

**REKABENTUK PENYONGSANG SATU FASA 700 WATT
MENGUNAKAN TEKNIK PEMODULATAN LEBAR DENYUT
SINUSOIDAL BERASASKAN MIKROPENGAWAL**

WAN ZAIN WAN DOLLAH

UNIVERSITI SAINS MALAYSIA

2011

**REKABENTUK PENYONGSANG SATU FASA 700 WATT
MENGUNAKAN TEKNIK PEMODULATAN LEBAR DENYUT
SINUSOIDAL BERASASKAN MIKROPENGAWAL**

oleh

WAN ZAIN WAN DOLLAH

**Tesis yang disertakan untuk memenuhi keperluan bagi
Ijazah Sarjana Sains**

Mac 2011

PENGHARGAAN

Terlebih dahulu saya memanjatkan kesyukuran kehadiran Allah S.W.T kerana dengan rahmat dan kurniaNya memberikan kesihatan dan kekuatan kepada saya untuk menjalankan dan menyiapkan projek ini.

Pada kesempatan ini saya merakamkan setinggi-tinggi penghargaan dan ucapan ribuan terima kasih kepada Prof. Madya Dr. Soib Bin Taib, di atas segala bimbingan dan tunjuk ajar serta bantuannya yang tak ternilai, selama saya menuntut di Universiti Sains Malaysia. Sekalung penghargaan juga saya ucapkan kepada Dr. Ir. Syafrudin Masri, di atas dorongan dan bimbingan yang diberikan kepada saya. Penghargaan dan terima kasih juga saya tujukan kepada Dekan Pusat Pengajian Kejuruteraan Elektrik & Elektronik dan kepada semua kakitangan di Pusat Pengajian Elektrik & Elektronik terutama sekali kakitangan makmal kuasa yang telah menyediakan segala kelengkapan dan memberi bantuannya kepada saya.

Akhir sekali saya ucapkan terima kasih kepada anak dan isteri tercinta di atas dorongan semangat, kesetiaan dan pengorbanannya selama saya menuntut ilmu di USM ini. Kepada Allah saya mohonkan doa semoga orang-orang yang saya sebutkan di atas akan mendapat balasan amal dan limpahan rahmat di atas segala usaha dan keihlasannya. Semoga apa yang diperolehi dari pada projek ini, dapat dikongsi bersama dan boleh dimanfaatkan untuk kepentingan bersama.

JADUAL KANDUNGAN

Muka Surat

| | |
|---------------------------------|-------|
| PENGHARGAAN | ii |
| JADUAL KANDUNGAN | iii |
| SENARAI LAMPIRAN | vii |
| SENARAI JADUAL | viii |
| SENARAI RAJAH | ix |
| SENARAI SIMBOL | xv |
| SENARAI SINGKATAN | xx |
| ABSTRAK | xxii |
| ABSTRACT | xxiii |
| | |
| BAB 1 PENGENALAN | 1 |
| 1.1 Latar Belakang Permasalahan | 1 |
| 1.2 Objektif Penyelidikan | 5 |
| 1.3 Skop Penyelidikan | 5 |
| 1.4 Metodologi | 6 |
| 1.5 Tinjauan Tesis | 7 |

| | | |
|--------------|---|----|
| BAB 2 | SISTEM PENYONGSANG SATU FASA | 9 |
| 2.1 | Pengenalan | 9 |
| 2.2 | Kajian-kajian Terhadulu | 10 |
| 2.3 | Penukar a.t-a.t | 14 |
| 2.3.1 | Penukar Terbang Balik (Flyback Converter) | 16 |
| 2.3.2 | Penukar a.t - a.t Jenis Tolak-Tarik | 17 |
| 2.3.3 | Penukar a.t - a.t Separuh Tetimbang | 19 |
| 2.3.4 | Penukar a.t-a.t Tetimbang Penuh | 20 |
| 2.3.5 | Pemilihan Topologi Penukar | 22 |
| 2.3.6 | Alatubah Frekuensi tinggi | 24 |
| 2.4 | Penyongsang | 25 |
| 2.4.1 | Penyongsang Satu Fasa Tetimbang Separuh | 27 |
| 2.4.2 | Penyongsang Tetimbang Penuh | 30 |
| 2.4.3 | Pemodulatan Lebar Denyut | 33 |
| 2.4.4 | Pemodulatan Lebar Denyut Tunggal (<i>Single Pulse-width Modulation</i>) | 34 |
| 2.4.5 | Pemodulatan Lebar Denyut Berbilang (<i>Multiple pulse-width modulation</i>) | 34 |
| 2.4.6 | Pemodulatan Lebar Denyut Sinusoidal (<i>Sinusoidal pulse-width modulation (SPWM)</i>) | 35 |
| 2.4.7 | Pemilihan Topologi dan Skim Pensuisan Penyongsang | 40 |
| 2.4.7.1 | Skim Pensuisan SPWM Dwikutub | 41 |

| | | |
|--------------|--|-----------|
| 2.4.7.2 | Skim Pensuisan SPWM Ekakutub | 42 |
| 2.5 | Mikropengawal PIC | 44 |
| 2.5.1. | Mod Pemodulatan Lebar Denyut | 45 |
| 2.5.2 | Bahasa Pengaturcaraan PIC | 46 |
| 2.5.3 | Bahasa PicBasic Pro | 48 |
| 2.6 | Ringkasan | 49 |
| BAB 3 | REKABENTUK SISTEM PENYONGSANG SATU FASA | 51 |
| 3.1 | Pengenalan. | 51 |
| 3.2 | Rekabentuk Penukar a.t-a.t | 52 |
| 3.2.1 | Penyelakuan Penukar a.t-a.t | 53 |
| 3.2.2 | Litar Kuasa Penukar a.t-a.t | 57 |
| 3.2.3 | Pemilihan MOSFET | 58 |
| 3.2.4 | Pemilihan Saiz Teras Alatubah Frekuensi Tinggi | 60 |
| 3.2.5 | Pemilihan Diod Penerus | 67 |
| 3.2.6 | Penapis a.t | 68 |
| 3.2.7 | Litar Perlindungan Snubber | 70 |
| 3.2.8 | Litar Kawalan | 72 |
| 3.2.9 | Litar Pemacu Get (Gate Driver Circuit) | 75 |
| 3.3 | Rekabentuk Penyongsang | 78 |
| 3.3.1 | Penyelakuan | 78 |

| | | |
|--------------|---|-----|
| 3.3.2 | Litar Kuasa | 81 |
| 3.3.3 | Litar Kawalan | 82 |
| 3.3.3.1 | Rekabentuk Aturcara Untuk Menghasilkan Isyarat SPWM | 86 |
| 3.3.3.2 | Perisian PicBasic Pro | 88 |
| 3.3.4 | Litar Pemacu Get | 91 |
| BAB 4 | KEPUTUSAN PENYELAKUAN DAN PENGUJIAN | 98 |
| 4.1 | Pengenalan | 98 |
| 4.2 | Ujian Penukar a.t - a.t | 99 |
| 4.2.1 | Ujian Litar Kawalan Penukar a.t - a.t | 99 |
| 4.2.2 | Ujian Litar Pemacu Get | 101 |
| 4.2.3 | Pengujian Litar Kuasa | 104 |
| 4.3 | Ujian Litar Penyongsang | 111 |
| 4.3.1 | Ujian Litar Kawalan Penyongsang | 112 |
| 4.3.2 | Keputusan Ujian Litar Pemacu Get Penyongsang | 116 |
| 4.3.3 | Ujian Litar Kuasa Penyongsang | 119 |
| 4.4 | Ringkasan | 127 |
| BAB 5 | KESIMPULAN DAN CADANGAN | 131 |
| 5.1 | Kesimpulan | 131 |
| 5.2 | Cadangan Masa Depan | 134 |
| | SENARAI RUJUKAN | 135 |

SENARAI LAMPIRAN

- LAMPIRAN A COMPARE/CAPTURE/PWM(CCP)
- LAMPIRAN B Jadual AWG
- LAMPIRAN C Jadual sinus dan gelombang sinus separuh kitar yang diplotkan dari jadual tersebut
- LAMPIRAN D Aturcara untuk menjana isyarat pemodulatan lebar denyut pada PIC16F628A menggunakan perisian PicBasic pro.

