

**REKA BENTUK DAN IMPLEMENTASI
PENYONGSANG BERKASKAD PELBAGAI
PERINGKAT BERSUIS MINIMUM
MENGUNAKAN LITAR PEMAMPAS UNTUK
SISTEM PV**

TARMIZI

UNIVERSITI SAINS MALAYSIA

2018

**REKA BENTUK DAN IMPLEMENTASI
PENYONGSANG BERKASKAD PELBAGAI
PERINGKAT BERSUIS MINIMUM
MENGUNAKAN LITAR PEMAMPAS UNTUK
SISTEM PV**

oleh

TARMIZI

**Tesis yang diserahkan untuk
memenuhi keperluan bagi
Ijazah Doktor Falsafah**

September 2018

PENGHARGAAN

Terlebih dahulu saya bersyukur kehadiran Allah S.W.T kerana berkat rahmat dan kurniaNya telah memberikan kesihatan dan kekuatan kepada saya untuk dapat menjalankan dan menyiapkan projek ini.

Pada kesempatan ini saya merakamkan setinggi-tinggi penghargaan dan mengucapkan ribuan terima kasih kepada Prof. Madya. Dr. Soib bin Taib dan Dr. Mohd Khairunaz Bin Mat Desa, di atas segala bimbingan dan tunjuk ajar serta bantuan yang tak ternilai, selama saya menuntut ilmu di Universiti Sains Malaysia. Sekalung penghargaan juga saya ucapkan kepada kawan-kawan pelajar ijazah tinggi bidang elektrik kuasa di atas bantuan yang diberikan kepada saya. Penghargaan dan terima kasih juga diberikan kepada Dekan Pusat Pengajian Kejuruteraan Elektrik & Elektronik, dan kepada semua kakitangan di Pusat Pengajian Elektrik & Elektronik yang telah menyediakan segala kelengkapan dan memberikan bantuannya kepada saya.

Akhir sekali saya ucapkan terima kasih kepada isteri dan anak tercinta, di atas dorongan semangat, kesetiaan dan pengorbanan menunggu saya selama menuntut ilmu di Pusat Pengajian Kejuruteraan Elektrik dan Elektronik, USM Malaysia.

Kehadrat Allah saya mohonkan do'a semoga yang saya sebutkan diatas mendapat balasan amal dan limpahan rahmat atas segala keikhlasan. Semoga apa yang diperolehi daripada projek ini, dapat dikongsi bersama dan boleh digunakan untuk kepentingan bersama.

Amiinn ya rabbal alamiinn.

ISI KANDUNGAN

	Muka surat
PENGHARGAAN	ii
ISI KANDUNGAN	iii
SENARAI JADUAL	vi
SENARAI RAJAH	viii
SENARAI SIMBOL	xix
SENARAI SINGKATAN	xxii
ABSTRAK	xxiv
ABSTRACT	xxvi
BAB SATU: PENDAHULUAN	
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Penyataan Masalah	4
1.3 Objektif Penyelidikan	6
1.4 Metodologi	7
1.5 Skop Penyelidikan	8
1.6 Sumbangan Penyelidikan	9
1.7 Garis Panduan Tesis	9
BAB DUA: TINJAUAN ILMIAH	
2.1 Penyongsang	11
2.1.1 Ciri-ciri Pensuisan	12
2.1.2 Penyongsang pelbagai peringkat	15
2.1.3 Asas Penyongsang berkaskad pelbagai peringkat	20
2.1.4 Penukar dorongan	24
2.1.5 Harmonik	30
2.1.6 Fotovoltaik (PV)	36
2.2. Penyongsang Berkaskad Pelbagai peringkat Piranti Terkurang	40
2.2.1 Penyongsang pelbagai peringkat Rangkaian-DC (MLI-DC Link)	41
2.2.2 Penyongsang berkaskad pelbagai peringkat dengan suis minimum (CMLI-MNS)	45

2.2.3 Penyongsang pelbagai peringkat pensuisan sumber siri/selari (MLI-SSPS)	47
2.2.4 Penyongsang pelbagai peringkat pensuisan sumber sambungan siri (MLI-SCSS)	49
2.2.5 Penyongsang Modul pelbagai peringkat (MLM)	50
2.2.6 Penyongsang pelbagai voltan balikan (MLI-RV)	52
2.2.7 Penyongsang pelbagai peringkat dua suis aktif pada penjanaan peringkat (MLI-2SELG)	54
2.2.8 Penyongsang berkaskad pelbagai peringkat baru dengan bilangan pengaliran suis minimum (CMLI-MNCS)	56
2.4 Kesimpulan	61

