasa dipilih kerana ia lebih mudah direka dan boleh dijadikan rujukan untuk membina litar penyongsang tiga fasa.

Teknik pensuisan lembut yang digunakan ialah pensuisan pada voltan sifar dan topologi yang diaplikasikan ialah penyongsang kutub resonan. Ini disebabkan oleh model IGBT, IRG4PF50WD dilengkapi dengan diod anti selari yang sesuai untuk operasi konfigurasi gelombang penuh pada pensuisan voltan sifar. Manakala topologi penyongsang kutub resonan pula dipilih kerana satu set komponen induktor, L dan kapasitor, C yang digunakan adalah untuk satu bahagian fasa. Ini dapat memudahkan dalam rekabentuk penyongsang 3 fasa iaitu hanya perlu menambah set komponen L-C pada setiap bahagian fasa. Namun keburukannya ialah bilangan komponen L-C yang digunakan bertambah dengan pertambahan fasa. Akibatnya ialah perubahan pada keluaran, kerana saiz komponen reaktif bertambah.

Isyarat masukan ke get yang digunakan ialah SPWM. Isyarat SPWM dipilih kerana mempunyai kelebihan dapat mengekalkan lebar yang bagi semua denyut pada setiap kitar. SPWM juga dapat mengurangkan faktor herotan sekaligus harmonik tertib rendah. Ia juga mempunyai kehilangan pensuisan yang rendah pada pensuisan berfrekuensi tinggi. Isyarat rujukan gelombang sinus iaitu sumber voltan arus terus dari pembekal (Tenaga Nasional Berhad), di mana ia dapat digunakan secara terus tanpa perlu mengubah frekuensinya. Litar pensuisan SPWM akan direka kemudian diikuti litar penyongsang dengan teknik pensuisan lembut.

## BAB 3

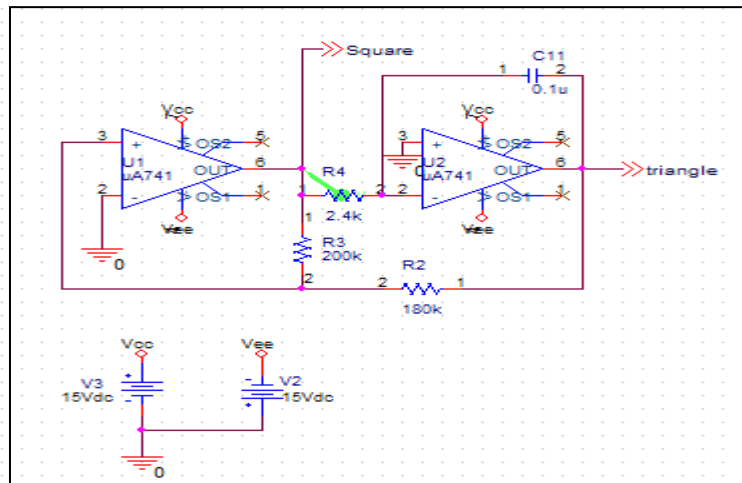
### SIMULASI LITAR PENSUISAN SPWM DAN PENYONGSANG DENGAN PENSUISAN LEMBUT

#### 3.1 Pengenalan.

Bab 3 adalah berkaitan tentang rekabentuk litar dan analisa litar yang telah direkabentuk. Rekabentuk litar dilakukan menggunakan perisian seperti SimCad V4.1 dan PSpice V9.2. Litar yang telah direkabentuk adalah litar pensuisan SPWM, litar penyongsang sefasa dan litar penyongsang SPWM dengan teknik pensuisan lembut. Daripada hasil simulasi litar yang direkabentuk, nilai frekuensi pensuisan, arus dan voltan keluaran ditentukan, dan kemudiannya dibandingkan dengan nilai pengiraan berdasarkan teori untuk mengesahkan sambungan litar.