SENARAI JADUAL

| | | Muka surat |
|-------------|---|------------|
| Jadual 2.1. | Perbandingan jenis-jenis penyongsang sumber voltan | 28 |
| Jadual 3.1 | Ciri-ciri MOSFET IRFP264 | 59 |
| Jadual 3.2 | Pemilihan saiz teras ferrite berdasarkan kepada hasil darab $W_c A_c$ | 63 |
| Jadual 3.3 | Ciri-ciri diod BYW96E | 68 |
| Jadual 3.4 | Ciri-ciri MOSFET IRF840A | 82 |
| Jadual 3.5 | Nilai frekuensi PWM minima bagi setiap nilai frekuensi pengayun | 90 |
| Jadual 3.6 | Ciri-ciri diod BYV26C | 96 |
| Jadual 4.1 | Aggaran kos bagi sistem penukar a.t-a.t | 129 |
| Jadual 4.2 | Aggaran kos bagi penyongsang | 130 |

SENARAI RAJAH

| | | Muka surat |
|------------|--|------------|
| Rajah 1.1 | Metodologi penyelidikan | 6 |
| Rajah 2.1 | Gambarajah blok sistem penyongsang | 9 |
| Rajah 2.2 | Penukar terbangbalik | 16 |
| Rajah 2.3 | Penukar a.t - a.t jenis tolak tarik | 18 |
| Rajah 2.4 | Litar penukar a.t – a.t separuh tetimbang | 19 |
| Rajah 2.5 | Penukar topologi tetimbang penuh | 22 |
| Rajah 2.6 | Gelombang voltan dan arus bagi penukar pada Rajah 2.5 | 22 |
| Rajah 2.7 | Litar penyongsang tetimbang separuh. | 29 |
| Rajah 2.8 | Bentuk gelombang penyongsang tetimbang separuh bagi beban rintangan | 30 |
| Rajah 2.9 | Penyongsang tetimbang penuh | 31 |
| Rajah 2.10 | Bentuk gelombang penyongsang tetimbang penuh bagi beban rintangan | 32 |
| Rajah 2.11 | Isyarat get dan voltan keluaran penyongsang pemodulatan lebar denyut sinusoidal (a) Penjanaan isyarat get, (b) isyarat get Q_1 dan Q_3 , (c) isyarat get Q_2 dan Q_4 , (d) voltan keluaran | 36 |
| Rajah 2.12 | Profil harmonik pemodulatan lebar denyut sinusoidal | 39 |
| Rajah 2.13 | Graf voltan puncak pada harmonik asas melawan indeks pemodulatan, M_a | 39 |

| | | |
|------------|---|----|
| Rajah 2.14 | Penjana skim SPWM dwikutub | 41 |
| Rajah 2.15 | Rupabentuk gelombang skim pensuisan SPWM dwikutub (a) Perbandingan gelombang rujukan dengan gelombang segitiga (b) Denyut get untuk Q_1 dan Q_3 (c) Denyut get untuk Q_2 dan Q_4 (d) Gelombang keluaran | 42 |
| Rajah 2.16 | Idea asas penjanaan gelombang pensuisan skim SPWM ekakutub | 43 |
| Rajah 2.17 | Penyongsang satu fasa tetimbang penuh | 44 |
| Rajah 2.18 | Rajah blok PWM yang telah dipermudahkan | 46 |
| Rajah 2.19 | Jujukan memprogramkan mikropengawal PIC menggunakan bahasa PicBasic Pro | 48 |
| Rajah 2.20 | Pemrogram sesiri | 49 |
| Rajah 3.1 | Sistem penyongsang satu fasa SPWM | 51 |
| Rajah 3.2 | Litar simulasi penukar a.t - a.t tetimbang penuh | 54 |
| Rajah 3.3 | Arus masukan | 55 |
| Rajah 3.4 | Voltan masukan, V_{in} | 56 |
| Rajah 3.5 | Voltan pada gelung primer, V_p | 56 |
| Rajah 3.6 | Voltan pada gelung sekunder, V_s | 56 |
| Rajah 3.7 | Voltan keluaran a.t, V_o | 57 |
| Rajah 3.8 | Arus keluaran penukar, I_o dengan beban 700 W | 57 |
| Rajah 3.9 | Penukar a.t - a.t topologi tetimbang penuh | 58 |
| Rajah 3.10 | Demensi mekanikal teras F-4820-EC. | 63 |
| Rajah 3.11 | Litar penapis lulus rendah | 68 |

| | | |
|------------|---|-----|
| Rajah 3.12 | Litar snubber R-C sesiri | 71 |
| Rajah 3.13 | Litar kawalan penukar a.t - a.t menggunakan litar bersepadu SG3525A | 73 |
| Rajah 3.14 | Rajah blok bagi IC SG3525/27A | 73 |
| Rajah 3.15 | Litar pengesan suapbalik menggunakan alatubah penurun dan penerus tetimbang penuh | 74 |
| Rajah 3.16 | Rajah Blok IC pemacu get L6384 | 77 |
| Rajah 3.17 | Litar pemacu get penukar a.t - a.t tetimbang penuh. | 77 |
| Rajah 3.18 | Litar penyelakuan penyongsang menggunakan PESIM | 79 |
| Rajah 3.19 | Gelombang rujukan sinusoidal dan gelombang isyarat pembawa segitiga | 80 |
| Rajah 3.20 | Voltan keluaran penyongsang tanpa panapis laluan rendah | 80 |
| Rajah 3.21 | Voltan keluaran penyongsang dengan penapis laluan rendah | 80 |
| Rajah 3.22 | Litar kawalan penyongsang menggunakan PIC16F628A | 85 |
| Rajah 3.23 | Gelombang isyarat SPWM dari litar pengawal PIC16F628A | 86 |
| Rajah 3.24 | Rajah blok IC pemacu get IR2110 | 92 |
| Rajah 3.25 | Diod/kapasitor bootstrap yang digunakan pada IC IR2110 | 93 |
| Rajah 3.26 | Litar pemacu penyongsang tetimbang penuh yang lengkap dengan pengganding foto | 97 |
| Rajah 4.1 | Isyarat keluaran PWM pada pin 11 dan 14 SG3525A | 100 |

| | | |
|------------|---|-----|
| Rajah 4.2 | Isyarat keluaran PWM yang diperolehi daripada penyelakuan | 100 |
| Rajah 4.3 | Ukuran masa mati isyarat PWM1 dan PWM2 | 101 |
| Rajah 4.4 | Prototaip litar kawalan penukar a.t - a.t menggunakan IC SG3525A | 101 |
| Rajah 4.5 | Isyarat keluaran litar pemacu get L6384 | 103 |
| Rajah 4.6 | Keputusan penyelakuan menunjukkan isyarat picuan get pasangan Q_1, Q_3 dan Q_2, Q_4 | 103 |
| Rajah 4.7 | Litar pemacu get menggunakan litar bersepadu L6384 | 104 |
| Rajah 4.8 | Voltan yang diukur pada gelung primer alatubah frekuensi tinggi | 105 |
| Rajah 4.9 | Keputusan penyelakuan menunjukkan voltan pada gelung primer alatubah frekuensi tinggi | 105 |
| Rajah 4.10 | Voltan yang diukur pada gelung sekunder alatubah frekuensi tinggi | 106 |
| Rajah 4.11 | Keputusan penyelakuan menunjukkan voltan pada gelung sekunder alatubah frekuensi tinggi | 106 |
| Rajah 4.12 | Gelombang voltan keluaran a.t yang diukur pada terminal keluaran penukar | 107 |
| Rajah 4.13 | Gelombang voltan keluaran a.t penyelakuan pada terminal keluaran penukar | 108 |
| Rajah 4.14 | Geraf voltan keluaran a.t penukar melawan kitar kerja MOSFET dengan voltan masukan, $V_{dc} = 28 \text{ V}$ dan beban 700 W | 109 |

| | | |
|------------|---|-----|
| Rajah 4.15 | Geraf voltan keluaran penukar melawan voltan masukan yang diuji pada beban 700 W | 110 |
| Rajah 4.16 | Geraf kitar kerja keluaran PWM1 dan PWM2 yang diukur pada keluaran SG3525A melawan voltan masukan yang diuji pada beban 700 W | 110 |
| Rajah 4.17 | Gambar prototaip penukar a.t-a.t | 111 |
| Rajah 4.18 | Keputusan penyelakuan menunjukkan isyarat yang dihasilkan pada pin RB3, RB1 dan RB2 | 112 |
| Rajah 4.19 | Isyarat yang dihasilkan pada pin RB1, RB2, RB3 dan pin 6 SN7408 | 113 |
| Rajah 4.20 | Keluaran isyarat SPWM ekakutub dari litar kawalan | 114 |
| Rajah 4.21 | Keluaran SPWM yang diperbesarkan menunjukkan masa mati 590 μ s | 115 |
| Rajah 4.22 | Prototaip litar pengawal penyongsang | 115 |
| Rajah 4.23 | Gelombang keluaran litar pemacu get | 117 |
| Rajah 4.24 | Pengukuran masa mati litar pemacu | 117 |
| Rajah 4.25 | Pengukuran lebar denyut SPWM yang paling kecil | 118 |
| Rajah 4.26 | Prototaip litar pemacu get penyongsang | 118 |
| Rajah 4.27 | Gelombang voltan dan arus keluaran penyongsang tanpa penapis laluan rendah ketika beban 700 W | 119 |
| Rajah 4.28 | Gelombang voltan dan arus keluaran pada sekala besar untuk frekuensi pensuisan 5 kHz | 120 |
| Rajah 4.29 | THD arus keluaran penyongsang tanpa penapis laluan rendah ketika beban 700 W | 120 |
| Rajah 4.30 | THD voltan veluaran penyongsang tanpa penapis laluan rendah ketika beban 700 W | 121 |

| | | |
|------------|--|-----|
| Rajah 4.31 | Gelombang voltan dan arus keluaran dengan penapis laluan rendah pada beban 700 W | 121 |
| Rajah 4.32 | THD voltan keluaran dengan penapis laluan rendah pada beban 700 W | 122 |
| Rajah 4.33 | FFT voltan keluaran dengan penapis laluan rendah pada beban 700 W yang diperolehi dari penyelakuan | 122 |
| Rajah 4.34 | THD arus keluaran dengan penapis laluan rendah pada beban 700 W | 123 |
| Rajah 4.35 | FFT arus keluaran dengan penapis laluan rendah pada beban 700 W yang diperolehi dari penyelakuan | 123 |
| Rajah 4.36 | Prototaip litar kuasa penyongsang SPWM | 124 |
| Rajah 4.37 | Graf THD keluaran penyongsang melawan frekuensi pensuisan yang diperolehi daripada pengujian | 125 |
| Rajah 4.38 | Kecekapan keseluruhan sistem penyongsang melawan kuasa keluaran pada frekuensi pensuisan 5 kHz | 126 |
| Rajah 4.39 | Geraf Voltan keluaran penyongsang melawan voltan masukan dengan suapbalik pada beban 700 W | 127 |