BAB TIGA: METODOLOGI

3.1 Pengenalan	63
3.2 Penyongsang MSMLI-CC.	66
3.2.1 Topologi litar	67
3.2.3 Mod operasi litar MSMLI-CC	90
3.2.4 Voltan dan kuasa pada MSMLI-CC	94
3.2.5 Isyarat pensuisan	96
3.2.6 Nilai pemuat dalam litar CC	101
3.3 Penukar Dorongan	104
3.4 Sambungan PV	106
3.5 Kesimpulan	108

BAB EMPAT: REKA BENTUK DAN PELAKSANAAN

4.1 Reka bentuk Topologi MSMLI-CC	109
4.4.1 Litar simulasi	110
4.4.2 Litar uji kaji	114
4.2 Penukar Dorongan	123
4.2.1 Litar simulasi	124
4.2.2 Litar uji kaji	126
4.3 Sambungan Panel PV	132
4.3.1 Litar simulasi	132
4.3.2 Litar Uji kaji	135

4.4 Aplikasi MSMLI-CC pada PV	136
4.4.1 Litar Simulasi	137
4.4.2 Litar uji kaji	139
4.5 Kesimpulan	140

BAB LIMA: KEPUTUSAN DAN PERBINCANGAN

5.1 Pendahuluan	142
5.2 MSMLI-CC	143
5.2.1 Isyarat pensuisan pada penjanaan peringkat dan titi-H	143
5.2.2 Beban rintangan	148
5.2.3 Beban induktif	163
5.2.4 Kesan perubahan voltan sumber ke atas THD dan voltan keluaran	185
5.3 Penukar dorongan	209
5.4 Susunan panel PV	215
5.5 Pelaksanaan MSMLI-CC pada PV	219
5.5.1 Berbeban perintang	220
5.5.2 Beban induktif	229
5.5.3 Beban lampu pijar	243
5.5.4 Beban lampu kalimantang	248
5.6 Kesimpulan	254

BAB ENAM: KESIMPULAN DAN CADANGAN

6.1 Kesimpulan	258
6.2 Sumbangan Penyelidikan	259
6.3 Cadangan untuk Penyelidikan Masa Depan	260

SENARAI RUJUKAN	261
------------------------	-----

LAMPIRAN

A: Senarai Program Modul PC

C: Litar MSMLI-CC Kompleks.

D: Gelombang Voltan, Arus dan THD pada Lampu Kalimantan

SENARAI JADUAL

Muka surat

Jadual 2.1	Urutan urutan suis hidup atau mati	18
Jadual 2.2	Urutan suis hidup atau mati penyongsang berkaskad 9 peringkat	21
Jadual 2.3	Piawai pelepasan arus harmonik ganjil IEC 61000-3-2	35
Jadual 2.4	Piawai pelepasan arus harmonik genapl IEC 61000-3-2	35
Jadual 2.5	Urutan pensuisan penjanaan peringkat	45
Jadual 2.6	Urutan pensuisan titi-H	46
Jadual 2.7	Urutan operasi suis MLI-SCSS 7 peringkat	49
Jadual 2.8	Susunan pensuisan pada penjana peringkat MLM [7]	51
Jadual 2.9	Urutan pensuisan penjanaan peringkat	53
Jadual 2.10	Urutan pensuisan penjanaan peringkat [7]	55
Jadual 2.11	Perbandingan CMLI-RDC	59
Jadual 3.1	Parameter keluaran MSMLI	64
Jadual 3.2	Parameter reka bentuk penukar dorongan	65
Jadual 3.3	Sambungan panel PV	66
Jadual 3.4	Bilangan gabungan sumber A.T asimetri	67
Jadual 3.5	Urutan pensuisan MSMLI-CC pada penjanaan peringkat	72
Jadual 3.6	Voltan sumber VS	95
Jadual 3.7	Darjah isyarat pensuisan untuk penjanaan peringkat	98
Jadual 3.8	Lebar darjah isyarat pensuisan untuk penjanaan peringkat	100
Jadual 3.9	Lebar denyutan isyarat pensuisan untuk suis S1~S4	101
Jadual 3.10	Kiraan pemuat dan suis(geganti) yang hidup (Pengaliran)	103
Jadual 3.11	Voltan penukar dorongan	105
Jadual 3.12	Spesifikasi PV SPM100-M	106
Jadual 3.13	Data sambungan PV	107
Jadual 4.1	Parameter Mosfet IRFP460	115
Jadual 4.2	Parameter diod MUR 1560	116
Jadual 4.3	Nalai komponen snubber	116
Jadual 4.4	Parameter geganti Songle	118
Jadual 4.5	Data bagi pensuisan transformer	121
Jadual 4.6	Lilitan pensuisan transformer	122