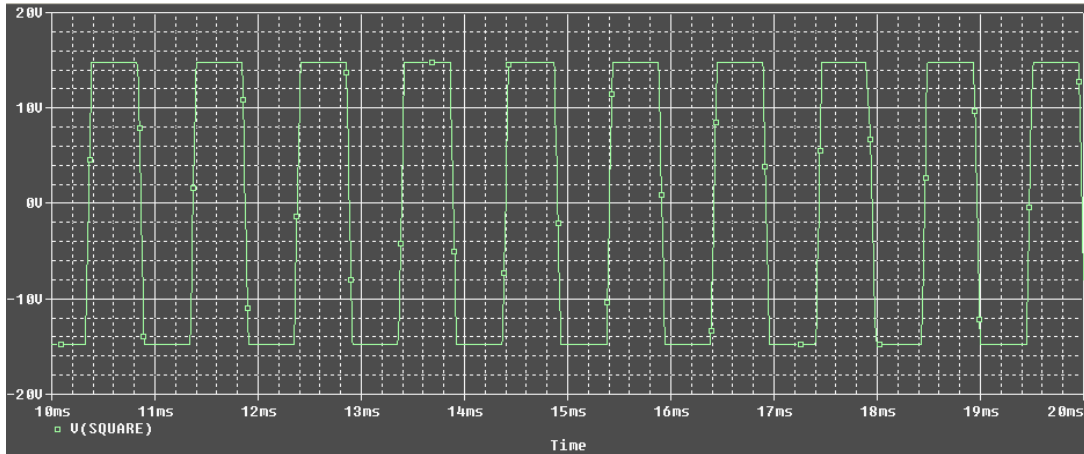
#### 3.2 Rekabentuk Litar Pensuisan SPWM.

Pensuisan SPWM dibina menggunakan penguat kendalian model LM741 yang dikeluarkan oleh National Semiconductor. Helaiian data komponen ini boleh dilihat dalam Lampiran D. Pensuisan SPWM dimulakan dengan menjanakan isyarat pembawa. Untuk menjanakan isyarat pembawa ini, gelombang segiempat direkabentuk, di mana ia kemudiannya disongsangkan untuk memperoleh gelombang segitiga. Rajah 3.1 menunjukkan litar yang direkabentuk. Rajah 3.2 menunjukkan gelombang keluaran segiempat dan Rajah 3.3 menunjukkan gelombang keluaran segitiga.

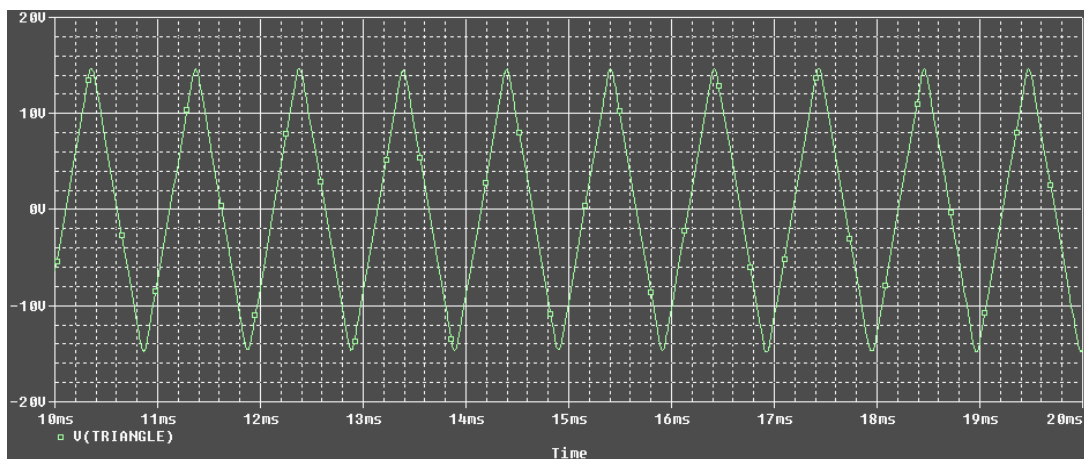


Rajah 3.1 : Litar penjanaan gelombang segitiga.





**Rajah 3.2** : Keluaran gelombang segiempat.



**Rajah 3.3** : Keluaran gelombang segitiga.

Frekuensi isyarat pembawa yang dipilih ialah 1kHz. Frekuensi ini dapat ditentukan melalui persamaan berikut :-

$$F = R_3 / 4R_4 C_{11} R_2 \quad (3.1)$$

Daripada litar penjanaan isyarat gelombang segitiga di atas, frekuensi bagi isyarat pembawa yang dikira dari persamaan (3.1) ialah 1157.4074 Hz dan frekuensi isyarat pembawa yang ditentukan pada gelombang keluaran ialah 965.44 Hz.

Setelah memperoleh isyarat segitiga, isyarat ini dibandingkan dengan isyarat rujukan gelombang sinus untuk memperoleh keluaran SPWM. Isyarat rujukan adalah  $V_{ac}$  yang beramplitud 10V. Pembahagi voltan diaplikasikan untuk mengawal amplitud isyarat rujukan. Rajah 3.2(a) menunjukkan penyambungan litar penjanaan SPWM. POT,  $R_9$  digunakan untuk mengawal amplitud isyarat rujukan gelombang sinus. Isyarat rujukan gelombang sinus hendaklah kurang dari  $15V_{ac}$  kerana sekiranya amplitud