SENARAI SIMBOL

| | | Muka surat |
|--------------|--|------------|
| V_o | Voltan keluaran | 16 |
| V_{in} | Voltan masukan | 16 |
| N_s | Lilitan gelung sekunder | 16 |
| N_p | Lilitan gelung primer | 16 |
| L_{out} | Peraruh keluaran | 17 |
| $R_{ds(ON)}$ | Rintangan salir-punca semasa MOSFET tertutup | 18 |
| B_{sat} | Fluks tepu | 20 |
| V_p | Voltan gelung primer | 21 |
| V_s | Voltan gelung sekunder | 21 |
| D | Kitar kerja | 21 |
| T | Tempoh | 21 |
| f_s | Frekuensi pensuisan | 21 |
| $W_a A_c$ | Hasil darab luas tettingkap | 25 |
| V_{RL} | Voltan beban | 28 |
| V_{on} | Voltan pada harmonik ke n | 33 |
| V_{o1} | Voltan pada harmonik yang pertama | 33 |

| | | |
|-----------------|---|----|
| f_r | Frekuensi isyarat rujukan | 34 |
| f_o | Frekuensi voltan keluaran | 34 |
| f_p | Frekuensi isyarat pembawa | 34 |
| M_a | Indeks pemodulatan | 34 |
| p | Bilangan dedenyut | 34 |
| A_r | Amplitud isyarat rujukan | 35 |
| \hat{V}_k | Amplitud isyarat rujukan | 36 |
| \hat{V}_{Tri} | Amplitud isyarat pembawa | 36 |
| P_{in} | Kuasa masukan | 58 |
| P_{out} | Kuasa keluaran | 58 |
| η | Kecekapan | 58 |
| $I_{in(max)}$ | Arus masukan maksima | 59 |
| $V_{in(min)}$ | Voltan masukan minima | 59 |
| $I_{in(rms)}$ | Arus masukan rms | 59 |
| E | Voltan bekalan (rms) | 60 |
| B | Ketumpatan fluks magnet (Gauss) | 60 |
| A_c | Keratan rentas teras (cm ²) | 60 |
| N | Bilangan lilitan | 60 |
| f | Frekuensi (Hz) | 60 |
| A_w | Keratan rentas dawai | 60 |
| W_a | Luas tettingkap teras | 60 |

| | | |
|-------------|---|----|
| I | Arus masukan (r.m.s) | 61 |
| V_{nom} | Voltan masukan nominal alatubah (V) | 64 |
| B_{max} | Ketumpatan fluks maksima teras (Gauss) | 64 |
| A_c | Luas keratan rentas teras (cm ²) | 64 |
| k | Pemalar [$k=4.44$ (gelombang sain), $k = 4.0$ (gelombang segiempat)] | 64 |
| N_s | Bilangan lilitan gelung sekunder | 64 |
| V_o | Voltan keluaran yang dikehendaki (V) | 65 |
| V_{fwd} | Voltan pincang mara diod penerus yang digunakan (V) | 65 |
| D_{max} | Kitar kerja maksima yang dibenarkan (biasanya 0.95) | 65 |
| A_{wire} | Luas keratan rantas dawai | 66 |
| d_{wire} | Garispusat dawai | 66 |
| S | Ketumpatan arus | 66 |
| $V_{(BR)R}$ | Voltan songsang maksima | 68 |
| $I_{F(AV)}$ | Arus purata mara maksima | 68 |
| t_{rr} | Masa pemulihan songsang | 68 |
| I_{FRM} | Arus puncak berulang maksima | 68 |
| V_F | Voltan mara | 68 |
| L | Nilai aruhan, | 69 |
| V | Voltan masukan penapis, | 69 |
| I_r | Arus riak | 69 |

| | | |
|--------------|--|----|
| f_s | Frekuensi pensuisan | 69 |
| D | Kitar kerja | 69 |
| V_1 | Voltan riak maksima pemuat | 70 |
| V_2 | Voltan riak minima pemuat | 70 |
| C | Nilai pemuat penapis | 70 |
| t_f | Masa “ <i>turn-off</i> ” | 71 |
| V_{dc} | Voltan masukan a.t | 72 |
| R | Rintangan snubber | 72 |
| C_{BOOT} | Pemuat perangkap bot | 76 |
| C_{EXT} | Pemuat setara pada terminal get MOSFET | 76 |
| Q_{get} | Cas pada terminal get MOSFET | 76 |
| V_{get} | Voltan pada terminal get MOSFET | 76 |
| I_{rms} | Arus keluaran rms | 81 |
| V_{rms} | Voltan keluaran rms | 81 |
| I_{peak} | Arus keluaran puncak | 82 |
| V_{DSS} | Voltan salir punca | 83 |
| I_{DM} | Denyutan arus salir | 83 |
| I_D | Arus salir berterusan | 83 |
| $t_{D(on)}$ | Masa lengah semasa tertutup | 83 |
| $t_{D(OFF)}$ | Masa lengah semasa terbuka | 83 |

| | | |
|-------------------|--|----|
| T_d | Masa lengah | 86 |
| v_k | Voltan keluaran seketika | 87 |
| V_m | Voltan puncak | 87 |
| ωt | Frekuensi sudut | 87 |
| V_{BS} | Voltan bekalan terapung | 92 |
| $V_{BR(R)}$ | Voltan pecah tebat songsang | 96 |
| I_{FRM} | Arus puncak kedepan berulang (<i>Repetitive peak forward current</i>) | 96 |
| t_{rr} | Masa pemulihan songsang (<i>Reverse recovery time</i>) | 96 |
| I_{FSM} | Arus puncak kedepan tak berulang (<i>Non-repetitive peak forward current</i>) | 96 |
| $\frac{dI_R}{dt}$ | Kecerunan maksima arus pemulihan songsang (<i>Maximum slope of reverse recovery current</i>) | 96 |

SENARAI SINGKATAN

| | | Muka surat |
|-----------|---|------------|
| PIC | Peripheral Interface Controller | 4 |
| a.t | arus terus | 5 |
| a.u | arus ulangalik | 5 |
| rms | <i>Root Mean Square</i> | 5 |
| a.t - a.t | arus terus – arus terus | 6 |
| PESIM | Power Electronic Simulator | 7 |
| IDE | Integrated Development Environment | 7 |
| SPWM | Sinusoidal Pulse Width Modulation | 10 |
| PWM | Pulse Width Modulation | 10 |
| THD | Total Harmonic Distortion | 11 |
| MOSFET | Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor | 11 |
| DSP | Digital Signal Processing | 12 |
| IGBT | Insulated Gate Bipolar Transistor | 13 |
| EPROM | Erasable Programmable Read Only Memory | 13 |
| a.u - a.u | arus ulangalik – arus ulangalik | 14 |
| a.t - a.u | arus terus – arus ulangalik | 14 |
| a.u - a.t | arus ulangalik – arus terus | 14 |

| | | |
|-------|---|-----|
| SCR | Silicon Controlled Rectifier | 30 |
| CCP | Capture/Compare/PWM Module | 45 |
| DOS | Dos Operating System | 47 |
| CPU | Central Processing Unit | 48 |
| USM | Universiti Sains Malaysia | 53 |
| AWG | American Wire Gauge | 67 |
| EMI | Electromagnetic Interference | 70 |
| IC | Integrated Circuit | 73 |
| DT/SD | Dead Time/Shut Down | 76 |
| HVG | High Voltage Output | 76 |
| LVG | Low Voltage Output | 76 |
| HPWM | Hardware Pulse Width Modulation | 88 |
| PCB | Printed Circuit Board | 114 |
| HO | High Output | 116 |
| LO | Low Output | 116 |
| FFT | Fourier Frequency Transform | 121 |
| IEC | International Electrotechnical Commission | 124 |

**REKABENTUK PENYONGSANG SATU FASA 700 WATT
MENGUNAKAN TEKNIK PEMODULATAN LEBAR DENYUT
SINUSOIDAL BERASASKAN MIKROPENGAWAL**

ABSTRAK

Tesis ini menerangkan rekabentuk penyongsang satu fasa menggunakan teknik pemodulatan lebar denyut sinusoidal untuk kegunaan umum. Mikropengawal PIC16F628A digunakan sebagai pengawal pensuisan untuk menjana isyarat pemodulatan lebar denyut sinusoidal. Kaedah yang digunakan ialah dengan membina satu jadual sinusoidal dan menggunakan kemudahan pin pemodulatan lebar denyut perkakasan pada PIC tersebut untuk menjana isyarat SPWM. Bahasa pengaturcaraan PicBasic Pro yang digunakan mampu menghasilkan litar kawalan penyongsang yang lebih cekap dan menghasilkan keluaran yang lebih stabil. PIC yang digunakan sebagai pengawal mampu menjana isyarat SPWM pada frekuensi pensuisan 5 kHz hingga 25 kHz dengan THD 5% hingga 16% untuk voltan dan arus pada beban lurus walaupun tanpa penapis laluan rendah. Satu penukar a.t-a.t tetimbang penuh kawalan litar bersepadu SG3525A dibina untuk menaikkan voltan dari 28 – 32 V kepada 400 V. Penukar ini mampu beroperasi dari frekuensi 20 kHz hingga 50 kHz. Pada kadaran kuasa 700 W penukar a.t - a.t yang direkabentuk menghasilkan kecekapan maksimum 89% manakala penyongsang boleh menghasilkan kecekapan maksimum 90% dengan beban lurus. Kecekapan maksimum keseluruhan bagi sistem penyongsang ini adalah 89% dengan THD voltan dan arus masing-masing 1.6% dan 1.9% setelah melalui penapis laluan rendah pada frekuensi pensuisan 5 kHz.