Jadual 4.7	Kadar nilai kawalan	125
Jadual 4.8	Nilai VS dan RL	126
Jadual 4.9	Komponen litar kuasa pada penukar dorongan	128
Jadual 4.10	Nilai R1, R2 dan R3 pada litar penderia	130
Jadual 4.11	Nilai arus, voltan dan kuasa pada litar M1~M4	134
Jadual 4.12	Kadaran parameter PV susunan ME1-ME4	139
Jadual 5.1	Data simulasi topologi MSMLI-CC beban R	155
Jadual 5.2	Keputusan uji kaji untuk beban perintang	157
Jadual 5.3	Keputusan simulasi MSMLI-CC pada beban induktif	170
Jadual 5.4	Keputusan uji kaji MSMLI pada beban Induktif	180
Jadual 5.5	Keputusan simulasi perubahan voltan sumber pada beban 600W	194
Jadual 5.6	Keputusan uji kaji bagi perubahan voltan sumber, beban 600 watt	204
Jadual 5.7	Data penukar dorongan VS1	209
Jadual 5.8	Data penukar dorongan VS2	210
Jadual 5.9	Data penukar dorongan VS3	210
Jadual 5.10	Data penukar dorongan VS4	211
Jadual 5.11	Data hasil simulasi susunan M1	215
Jadual 5.12	Data hasil simulasi susunan M2	216
Jadual 5.13	Data hasil simulasi susunan M3	216
Jadual 5.14	Data hasil simulasi susunan M4	217
Jadual 5.15	Keputusan simulasi pelaksanaan MSMLI-CC pada PV untuk beban R	223
Jadual 5.16	Keputusan MSMLI-CC sambungan PV untuk beban R	227
Jadual 5.17	Keputusan simulasi MSMLI-CC sambungan PV beban induktif	233
Jadual 5.18	Keputusan uji kaji MSMLI-CC sambungan PV untuk beban induktif	240
Jadual 5.19	Keputusan uji kaji beban lampu pijar	246
Jadual 5.20	Nisbah MSMLI-CC dengan CMLI-RDC hasil kajian semula	255
Jadual 5.21	Nisbah kecekapan penyongsang aplikasi PV	257

SENARAI RAJAH

Muka surat

Rajah 2.1	Ciri-ciri pensuisan (a) Model litar suis (b) Gelombang pensuisan	14
Rajah 2.2	Konsep sintesis gelombang penyongsang pelbagai peringkat	16
Rajah 2.3	Bentuk gelombang MLI 9 peringkat (a) Gelombang keluaran VO (b) Gelombang keluaran h-brige	17
Rajah 2.4	Klasifikasikan penyongsang	17
Rajah 2.5	Topologi penyongsang kapit-diod 5 peringkat	18
Rajah 2.6	Gelombang keluaran penyongsang kapit-diod 5 peringkat	19
Rajah 2.7	Topologi MLI pemuat-terbang	19
Rajah 2.8	Topologi penyongsang berkaskad 9 peringkat	20
Rajah 2.9	Gelombang keluaran penyongsang berkaskad 9 peringkat	21
Rajah 2.10	Klasifikasi penyongsang berkaskad pelbagai peringkat	22
Rajah 2.11	Topologi litar penukar dorongan	24
Rajah 2.12	Mod Operasi penukar dorongan (a) Masa t_{on} (b) Masat _{off}	24
Rajah 2.13	Gelombang penukar dorongan (a) Voltan pada peraruh (b) Arus dalam peraruh (c) Arus dalam diod (d) Arus dalam pemuat (e) Voltan pada pemuat (f) Arus keluaran	25
Rajah 2.14	RGandaan terhadap kitar tugas	27
Rajah 2.15	Hubungan kecakapan dan kitar tugas	28
Rajah 2.16	Gelombang herotan (a) Gelombang sinusoidal terherot (b) Gelombang tempoh frekuensi asas dan frekuensi berganda	33
Rajah 2.17	Spektrum harmonik	34
Rajah 2.18:	Litar setara sel suria	37
Rajah 2.19	Sistem MPPT pada PV	39
Rajah 2.20	Ciri-ciri MPPT	39
Rajah 2.21	Klasifikasikan MLI-RDC	40
Rajah 2.22	Topologi MLDCCL penyongsang	42
Rajah 2.23	Gelombang keluaran penyongsang MLDCCL [47]	43
Rajah 2.24	Litar uji kaji penyongsang MLDCCL [8]	44
Rajah 2.25	Topologi CMLI suis minimum [9]	45
Rajah 2.26	Litar MLI suis minimum [9]	46

Rajah 2.27	Topologi pensuisan MLI sumber siri/selari [10] (a)Topologi (b) Litar uji kaji	47
Rajah 2.28	Isyarat pensuisan dan bentuk geombang titi-H [10] (a)Isyarat pensuisan HM (b) Gelombang v_{bus1} , v_{bus2} dan v_{bus}	48
Rajah 2.29	Topologi MLI-SCSS 7 peringkat [11]	49
Rajah 2.30	Topologi MLM [12] (a) Litar (b) Gelombang keluaran	50
Rajah 2.31	Topologi litar MLM 11 peringkat [7]	51
Rajah 2.32	Penyongsang balikan voltan (MLI-RV) 7 peringkat [13]	52
Rajah 2.33	Isyarat pensuisan pada penjanaan peringkat [13]	53
Rajah 2.34	Topologi asas MLI-2SELG [14]	54
Rajah 2.35	Topologi MLI-2SELG [7]	55
Rajah 2.36	Topologi litar CMLI-MNCS 41 peringkat [51]	57
Rajah 3.1	Carta alir reka bentuk dan aplikasi MSMLI-CC suis minimum menggunakan litar pemampas pemuat	64
Rajah 3.2	Topologi litar MSMLI-CC	68
Rajah 3.3	Topologi litar pemuat pemampas (CC)	69
Rajah 3.4	Algoritma kawalan isyarat litar pemuat pemampas	70
Rajah 3.5	Mod 1~3 operasi topologi MSMLI (a) Pengaliran untuk tempoh $t_0 \sim t_1$ (mod 1) (b) Keluaran untuk tempoh $t_0 \sim t_1$ (c) Pengaliran untuk tempoh $t_1 \sim t_2$ (mod 2) (d) Keluaran untuk tempoh $t_0 \sim t_2$ (e) Pengaliran untuk tempoh $t_2 \sim t_3$ (mod 3) (f) Keluaran untuk tempoh $t_0 \sim t_3$	73
Rajah 3.6	Mod 4~6 operasi topologi MSMLI (a) Pengaliran untuk tempoh $t_3 \sim t_4$ (mod 4) (b) Keluaran untuk tempoh $t_0 \sim t_4$ (c) Pengaliran untuk tempoh $t_4 \sim t_5$ (mod 5) (d) Keluaran untuk tempoh $t_0 \sim t_5$ (e) Pengaliran untuk tempoh $t_5 \sim t_6$ (mod 6) (f) Keluaran untuk tempoh $t_0 \sim t_6$	75
Rajah 3.7	Mod 7~9 operasi topologi MSMLI (a) Pengaliran untuk tempoh $t_6 \sim t_7$ (mod 7) (b) Keluaran untuk tempoh $t_0 \sim t_7$ (c) Pengaliran untuk tempoh $t_7 \sim t_8$ (mod 8) (d) Keluaran untuk tempoh $t_0 \sim t_8$ (e) Pengaliran untuk tempoh $t_8 \sim t_9$ (mod 9) (d) Keluaran untuk tempoh $t_0 \sim t_9$	77
Rajah 3.8	Mod 10~12 operasi topologi MSMLI (a) Pengaliran untuk tempoh $t_9 \sim t_{10}$ (mod 10) (b). Keluaran untuk tempoh $t_0 \sim t_{10}$	78

	(c) Pengaliran untuk tempoh $t_{10}\sim t_{11}$ (mod 11) (d) Keluaran untuk tempoh $t_0\sim t_{11}$ (e) Pengaliran untuk tempoh $t_{11}\sim t_{12}$ (mod 12) (d) Keluaran untuk tempoh $t_0\sim t_{12}$	
Rajah 3.9	Mod 13~15 operasi topologi MSMLI (a) Pengaliran untuk tempoh $t_{12}\sim t_{13}$ (mod 13) (b) Keluaran untuk tempoh $t_0\sim t_{13}$ (c) Pengaliran untuk tempoh $t_{13}\sim t_{14}$ (mod 14) (d) Keluaran untuk tempoh $t_0\sim t_{14}$ (e) Pengaliran untuk tempoh $t_{14}\sim t_{15}$ (mod 15) (d) Keluaran untuk tempoh $t_0\sim t_{15}$	80
Rajah 3.10	Mod 16~18 operasi topologi MSMLI (a) Pengaliran untuk tempoh $t_{15}\sim t_{16}$ (mod 16) (b) Keluaran untuk tempoh $t_0\sim t_{16}$ (c) Pengaliran untuk tempoh $t_{16}\sim t_{17}$ (mod 17) (d) Keluaran untuk tempoh $t_0\sim t_{17}$ (e) Pengaliran untuk tempoh $t_{17}\sim t_{18}$ (mod 18) (d) Keluaran untuk tempoh $t_0\sim t_{18}$	81
Rajah 3.11	Mod 19~21 operasi topologi MSMLI (a) Pengaliran pada tempoh $t_{18}\sim t_{19}$ (b) Keluaran untuk tempoh $t_{18}\sim t_{19}$ (c) Pengaliran untuk tempoh $t_{19}\sim t_{20}$ (d) Keluaran untuk tempoh $t_0\sim t_{20}$ (e) Pengaliran untuk tempoh $t_{20}\sim t_{21}$ (d) Keluaran untuk tempoh $t_{20}\sim t_{21}$	83
Rajah 3.12	Mod 22~24 operasi topologi MSMLI (a) Pengaliran untuk tempoh $t_{21}\sim t_{22}$ (mod 22) (b) Keluaran untuk tempoh $t_0\sim t_{22}$; (c) Pengaliran bagi tempoh $t_{22}\sim t_{23}$ (mod 23) (d) Keluaran untuk tempoh $t_0\sim t_{23}$ (e) Mod operasi selang masa $t_{23}\sim t_{24}$ (mod 24) (d) Keluaran untuk tempoh $t_0\sim t_{24}$	84
Rajah 3.13	Mod 25~27 operasi topologi MSMLI (a) Pengaliran untuk tempoh $t_{24}\sim t_{25}$ (mod 25) (b) Keluaran untuk tempoh $t_0\sim t_{25}$ (c) Pengaliran untuk tempoh $t_{25}\sim t_{26}$ (mod 26) (d) Keluaran untuk tempoh $t_0\sim t_{26}$ (e) Pengaliran untuk tempoh $t_{26}\sim t_{27}$ (mod 27) (d) Keluaran untuk tempoh $t_0\sim t_{27}$	86
Rajah 3.14	Mod 28~30 operasi topologi MSMLI (a) Pengaliran untuk tempoh $t_{27}\sim t_{28}$ (mod 28) (b) Keluaran untuk tempoh $t_0\sim t_{28}$ (c) Pengaliran untuk tempoh $t_{28}\sim t_{29}$ (mod 29) (d) Keluaran untuk tempoh $t_0\sim t_{29}$ (e) Pengaliran untuk tempoh $t_{29}\sim t_{30}$ (mod 30) (d) Keluaran untuk tempoh	87