DESIGN OF 700 WATT SINGLE-PHASE INVERTER USING SINUSOIDAL PULSE-WIDTH MODULATION TECHNIQUE BASED ON MICROCONTROLLER

ABSTRACT

This thesis describes the design of a single-phase inverter using sinusoidal pulse width modulation technique for general application. Microcontroller PIC16F628A is used as switching controller to generate sinusoidal pulse width modulation signal. Method of design is based on lookup table and manipulating the hardware pulse width-modulating pin on PIC to generate SPWM signal. PicBasic Pro programming language used is capable of producing a more efficient inverter control circuit with stable output. The PIC as controller is capable of generating SPWM switching frequency between 5 kHz to 25 kHz with THD of 5% to 16% for voltage and current at linear load even without low pass filter. A DC-DC full bridge converter controlled by SG3525A integrated circuit is built to raise the voltage from 28-32 V to 400 V. The converter is capable of operating at frequency between 20 kHz to 50 kHz. The DC-DC converter designed produce maximum efficiency of 89% and the inverter can produce 90 % efficiency at 700 W pure resistive load. Overall efficiency of the inverter system is 89% with THD voltage and current of 1.6% and 1.9% respectively at 5 kHz switching frequency with low pass filter.

BAB 1

PENGENALAN

1.1 Latar Belakang Permasalahan

Salah satu penyelidikan yang aktif dalam bidang elektronik kuasa ialah kajian mengenai bagaimana menggunakan sumber tenaga diperbaharui (*renewable energy*) dalam kehidupan seharian, terutama sekali kajian mengenai bagaimana menggunakan tenaga solar sebagai sumber bekalan elektrik samada untuk disambungkan kepada talian grid ataupun untuk kegunaan secara sendirian (*stand-alone*). Ia adalah satu cara untuk mengatasi masalah kekurangan tenaga konvensional yang kian meruncing, semakin hari kos menjana tenaga elektrik menggunakan kaedah konvensional semakin meningkat dan stok simpanannya semakin berkurang. Antara kelebihan menggunakan tenaga diperbaharui (seperti tenaga solar, tenaga angin, biomass dan sel bahanapi) berbanding dengan tenaga konvensional ialah seperti berikut:-

- (i) Ia mengalami pembaharuan sendiri (*self-renewing*) dan tidak akan berkurang bila digunakan.
- (ii) Ianya boleh diperolehi dalam kuantiti yang besar. Kewujudannya setiap hari adalah jauh lebih besar berbanding dengan apa yang terhasil dari bahanapi fosil (*fossil fuel*) (Bull, 2001). Ianya mesra alam sekitar. Penggunaan tenaga diperbaharui kurang membebaskan gas rumah hijau (*greenhouse gases*) yang

dapat menipiskan lapisan ozon, yang mana ianya boleh menyebabkan berlakunya pemanasan global.

- (iii) Dari segi kos operasi, ianya adalah murah bagi jangka masa panjang kerana kos untuk pemulihan iklim alam sekitar dapat dihindarkan.

Di antara sumber tenaga diperbaharui yang ada, Sel Solar (*photovoltaic cell*) mempunyai potensi yang paling besar untuk dibangunkan dan digunakan secara meluas. Setiap minit tenaga solar yang sampai ke bumi ini melebihi tenaga yang digunakan di dunia dalam masa setahun (SEPA, 2002). Tanpa ada bahagian yang berputar atau bergerak, mahupun pembebasan gas berbahaya kepada manusia, sistem solar ini adalah mudah untuk dimanfaatkan.

Kesan foto voltan telah mula diterokai sejak tahun 1839 oleh ahli fizik Perancis Becquerel. Ianya masih dalam makmal sehinggalah tahun 1954, apabila makmal Bell menghasilkan sel solar silicon yang pertama (Mukund, 1999). Aplikasinya telah pun digunakan dalam teknologi angkasa lepas lebih kurang 50 tahun dahulu apabila sel solar yang pertama digunakan pada kapal angkasa Russia pada tahun 1957 dan kapal angkasa U.S. pada tahun 1958 (Wikipedia, 2007). Walaubagaimanapun tenaga solar baru digunakan secara meluas hanya pada tahun 1970an. Penyelidikan selama 30 tahun telah menjadikan penggunaan tenaga dari sel solar telah meningkat dengan mendadak walaupun, penggunaan tenaga elektrik dari sumber konvensional masih lagi dominan.

Walaupun kos penjana tenaga elektrik dari sumber solar telah mengurang, namun ianya masih lagi tinggi jika dibandingkan dengan kos penjanaan tenaga elektrik secara tradisional. Pada tahun 2005, kos penjanaan tenaga elektrik daripada sel solar adalah anggaran dari 0.60 US\$/kWh turun kepada ~0.30 US\$/kWh di

kawasan sinaran matahari yang tinggi (Wikipedia, 2007). Kos ini masih lagi lebih tinggi berbanding dengan menggunakan sumber tenaga diperbaharui (*renewable energy*) yang lain seperti biomass, tenaga angin ataupun menggunakan penjana hidro-elektrik. Satu lagi perkara yang tidak kurang pentingnya ialah kecekapan penukaran tenaga solar kepada tenaga elektrik.

Di Malaysia, Tenaga Nasional Berhad (TNB) telah memulakan penggunaan solar sel untuk penjanaan tenaga elektrik di kawasan luar bandar sejak awal 1980 lagi. Sistem solar bersendirian (*stand-alone PV system*) yang pertama telah dipasang pada 37 buah rumah di Langkawi, kemudian diikuti dengan 70 buah rumah di Tembeling dan 50 buah rumah di Pulau Sibul. Dalam tahun 1990, dua projek bekalan tenaga elektrik luar bandar, iaitu 10kWp dan 100kWp masing-masing dilaksanakan dengan sokongan dari New Energy and Industrial Technology Development Organization (NEDO), Jepun. Pada akhir 1990, Kementerian Pembangunan Luar Bandar telah mengambil alih peruntukan sistem solar elektrik untuk bekalan tenaga elektrik di luar bandar (BCSE, 2005).

Kajian, penyelidikan dan pembangunan pada masa sekarang ini lebih menjuruskan kepada bagaimana untuk meningkatkan kecekapan dan juga untuk mengurangkan kos penjanaan tenaga sel solar. Dengan meningkatnya minat mengenai penyelidikan penggunaan sel solar samada untuk sambungan ke grid ataupun bersendirian (*stand-alone*), maka penyelidikan dan pembangunan untuk pengantaramukaan (*interfacing*) antara sel solar dengan beban melalui sistem penyongsang juga meningkat pada masa ini. Kajian ini lebih menjuruskan kepada kaedah bagaimana untuk:-

- Meningkatkan kecekapan penukaran tenaga tersebut.

- Mengurangkan kandungan harmonik yang terhasil pada beban dan
- Mengurangkan kos dan saiz penyongsang itu sendiri

Penyelidikan dan pembangunan penyongsang yang mempunyai ciri-ciri di atas masih lagi diperingkat penyelidikan dan akan sentiasa berkembang. Terdapat pelbagai kaedah bagaimana ianya boleh dibangunkan, iaitu samada penyongsang sumber voltan (*voltage source inverter*) ataupun penyongsang sumber arus (*current source inverter*) bergantung kepada kegunaan penyongsang tersebut.

Dalam tesis ini, penekanan diberikan mengenai pembangunan sistem penyongsang sumber voltan satu fasa. Rekabentuk ini mampu mengurangkan kandungan harmonik, meningkatkan kecekapan dan strategi kawalan serta mengurangkan kos. Bagi mengurangkan kos, kaedah yang paling mudah ialah dengan cara mengurangkan bilangan komponen dalam rekabentuk penyongsang itu sendiri. Dalam tesis ini, bilangan komponen rekabentuk dapat dikurangkan dengan menggunakan pengawal mikro PIC16F628A dari syarikat Microchip sebagai komponen utama untuk menjana isyarat pemodulatan lebar denyut yang akan digunakan untuk memicu penyongsang.

Penjanaan isyarat picuan yang baik merupakan satu perkara yang amat penting dalam mengurangkan kandungan harmonik pada voltan keluaran penyongsang. Dengan menggunakan PIC sebagai pengawal ianya mampu menggantikan kaedah kawalan analog yang sedia ada disamping mempunyai kemampuan untuk menghasilkan keluaran yang lebih tepat dan stabil. Secara tidak langsung, kos keseluruhan dikurangkan. Penggunaan mikropengawal ini juga menjadikan sistem penyongsang ini boleh bertahan lama kerana ianya tahan lasak.

1.2 Objektif Penyelidikan

Objektif utama penyelidikan ini ialah untuk merekabentuk penyongsang satu fasa untuk kegunaan umum yang mempunyai ciri-ciri berikut:-

- Penyongsang yang berkecekapan tinggi.
- Penyongsang yang dapat menghasilkan keluaran gelombang sinus dengan kandungan harmonik yang rendah.
- Penyongsang ini berupaya menukar voltan masukan a.t 24 – 32 volt kepada voltan a.u 240 volt rms pada frekuensi 50 Hz.
- Mampu mengeluarkan kuasa pada kadaran maksimum 700 W
- Mengaitkan hubungan antara frekuensi pensuisan penyongsang dengan kandungan harmonik yang terhasil pada keluaran penyongsang.