Rajah 3.15	Mod 31 operasi topologi MSMLI (a) Pengaliran untuk tempoh $t_{32} \sim t_{62}$ (b) Keluaran untuk tempoh $t_{32} \sim t_{62}$	88
Rajah 3.16	Operasi Mod 13 (a) Pengaliran dalam tempoh $t_{32} \sim t_{36}$ (b) Gelombang keluaran	89
Rajah 3.17	Mod operasi untuk tempoh $t_0 \sim t_{62}$ (a) Gelombang V_{bus} (b) Gelombang keluaran	89
Rajah 3.18	Jumlah peringkat gelombang keluaran	90
Rajah 3.19	Gelombang keluaran dari topologi MSMLI	90
Rajah 3.20	Operasi topologi MSMLI-CC (a) Mod 1 untuk tempoh $t_0 \sim t_{0+\alpha}$, (b) Mod 2 untuk tempoh $t_{0+\alpha} \sim t_{15+\alpha}$, (c) Mod 3 untuk tempoh $t_{15+\alpha} \sim t_{31+\alpha}$, (d) Mod 4 untuk tempoh $t_{31+\alpha} \sim t_{45+\alpha}$, (d) Mod 5 untuk tempoh $t_{45+\alpha} \sim t_{62+\alpha}$	91
Rajah 3.21	Arus beban, arus Ibus dan arus CC	93
Rajah 3.22	Pensuisan peringkat penjanaan: (a) Isyarat untuk S_1 (b) Isyarat untuk S_2 (c) Isyarat untuk S_3 (d) Isyarat untuk S_4	96
Rajah 3.23	Isyarat pensuisan (a) Suis S_5 dan S_6 (b) Suis S_7 dan S_8	97
Rajah 3.24	Topologi penukar dorongan	105
Rajah 3.25	Panel PV (a) Susunan M_1 (b) Susunan M_2 (c) Susunan M_3 (d) Susunan M_4	107
Rajah 4.1	Gambarajah blok MSMLI-CC	109
Rajah 4.2	Litar simulasi MSMLI tanpa litar CC	111
Rajah 4.3	Paparan isyarat picuan blok get	111
Rajah 4.4	Blok C pada modul PC	112
Rajah 4.5	Litar simulasi MSMLI-CC	113
Rajah 4.6	Litar kuasa MSMLI-CC	114
Rajah 4.7	Litar pemacu dan penjanaan isyarat pensuisan	117
Rajah 4.8	Litar kuasa CC	118
Rajah 4.9	Litar kawalan CC dan penerima arus-voltan	119
Rajah 4.10	Litar bekalan kuasa SMPS	120
Rajah 4.11	Pengujian prototaip MSMLI-CC dimakmal	122
Rajah 4.12	Gambarajah blok penukar dorongan	123
Rajah 4.13	Litar simulasi penukar dorongan	124
Rajah 4.14	Algoritma kawalan suapbalik	125

Rajah 4.15	Litar uji kaji (a) Penukar dorongan 1 (b) Penukar dorongan 2 (c) Penukar dorongan 3 (d) Penukar dorongan 4	127
Rajah 4.16	Litar kawalan	131
Rajah 4.17	Algoritma kawalan isyarat PWM	132
Rajah 4.18	Sambungan susunan PV (a) Susunan M ₄ (b) Susunan M ₃ (c) Susunan M ₄ (d) Susunan M ₃	133
Rajah 4.19	Parameter modul bagi panel PV untuk simulasi PSIM	134
Rajah 4.20	Sambungan panel PV SPM100-M	135
Rajah 4.21	Pengujian PV susunan M ₁ ~M ₄	135
Rajah 4.22	Gambarajah blok aplikasi MLI-BC pada PV	136
Rajah 4.23	Litar simulasi aplikasi MLI pada PV	138
Rajah 4.24	Pengujian aplikasi MSMLI-CC pada PV	140
Rajah 5.1	Simulasi isyarat pensuisan pada peringkat penjanaan (a) Suis S ₁ (b) Suis S ₂ (c) Suis S ₃ (d) Suis S ₄	144
Rajah 5.2	Simulasi isyarat pensuisan pada titi-H (a) Suis S ₅ dan S ₆	145
Rajah 5.3	Isyarat pensuisan peringkat penjanaan (a) Suis S ₁ (b) Suis S ₂	145
Rajah 5.4	Isyarat pensuisan titi-H (a) Suis S ₅ dan S ₆ (b) Suis S ₇ dan S ₈	146
Rajah 5.5	Gelombang simulasi voltan V _{bus}	147
Rajah 5.6	Gelombang uji kaji voltan pada keluaran penjanaan peringkat	147
Rajah 5.7	Spektrum harmonik voltan and arus pada beban R= 574W	148
Rajah 5.8	Spektrum harmonik pada beban 574W (a) THDi (b) THDv	148
Rajah 5.9	Gelombang keluaran voltan dan arus pada beban R= 96W	149
Rajah 5.10	Spektrum harmonik pada beban R=96W (a) THDi (b) THDv	149
Rajah 5.11	Gelombang voltan dan arus pada beban R=48W	150
Rajah 5.12	Spektrum harmonik pada beban R=48W (a) THDi (b) THDv	150
Rajah 5.13	Gelombang uji kaji voltan dan arus pada beban R=574W	152
Rajah 5.14	Gelombang pada R=574W (a) Kuasa (b) Voltan dan arus	152
Rajah 5.15	Spektrum harmonik pada beban R=574W (a) THDi (b)THDv	153
Rajah 5.16	Gelombang voltan dan arus pada beban R=96W	153
Rajah 5.17	Bentuk gelombang pada beban R=96W (a) Kuasa (b) Voltan dan arus	154
Rajah 5.18	Spektrum harmonik pada pada beban R=96W (a) THDi (b) THDv	154
Rajah 5.19	Gelombang voltan dan arus pada beban R=48.3W	155

Rajah 5.20	Gelombang pada beban 48.3W (a) Kuasa (b) Voltan dan arus	155
Rajah 5.21	Spektrum harmonik pada beban R=48.3W (a) THDi (b)THDv	156
Rajah 5.22	Keputusan THDi dan THDv untuk beban perintang	158
Rajah 5.23	Spektrum harmonik bagi MSMLI tanpa litar CC pada beban 96W frekuensi 50Hz~50,000Hz	159
Rajah 5.24	Kecekapan MSMLI-CC pada beban rintangan	160
Rajah 5.25	Perubahan voltan masukan lawan kuasa beban (a) Simulasi (b) Uji kaji	161
Rajah 5.26	Simulasi pengagihan kuasa masukan (a) $P_o=103W$ (b) $P_o=602W$ (c) $P_o=1200W$	162
Rajah 5.27	Keputusan uji kaji pengagihan kuasa input (a) $P_o=103W$ (b) $P_o=602W$ (c) $P_o=1200W$	163
Rajah 5.28	Bentuk gelombang voltan dan arus untuk beban R=684W dan L=730mH (a) Litar CC dimatikan (b) Litar CC dihidupkan	164
Rajah 5.29	Harmonik pada beban R=684W dan L=730mH (a) THDi litar CC mati (b) THDv litar CC mati (c) THDi litar CC hidup (b) THDv litar CC hidup	165
Rajah 5.30	Bentuk gelombang voltan dan arus pada beban R=74W dan L=182mH (a) Litar CC mati (b) Litar CC hidup	166
Rajah 5.31	Keputusan simulasi pada beban R=74W dan L=182mH (a) THDi litar CC mati (b) THDv litar CC mati (c) Litar THDi CC hidup (b) THDv litar CC hidup	167
Rajah 5.32	Bentuk gelombang voltan dan arus pada beban R=24.15W dan L=104mH (a) Litar CC mati, (b) Litar CC hidup	168
Rajah 5.33	Harmonik pada beban R=24.15W dan L=104mH (a) THDi litar CC mati (b) THDv litar CC mati (c) THDi litar CC hidup (d) THDv litar CC hidup	169
Rajah 5.34	Gelombang voltan dan arus pada beban R=684W dan L=730mH	171
Rajah 5.35	Kuasa, voltan dan arus pada beban R=684W dan L=730mH (a) Kuasa litar CC mati (b) Voltan dan arus litar CC mati (c) Kuasa litar CC hidup (b) Voltan dan arus litar CC hidup	172