1.3 Skop Penyelidikan

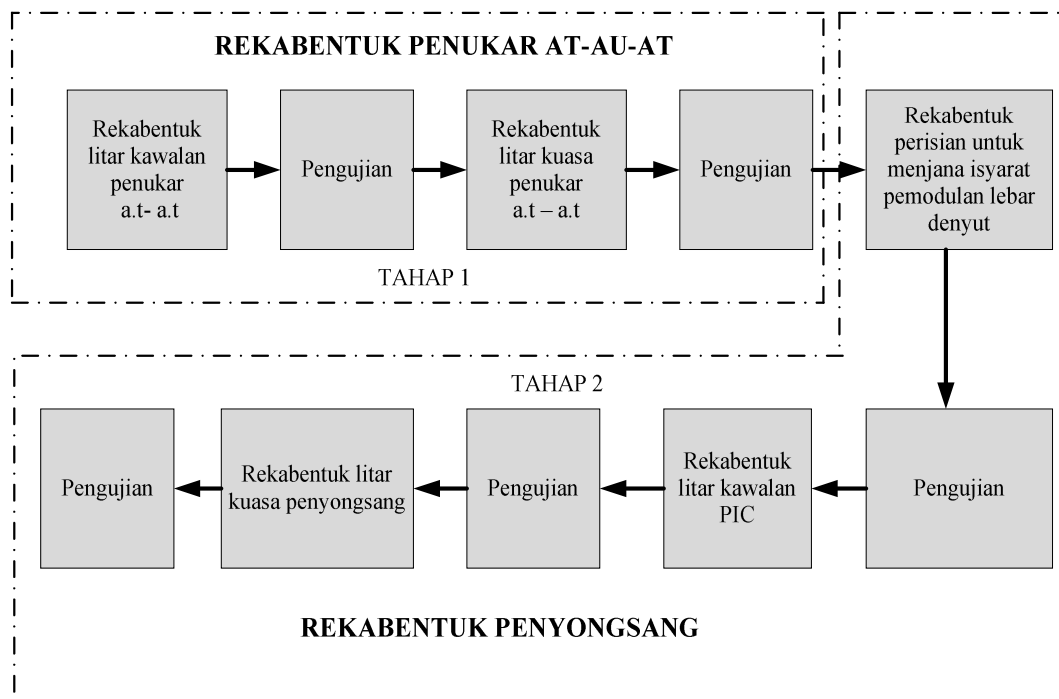
Penyelidikan yang dilakukan adalah berdasarkan kepada skop berikut:-

- Penyongsang yang dibina akan menghasilkan keluaran satu fasa sahaja.
- Produk yang dihasilkan hanyalah dalam bentuk prototaip sahaja.
- Penyongsang yang dihasilkan adalah jenis sendiri dan bukannya untuk tujuan sambungan ke talian grid.
- Pengujian prestasi penyongsang dilakukan berdasarkan kepada sumber masukan bateri dan beban lurus seperti rintangan tulen pada kadaran kuasa 700 W sahaja.

1.4 Metodologi

Rajah 1.1 menerangkan metodologi yang digunakan dalam kajian ini. Ianya mengandungi 2 tahap utama iaitu merekabentuk penukar a.t - a.t dan merekabentuk penyongsang satu fasa pemodulatan lebar denyut.

Tahap pertama kajian ini ialah merekabentuk satu prototaip penukar a.t - a.t yang mana ianya berfungsi untuk menaikkan dan mengatur voltan a.t yang dihasilkan oleh bateri daripada 24 – 32 V kepada 400 V.



Rajah 1.1 Metodologi penyelidikan

Pada tahap kedua satu penyongsang satu fasa jenis tetimbang penuh direkabentuk untuk menukar voltan daripada penukar a.t - a.t kepada voltan a.u sinusoidal 240 V_{rms} dan berfrekuensi 50 Hz bersesuaian dengan keperluan penggunaan harian pengguna di Malaysia. Keluaran penyongsang ini boleh

digunakan sebagai bekal kuasa kepada peralatan-peralatan elektrik di rumah ataupun diubahsuai untuk kegunaan sambungan ke talian grid.

Sebelum perkakasan dibangunkan, penyelakuan terlebih dahulu dilaksanakan menggunakan perisian PESIM untuk litar penukar dan penyongsang, manakala Simulator MPLAB IDE untuk penyelakuan PIC. Ini adalah bertujuan untuk menjangkakan keputusan yang akan diperolehi bagi setiap tahap rekabentuk tersebut.

Setelah rekabentuk penukar dan penyongsang ini direka, pengujian dilaksanakan untuk mengesahkan ciri-ciri sistem yang telah direkabentuk. Pengujian ini adalah tertakluk kepada tujuan untuk menentukan ciri-ciri dan prestasi sistem tersebut seperti menentukan kandungan harmonik pada voltan dan arus pada keluaran, kemampuan kuasa yang dihasilkan, kecekapan dan juga dari segi ketahanan pada penyongsang tersebut.

1.5 Tinjauan Tesis

Secara keseluruhannya, tesis ini mengandungi lima bab. Bab 1 memberi penerangan ringkas mengenai penyelidikan yang akan dilakukan. Penerangan ini merangkumi latar belakang pengenalan, objektif, pernyataan masalah dan skop penyelidikan serta metodologi penyelidikan. Kajian mengenai sistem penyongsang satu fasa pemodulatan lebar denyut dibincangkan dalam Bab 2. Dalam Bab ini, prinsip-prinsip asas, penemuan kajian terdahulu, beberapa topologi penukar dan penyongsang dibincangkan dengan terperinci.

Manakala dalam Bab 3 pula dibincangkan mengenai metodologi rekabentuk penukar dan penyongsang. Ini termasuklah dari segi penyelakuan, rekabentuk perisian dan perkakasan seperti rekabentuk litar kawalan, litar kuasa, pemilihan

topologi yang sesuai dibincangkan dengan terperinci. Dalam bab ini juga dibincangkan mengenai kaedah merekabentuk alatubah frekuensi tinggi yang digunakan dalam penukar a.t - a.t.

Semua keputusan pengujian yang dilakukan terhadap sistem penyongsang prototaip dihuraikan dalam Bab 4. Dalam bab ini, perbandingan dibuat antara keputusan yang diperolehi dari penyelakuan dengan keputusan yang diperolehi dari pengujian yang dijalankan di makmal. Analisa bagi keputusan-keputusan ini dijalankan berasaskan kepada teori-teori yang ada.

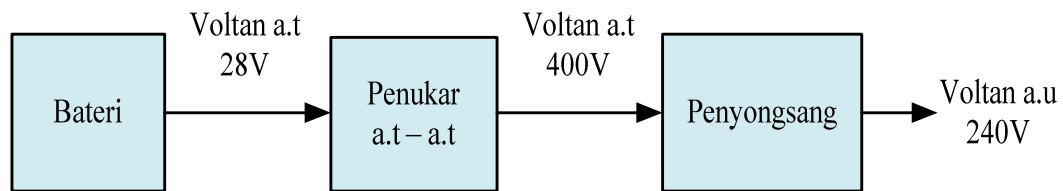
Bab 5 adalah tentang kesimpulan keseluruhan kajian yang telah dijalankan daripada proses rekabentuk sehingga menghasilkan prototaip. Bab ini juga menyelitkan beberapa cadangan berkaitan penyelidikan yang telah dijalankan bagi membolehkan kesinambungan penyelidikan ini dapat dilakukan.

BAB 2

SISTEM PENYONGSANG SATU FASA

2.1 Pengenalan

Fungsi utama penyongsang ialah untuk menukar kuasa a.t kepada kuasa a.u (Karasavvas, 2008). Untuk memperolehi voltan keluaran 240 V_{rms} pada keluaran, penyongsang memerlukan voltan masukan a.t sekurang-kurangnya 400 V_{a.t}. Walaubagaimanapun, kebanyakan nilai voltan masukan a.t seperti dari punca bateri adalah rendah. Dengan ini voltan tersebut perlu ditingkatkan terlebih dahulu menggunakan penukar a.t - a.t sebelum disambungkan kepada penyongsang. Cara kerja sistem penyongsang ini boleh ditunjukkan oleh Rajah 2.1.



Rajah 2.1. Gambarajah blok sistem penyongsang.

Dalam bab ini terdapat empat bahagian akan dibincangkan iaitu bahagian 2.2 membincangkan mengenai kajian-kajian terdahulu mengenai penyongsang, bahagian 2.3 membincangkan khusus mengenai penukar a.t - a.t manakala bahagian 2.4 membincangkan mengenai penyongsang dan mikropengawal PIC dibincangkan dalam bahagian 2.5.

2.2 Kajian-kajian Terdahulu

Kajian dan pembangunan terhadap penyongsang berkembang pesat seiring dengan perkembangan masa dan teknologi. Kini, peranti-peranti elektronik kuasa semakin kecil berbanding dengan kuasa yang dapat dihasilkan (Ross, 1997). Dengan ini, kecekapan dan prestasi penyongsang dapat dipertingkatkan dari masa ke semasa dari aspek saiz, berat, teknik pensuisan, profil harmonik, kehilangan pensuisan peranti, dan kos keseluruhan sistem. Terdapat juga para penyelidik yang telah menyelidik penyongsang satu fasa dan tiga fasa sebelum ini menggunakan pelbagai topologi dan kaedah pensuisan yang digunakan.

Hadzer et al. (2005) telah melakukan penambahbaikan dan pengubahsuaian rekabentuk pensuisan penyongsang satu fasa untuk aplikasi photovoltan menggunakan teknik kawalan pensuisan yang mudah. Strategi pensuisan yang digunakan adalah berasaskan perbandingan antara gelombang segitiga dengan dua gelombang sinus dengan beza fasa 180° untuk menjana isyarat pensuisan SPWM. Kaedah pensuisan sebegini dikatakan dapat memanjangkan hayat peranti suis kuasa dan kecekapan tinggi. Dari keputusan simulasi dan eksperimen menunjukkan rekabentuk pensuisan dapat meminimalkan kehilangan pensuisan di samping dapat meningkatkan kecekapan sistem sehingga 90% dan jumlah kandungan harmonik arus kurang dari 3% dan voltan 0.9%.

Soib et al. (2002) telah merekabentuk penyongsang PWM satu fasa 1.5kW untuk aplikasi sambungan grid dari bekalan terus sel photovoltan. Pembangunan prototaip penyongsang ini menggunakan litar kawalan litar bersepadu digital di mana penjanaan gelombang sinus dijana oleh dua pembilang binari 4015 dikonfigurasi sebagai pembilang gelang manakala gelombang segitiga dijana oleh

pembilang binari 4024 7-bit. Kedua-dua isyarat keluaran digital ditukarkan kepada isyarat analog kuasi (*quasi*) menggunakan rangkaian tangga R-2R. Menurut beliau rekabentuk litar kawalan ini lebih mudah dan penjanaan isyarat digital menawarkan kestabilan yang tinggi pada frekuensi, amplitud dan offset kosong. Hasil dari ujikaji menunjukkan bahawa bentuk gelombang keluaran adalah berbentuk sinus dan nilai THD 2.7 %.

Katsunori et al. (1988) merekabentuk penyongsang pemodulatan lebar denyut sinusoidal menggunakan MOSFET dengan nisbah frekuensi pembawa terhadap frekuensi keluaran yang tinggi. Hasilnya komponen harmonik asas meningkat sebanyak 15% berbanding dengan penyongsang konvensional. Pensuisan pada frekuensi tinggi akan menambahkan lagi kehilangan pensuisan. Walaupun kehilangan pensuisan adalah kecil jika dibandingkan dengan kehilangan keseluruhan penyongsang namun ianya akan menjana haba pada penyongsang tersebut.

Ray-Shyang et al. (1995) mempersembahkan kaedah pemodulatan lebar denyut hibrid yang mana hanya memerlukan dua daripada empat peranti suis pada penyongsang tetimbang penuh untuk beroperasi pada frekuensi tinggi boleh mengurangkan dengan ketara kehilangan pensuisan pada peranti. Didapati teknik ini dapat meningkatkan kecekapan penyongsang tanpa mengorbankan kualiti gelombang voltan dan arus keluaran penyongsang tersebut.

Suriyaarachchi et al. (2003) telah menggunakan mikropengawal seperti PIC16F876/873 untuk menjanakan isyarat pensuisan PWM. Teknik yang digunakan ialah membina penyongsang berbilang mod yang mana isyarat pensuisan dijana menggunakan perisian. Ia boleh mengurangkan bilangan komponen yang diperlukan. Penyongsang yang dibina boleh menghasilkan keluaran pada voltan dan frekuensi

yang boleh dilaraskan. Pengguna boleh memilih mod penyongsang, frekuensi, nilai voltan keluaran menggunakan perisian antaramuka. Perisian yang digunakan dalam projek ini adalah perisian Visual Basic.

Narong et al. (2005) menggunakan DSP TMS320F241 sebagai alat untuk menjana isyarat ekakutub PWM dan digunakan pada penyongsang ekakutub satu fasa. Isyarat ekakutub PWM ini dijana oleh penjana PWM pada DSP TMS320F241 dengan membandingkan isyarat rujukan sinusoidal dengan gelombang segitiga. Pendaftar pembilang 16 bit digunakan untuk mengukur frekuensi gelombang segitiga. Daripada pengujian yang dilakukan didapati teknik ini boleh menghasilkan keluaran penyongsang berbentuk sinusoidal 220V dengan frekuensi 50 Hz pada kadar kuasa 1.5 kW. Frekuensi pensuisan yang digunakan adalah 7.5 kHz.

Makato & Toshihisha (2000) menerangkan mengenai penyongsang berkuasa tinggi PWM bersiri dengan penapis aktif. Peranti suis berkelajuan rendah dengan keupayaan voltan tinggi seperti IGBT digunakan sebagai peranti pensuisan penyongsang bersama dengan penapis aktif. Penapis LC dipasang untuk menghilangkan komponen harmonik pada frekuensi berhampiran dengan frekuensi pemodulatan. Komponen asas dikawal menggunakan sistem kawalan gelung tertutup, manakala komponen harmonik dikawal atau dibatalkan menggunakan penapis aktif.

Daripada pengujian yang dijalankan didapati penggunaan penapis aktif bersiri dengan penyongsang PWM dapat menjadikan sistem kawalan arus lebih stabil terhadap penyongsang PWM kuasa tinggi dan juga boleh mengurangkan harmonik pada arus keluaran. Walaubagaimanapun pemasangan penapis LC boleh

menyebabkan berlakunya tindakbalas ayunan pada gelung kawalan arus pada penyongsang tersebut.

Maamoun & Ahmed (1995) telah memilih rekabentuk penyongsang menggunakan kawalan digital untuk sistem pemacu pelarasan halaju. Rekabentuk penyongsang ini menggunakan pengawal mikro 8088 untuk menjana isyarat PWM bersama pot masukan/keluaran bolehaturcara (PIO), pemasa jeda bolehaturcara (PIT), pengawal sampuk bolehaturcara dan penukar analog-digital (ADC). Menurut beliau, rekabentuk penyongsang ini berkos tinggi dan begitu kompleks terutama litar kawalan digital, pengasingan isyarat dan litar perlindungan setiap peranti IGBT.

Rahman et al. (2002) menerangkan penghasilan isyarat pemodulatan lebar denyut berasaskan mikropemproses 8085 bersama pengantaramuka 8155, pembilang 8 bit dan juga EPROM 27512 untuk kegunaan penyongsang voltan dan frekuensi bolehlaras. Isyarat asas sinusoidal disampel pada frekuensi pembawa tetap 3kHz. EPROM digunakan untuk menyimpan 256 lebar denyut yang berbeza. Perisian dibangunkan menggunakan bahasa penghimpun untuk menghasilkan isyarat pemodulatan lebar denyut sinusoidal berdasarkan paten yang disimpan dalam EPROM pada indeks pemodulatan 75% dan 25%. Litar kawalan yang dibina menggunakan beberapa peranti digital lain sebagai tambahan seperti penyelak 74373, pembilang CD4040, pemasa 555 dan dua get DAN 7408. Menurut beliau litar kawalan ini lebih mudah dan boleh menghasilkan isyarat PWM yang lebih tepat berbanding dengan litar yang konvensional. Ia juga boleh dikembangkan untuk menjana isyarat PWM untuk penyongsang 3 fasa.

Menurut Ismail et al. (2007), yang menjalankan kajian mengenai implimentasi mikropengawal Atmel AT89C2051-24PI untuk strategi pensuisan

penyongsang mendapati pensuisan dengan mod pemodulatan lebar denyut sinusoidal pada frekuensi 2 kHz dengan indeks pemodulatan pada 1.3 dapat mengurangkan THD voltan dan arus keluaran kepada kurang 3%. Nilai THD ini diukur pada keluaran selepas melalui penapis LC. Beliau juga berpendapat bahawa dengan menggunakan mikropengawal ini akan mengurangkan keperluan terhadap perkakasan disamping dapat menambah fungsi pengawal dengan hanya memerlukan sedikit modifikasi terhadap perisian. Menggunakan mikropengawal, amplitud, indeks pemodulatan dan kitar kerja pensuisan dapat diubahsuai dengan mudah tanpa perlu mengubah perkakasan yang digunakan.

2.3 Penukar a.t - a.t

Terdapat banyak pilihan topologi penukar yang ada untuk tujuan penukar kuasa ini. Walaubagaimanapun pemilihan yang betul dan tepat perlu dipertimbangkan. Pertimbangan yang perlu diambilkira adalah seperti keperluan kuasa, anggaran kos dan juga betapa kompleksnya penukar yang digunakan (Rashid, 2004). Secara umumnya, litar penukar kuasa boleh dikelaskan kepada empat kategori iaitu, penukar a.u-a.u, penukar a.t - a.t, penukar a.t - a.u dan penukar a.u - a.t. Semua penukar ini boleh dibina dengan kawalan gelung terbuka ataupun gelung tertutup. Penukar dengan kawalan gelung tertutup dapat menghasilkan keluaran yang teratur walaupun terdapat gangguan pada beban jika dibandingkan dengan penukar kawalan gelung terbuka yang keluarannya akan berubah jika berlaku perubahan terhadap beban ataupun masukan. Namun demikian penukar dengan kawalan gelung tertutup adalah lebih kompleks dari segi binaannya.