Rajah 5.36	Harmonik pada beban $R=684W$ dan $L=730mH$ (a) THDi litar CC mati (b) THDv litar CC mati, (c) THDi litar CC hidup (b) THDv litar CC hidup	173
Rajah 5.37	Gelombang voltan dan arus pada beban $R=74W$ dan $L=182mH$ (a) Litar CC mati (b) Litar CC hidup.	174
Rajah 5.38	Kuasa, voltan, arus dan pada beban $R=74W$ dan $L=182mH$ (a) Kuasa litar CC mati (b) Voltan dan arus litar CC mati (c) Kuasa litar CC hidup (b) Voltan dan arus litar CC hidup	175
Rajah 5.39	Harmonik pada beban $R=74W$ dan $R=182mH$ (a) THDi litar CC mati (b) THDv litar CC mati (c) THDi litar CC hidup (b) THDv litar CC hidup	176
Rajah 5.40	Gelombang voltan dan arus pada beban $R=24.15W$ dan $L=104mH$ (a) Litar CC mati (b) Litar CC hidup.	177
Rajah 5.41	Kuasa, voltan dan arus pada beban $R=24=15W$ dan $L=104mH$ (a) Kuasa litar CC mati (b) Voltan dan arus litar CC mati (c) Kuasa litar CC hidup (b) Voltan dan arus litar CC hidup	178
Rajah 5.42	Harmonik pada beban $R=24.15W$ dan $L=104mH$ (a) THDi litar CC mati (b) THDv litar CC mati (c) THDi litar CC hidup (b) THDv litar CC hidup	179
Rajah 5.43	Graf keputusan THDi dan THDv untuk mod CC-mati dan CC-hidup (a) Simulasi (b) Uji kaji	182
Rajah 5.44	Kecekapan MSMLI untuk beban induktif	183
Rajah 5.45	Voltan keluaran dan sumber $V_{S1}\sim V_{S4}$ pada mod litar CC hidup dan mati, (a) Simulasi (b) Uji kaji	184
Rajah 5.46	Gelombang keluaran bagi perubahan sumber V_{S1} (a) Turun 30% (b) Naik 30% (c) Turun 100%	186
Rajah 5.47	Spektrum harmonik apabila sumber V_{S1} berubah (a) Turun 30% (b) Naik 30% (c) Turun 100%	187
Rajah 5.48	Gelombang keluaran bagi perubahan sumber V_{S2} (a) Turun 30% (b) Naik 30% (c) Turun 100%	188
Rajah 5.49	Spektrum harmonik apabila sumber V_{S2} berubah (a) Turun 30% (b) Naik 30% (c) Turun 100%	189

Rajah 5.50	Gelombang keluaran pada perubahan sumber V_{S3} (a) Turun 30% (b) Naik 30% (c) Turun 100%	190
Rajah 5.51	Spektrum harmonik pada perubahan sumber V_{S3} (a) Turun 30% (b) Naik 30% (c) Turun 100%	191
Rajah 5.52	Gelombang keluaran pada perubahan sumber V_{S4} (a) Turun 30% (b) Naik 30% (c) Turun 100%	192
Rajah 5.53	Spektrum harmonik pada perubahan sumber V_{S4} (a) Turun 30% (b) Naik 30% (c) Turun 100%	193
Rajah 5.54	Gelombang keluaran pada perubahan sumber V_{S1} (a) Turun 30% (b) Naik 30% (c) Turun 100%	196
Rajah 5.55	Spektrum harmonik pada perubahan sumber V_{S1} (a) Turun 30% (b) Naik 30% (c) Turun 100%	197
Rajah 5.56	Gelombang keluaran pada perubahan sumber V_{S2} (a) Turun 30% (b) Naik 30% (c) Turun 100%	198
Rajah 5.57	Spektrum harmonik pada perubahan sumber V_{S2} (a) Turun 30% (b) Naik 30% (c) Turun 100%	199
Rajah 5.58	Gelombang keluaran pada perubahan sumber V_{S3} (a) Turun 30% (b) Naik 30% (c) Turun 100%	200
Rajah 5.59	Spektrum harmonik pada perubahan sumber V_{S3} (a) Turun 30% (b) Naik 30% (c) Turun 100%	201
Rajah 5.60	Gelombang keluaran pada perubahan sumber V_{S4} (a) Turun 30% (b) Naik 30% (c) Turun 100%	202
Rajah 5.61	Spektrum harmonik pada perubahan sumber V_{S4} (a) Turun 30% (b) Naik 30% (c) Turun 100%	203
Rajah 5.62	Pengaruh turun naik voltan sumber terhadap THD dan V_O (a) V_{S1} (b) V_{S2} (c) V_{S3} (d) V_{S4}	206
Rajah 5.63	Pengaruh turun naik voltan sumber terhadap I_O dan P_O (a) V_{S1} (b) V_{S2} (c) V_{S3} (d) V_{S4}	208
Rajah 5.64	Sisihan voltan keluaran (a) V_{S1} (b) V_{S2} (c) V_{S3} (d) V_{S4}	212
Rajah 5.65	Kecekapan penukar dorongan (a) V_{S1} (b) V_{S2} (c) V_{S3} (d) V_{S4}	214
Rajah 5.66	Kuasa keluaran dan voltan PV pada sinaran $800W/m^2$ (a) Susunan M_1 (b) Susunan M_2 (c) Susunan M_3 (d) Susunan M_4	218
Rajah 5.67	Gelombang simulasi voltan dan arus pada beban $R=570W$	221