Dalam bab ini, penukar yang akan dibincangkan adalah penukar a.t - a.t yang berfungsi untuk menukar paras voltan masukan a.t kepada nilai yang sesuai. Secara umumnya, penukar a.t - a.t juga dikenali sebagai bekalan kuasa dan ianya boleh dibahagikan kepada dua kategori iaitu :-

- a. Bekalan kuasa lurus (*linear power supply*)
- b. Bekalan kuasa mod pensuisan (*switched mod power supply*)

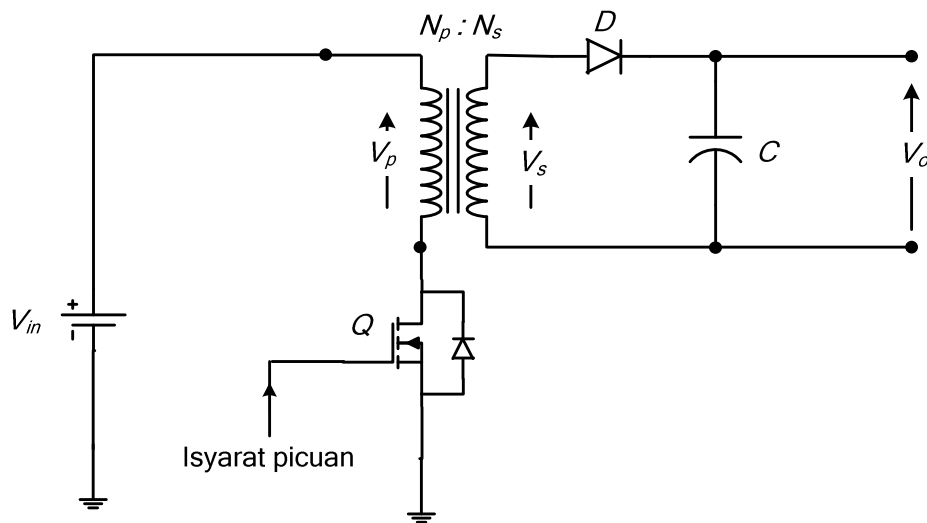
Bekalan kuasa lurus biasanya digunakan pada litar-litar berkuasa rendah dan juga mempunyai kecekapan yang rendah, dalam kes ini penjaanaan haba yang tinggi dan juga saiz yang besar tidak mendatangkan masalah. Kos pembinaan yang murah dan masa rekabentuk yang singkat menjadikan bekalan kuasa jenis ini popular kepada litar-litar mudah dan berkuasa rendah.

Manakala bekalan kuasa mod pensuisan pula dapat dibina pada saiz yang lebih kecil berbanding dengan kuasa yang dapat dihasilkannya. Ianya juga mempunyai kecekapan yang lebih tinggi berbanding dengan bekalan kuasa lurus. Namun demikian dari segi rekabentuk ianya adalah lebih sukar. Namun demikian dengan adanya peranti-peranti yang berkelajuan tinggi dan juga dengan bantuan perisian-perisian canggih yang ada, masalah tersebut dapat diatasi. Bahkan rekabentuk ini mampu menjadikan bekalan kuasa mod pensuisan lebih popular walaupun untuk kegunaan kuasa rendah. Contoh bekalan kuasa ini adalah seperti penukar Buck, Boost, Buck-Boost dan Cuk yang berkecekapan tinggi, fleksibel dan juga mempunyai saiz yang kecil (Cuk & Middlebrook, 1977).

2.3.1 Penukar Terbang Balik (*Flyback Converter*)

Litar asas bagi penukar terbang balik adalah seperti yang ditunjukkan oleh Rajah 2.2. Penukar ini beroperasi seperti penukar buck-boost, tetapi menggunakan alatubah terbang balik (*flyback transformer*) sebagai penyimpan tenaga menggantikan peraruh tunggal. Tidak seperti alatubah ideal, arus pada alatubah ini tidak mengalir serentak pada gelung primer dan sekunder tetapi ia mengalir secara bergilir-gilir diantara gelung primer dan skunder.

Merujuk kepada Rajah 2.2, semasa MOSFET Q tertutup, Diod D berkeadaan pincang songsang. Pada masa ini gelung primer bertindak sebagai peraruh, tenaga dari V_{in} disimpan sebagai medan magnet. Bila Q terbuka, arus pada gelung primer akan mengurang secara mendadak. Arus pemagnetan yang terjana pada gelung sekunder akan menjadikan diod D pincang hadapan, maka tenaga yang tersimpan dalam alatubah ini dipindahkan ke beban.



Rajah 2.2 Penukar terbang balik

Penukar terbang balik biasanya digunakan sebagai bekalan kuasa voltan tinggi pada televisyen atau monitor komputer. Ianya juga biasa digunakan sebagai

bekalan kuasa pensuisan pada tahap kuasa yang rendah antara 50 W hingga 100 W. Kebaikan penukar jenis ini ialah ianya memerlukan binaan litar yang ringkas dengan bilangan komponen yang sedikit. Untuk mendapatkan keluaran yang berbilang, adalah amat mudah iaitu dengan hanya menambah gelung sekunder, diod dan pemuat pada keluaran. Namun demikian, jika dibandingkan dengan penukar dengan alatubah terasing (*transformer isolated converter*) seperti penukar tetimbang penuh, penukar ini mempunyai kekurangan iaitu pengaturan silang yang rendah (*poor cross regulation*) (Lu et al., 2008).

2.3.2 Penukar a.t - a.t Jenis Tolak-Tarik

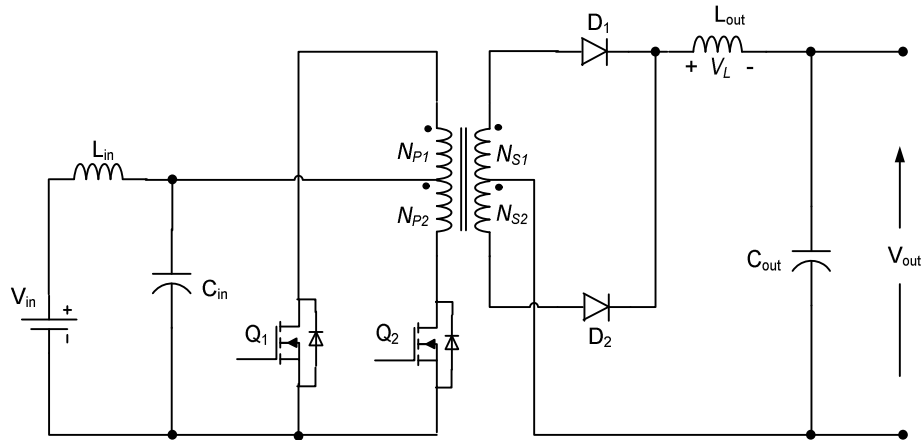
Rajah 2.3 menunjukkan litar penukar a.t - a.t jenis tolak-tarik. Penukar ini menggunakan dua suis yang terdiri daripada MOSFET Q_1 dan Q_2 . Ia menggunakan alatubah sebagai penskala voltan dan juga sebagai pengasing elektrik antara terminal masukan dan keluaran. Penukar jenis ini juga menggunakan peraruh keluaran, L_{out} sebagai penyimpan tenaga yang juga berfungsi sebagai penapis riak.

Satu perkara yang amat penting bagi penukar ini ialah pemilihan bahan teras dan juga bentuk geometri alatubah jenis tap-tengah yang digunakan supaya daya kemagnetan yang dihasilkan adalah seimbang pada kedua-dua gelung primer. Oleh kerana MOSFET Q_1 dan Q_2 berkongsi arus maka ianya boleh digunakan untuk menghasilkan kuasa yang agak besar berbanding dengan penukar kedepan (*forward converter*) (Batarseh, 2004).

Bagi penukar ini, setiap MOSFET yang digunakan perlu mampu menahan sekurang-kurangnya dua kali ganda voltan a.t masukan dan juga setiap diod D_1 dan

D_2 perlu mempunyai voltan puncak pincang songsang (*peak reverse voltage*)

sekurang-kurangnya bernilai $2 \frac{N_p}{N_s} V_{in}$.

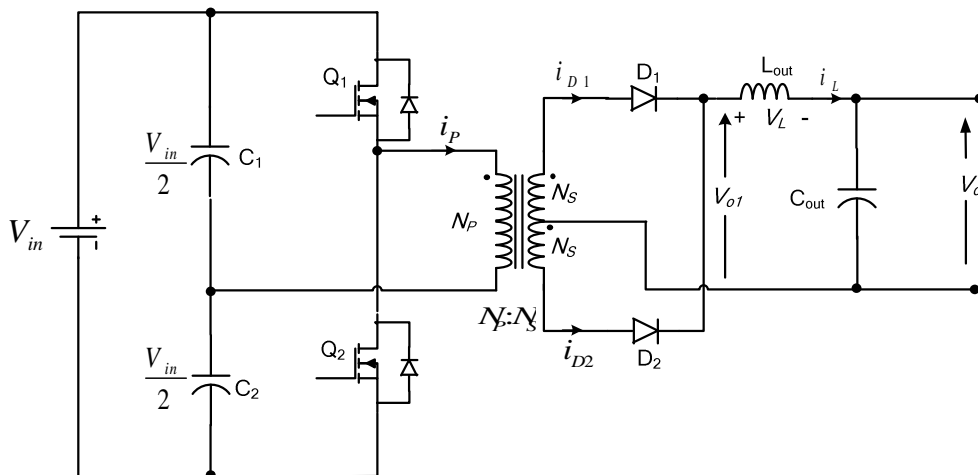


Rajah 2.3 Penukar a.t - a.t jenis tolak tarik

Satu kelemahan yang nyata pada penukar topologi ini ialah jika nilai voltan pada kedua-dua gelung primer tidak sama, akan menyebabkan berlakunya ketidakseimbangan pada arus pensuisan dan ini akan menyebabkan alatubah lebih mudah menjadi tepu (Torricono et al., 2008). Keadaan ini berlaku disebabkan oleh ketidaksepadanan pada ciri-ciri MOSFET yang digunakan seperti kejatuhan voltan ataupun nilai rintangan semasa tertutup, $R_{ds(ON)}$ yang tidak sama pada kedua-dua MOSFET yang digunakan. Keadaan ini boleh diatasi dengan bukan sahaja mengawal penukar ini dengan gelung kawalan voltan tetapi juga ditambah dengan gelung kawalan arus untuk mengelakan kecenderungan alatubah lebih cepat mengalami penepuan.

2.3.3 Penukar a.t - a.t Separuh Tetimbang

Penukar topologi ini menggunakan dua pemuat pada masukan untuk membahagikan voltan masukan a.t kepada dua sumber voltan yang mana setiap satunya bernilai separuh daripada voltan masukan asal. Merujuk kepada Rajah 2.4, voltan pada setiap pemuat masukan C_1 dan C_2 adalah bernilai $\frac{V_{in}}{2}$. MOSFET Q_1 dan Q_2 dihidupkan secara bergilir-gilir seperti juga dalam topologi tolak-tarik. Seperti juga dalam topologi tolak-tarik, MOSFET Q_1 dan Q_2 tidak boleh dihidupkan secara serentak untuk mengelakkan berlakunya litar pintas kepada voltan masukan, maka isyarat get perlu dijana supaya terdapat masa mati (*dead time*) semasa pertukaran tertutup/terbuka Q_1 dan Q_2 . Topologi ini dapat mengelakkan berlakunya penepuan pada teras alatubah kerana arus yang mengalir pada gelung primer sentiasa bertukar arah. Fluks magnet yang terhasil pada teras alatubah juga adalah dua arah dan oleh sebab itu ianya dapat digunakan pada kuasa yang lebih tinggi.



Rajah 2.4. Litar penukar a.t –a.t separuh tetimbang

Gandaan voltan bagi penukar topologi ini adalah sama seperti penukar tolak-tarik seperti yang dibincangkan dalam bahagian 2.3.2. Namun demikian tekanan voltan (*voltage stress*) pada MOSFET Q_1 dan Q_2 adalah lebih kecil iaitu sama dengan V_{in} berbanding $2V_{in}$ pada topologi tolak-tarik. Keburukannya ialah ia memerlukan dua pemuat pada masukan akan menaikkan kos rekabentuk dan saiz penukar lebih besar (Mohan et al., 2002 dan Rajarajeswari & Thanushkodi, 2008).

2.3.4 Penukar a.t - a.t Tetimbang Penuh

Penukar topologi ini menggunakan empat suis yang ditutup dan dibuka berpasangan secara bergilir-gilir iaitu pasangan Q_1, Q_3 dan Q_2, Q_4 . Topologi ini boleh menghasilkan kuasa melebihi 1kW dan binaan alatubahnya agak ringkas (Averberg et al., 2008). Kelebihan topologi ini ialah arus yang mengalir pada gelung primer dan sekunder adalah dalam dua arah. Oleh itu fluks yang dihasilkan boleh berada pada nilai maksimum iaitu dari $+B_{sat}$ kepada $-B_{sat}$. Tekanan voltan yang dikenakan kepada setiap suis adalah kecil iaitu sama dengan voltan masukan, V_{in} tidak seperti apa yang berlaku pada topologi tolak-tarik.

Namun begitu satu kekurangan yang ketara pada topologi ini ialah ianya memerlukan minimum empat suis dan ini akan meningkatkan kos rekabentuk. Oleh kerana bilangan suis yang diperlukan adalah besar, maka kehilangan pensuisan (*switching losses*) yang berlaku pada penukar topologi ini juga adalah lebih besar. Rajah 2.5 dan 2.6 menunjukkan masing-masing litar penukar tetimbang penuh dan gelombang voltan dan arus pada tetimbang tersebut. Merujuk kepada Rajah 2.6, kendalian penukar ini boleh diterangkan seperti berikut:-

Pada masa $t = 0$ hingga t_1 MOSFET Q_2, Q_4 tertutup manakala Q_1, Q_3 terbuka, maka voltan pada gelung primer $V_p = +V_{in}$ dan voltan pada gelung sekunder $V_s = -\frac{N_s}{N_p}V_{in}$. Masa $t = t_1$ hingga t_2 , pasangan MOSFET Q_1, Q_2 , terbuka dan pasangan Q_3, Q_4 tertutup, dengan ini $V_p = 0$ dan $V_s = 0$. Masa $t = t_2$ hingga t_3 pasangan MOSFET Q_1, Q_3 tertutup manakala Q_2, Q_4 terbuka menjadikan $V_p = -V_{in}$ dan $V_s = +\frac{N_s}{N_p}V_{in}$. Pada masa t_3 hingga t_4 , Q_1, Q_2 terbuka dan Q_3, Q_4 tertutup menjadikan $V_p = 0$ dan $V_s = 0$. Voltan putara keluaran, V_o , dengan mengandaikan kejatuhan voltan pada peraruh L dan diod D adalah sifar boleh ditentukan menggunakan persamaan berikut:-

$$V_o = \frac{2}{T} \int_0^t \frac{V_{in}}{\left(\frac{N_p}{N_s}\right)} dt \quad (2.1)$$

Di sini, $T =$ tempoh masa pensuisan atau $T = \frac{1}{f_s}$,

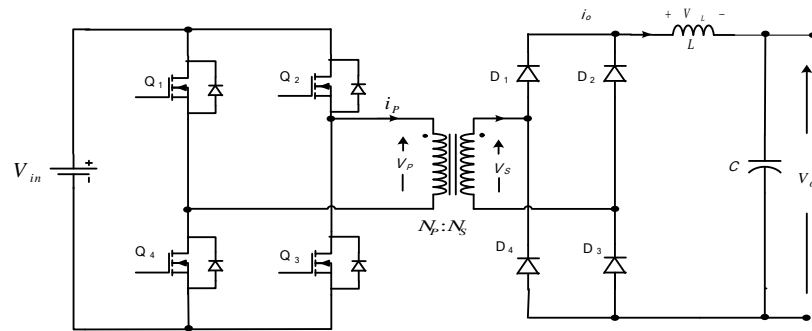
$\left(\frac{N_p}{N_s}\right) =$ nisbah lilitan alatubah frekuensi tinggi yang digunakan dan

$V_{in} =$ voltan masukan.

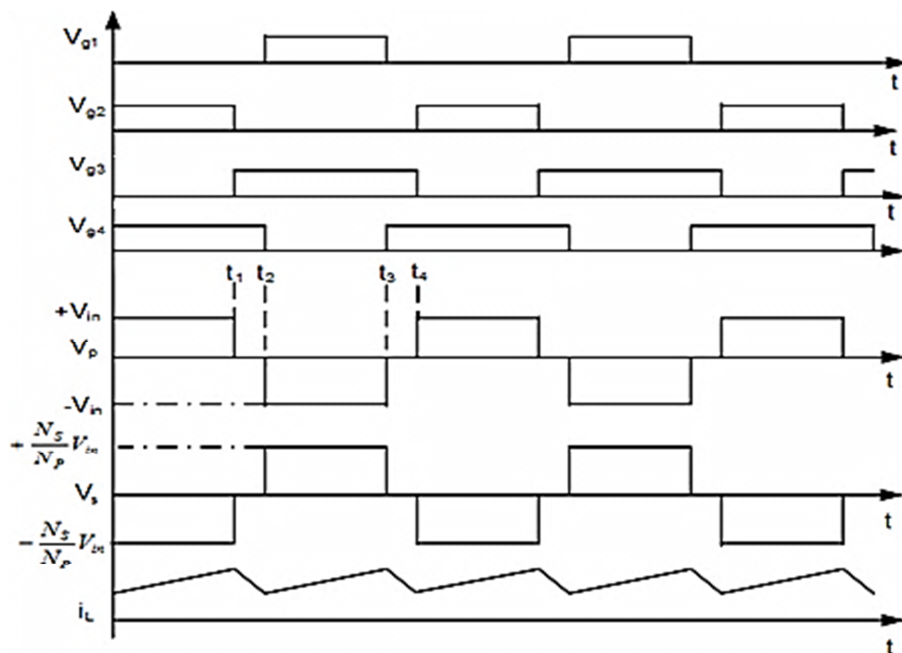
Menyelesaikan persamaan (2.1) pada masa 0 hingga t saat dan menggantikan kitar kerja $D = \frac{t}{T}$, maka persamaan voltan keluaran adalah:-

$$V_o = 2V_{in} \frac{N_s}{N_p} D \quad (2.2)$$

Dari persamaan (2.2), jika voltan masukan V_{in} dan nisbah lilitan alatubah, $\left(\frac{N_s}{N_p}\right)$ adalah tetap, maka voltan keluaran V_o adalah berkadar dengan kitar kerja MOSFET, D .



Rajah 2.5 Penukar topologi tetimbang penuh.



Rajah 2.6 Gelombang voltan dan arus bagi penukar pada Rajah 2.5

2.3.5 Pemilihan Topologi Penukar

Terdapat banyak pilihan topologi penukar, daripada topologi yang tiada pengasingan antara masukan dan keluaran seperti penukar boost dan cuk hinggalah