Rajah 5.68	Spektrum harmonik pada beban R=570W (a) THDi (b) THDv	221
Rajah 5.69	Gelombang simulasi voltan dan arus pada beban R=96W	222
Rajah 5.70	Harmonik pada beban R=96W (a) THDi (b) THDv	222
Rajah 5.71	Gelombang uji kaji voltan dan arus pada beban R=570W	224
Rajah 5.72	Gelombang uji kaji pada beban rintangan 570W (a) Kuasa (b) Voltan dan arus	224
Rajah 5.73	Spektrum harmonik pada beban R=570W (a) THDi (b) THDv	225
Rajah 5.74	Simulasi voltan dan arus pada beban R=96W	225
Rajah 5.75	Keputusan pada beban R=96W (a) Kuasa (b) Voltan dan arus	226
Rajah 5.76	Harmonik pada beban R=96W (a) THDi (b) THDv	226
Rajah 5.77	Nilai THDi dan THDv dalam keputusan simulasi dan uji kaji	228
Rajah 5.78	Kecekapan MSMLI-CC sambngan PV untuk beban perintang	229
Rajah 5.79	Simulasi voltan dan arus pada beban R=684W dan L=730mH (a) Mod litar CC mati (b) Mod litar CC hidup	229
Rajah 5.80	Keputusan simulasi pada beban R=684W dan L=730mH (a) THDi mod litar CC mati (b) THDv mod litar CC mati (c) THDi mod litar CC hidup (d) THDv mod litar CC hidup	230
Rajah 5.81	Simulasi voltan dan arus pada beban R=74W dan L=182mH (a) Mod litar CC mati (b) Mod litar CC hidup	231
Rajah 5.82	Simulasi pada beban R=74W dan L=182mH (a) THDi mod litar CC mati (b) THDv mod litar CC mati (c) THDi mod litar CC hidup (b) THDv mod litar CC hidup	232
Rajah 5.83	Keputusan uji kaji voltan dan arus pada beban R=684W dan L=730mH (a) Mod litar CC mati (b) Mod litar CC hidup	234
Rajah 5.84	Voltan, arus dan kuasa pada beban R=684W dan L=730mH (a) Voltan dan arus litar CC mati (b) Kuasa litar CC mati (c) Voltan dan arus litar CC hidup (d) Kuasa litar CC hidup	235
Rajah 5.85	Keputusan simulasi pada beban R=74W dan L=182mH (a) THDi mod litar CC mati (b) THDv mod litar CC mati (c) THDi mod litar CC hidup (d) THDv mod litar CC hidup	236
Rajah 5.86	Keputusan uji kaji voltan dan arus pada beban R=74W dan L=182mH (a) Mod litar CC mati (b) Mod litar CC hidup	237

Rajah 5.87	Voltan, arus dan kuasa pada beban $R=74W$ dan $L=182mH$ (a) Voltan dan arus litar CC mati (b) Kuasa litar CC mati (c) Voltan dan arus litar CC hidup (d) Kuasa litar CC hidup	238
Rajah 5.88	Simulasi pada beban $R=74W$ dan $L=182mH$ (a) THDi mod litar CC mati (b) THDv mod litar CC mati (c) THDi mod litar CC hidup (d) THDv mod litar CC hidup	239
Rajah 5.89	Keputusan THDi dan THDv bagi topologi MSMLI-CC sambungan PV beban induktif (a) Simulasi (b) Uji kaji	241
Rajah 5.90	Kecekapan topologi MSMLI-CC sambungan PV beban induktif	242
Rajah 5.91	Gelombang voltan dan arus pada beban lampu pijar 101W	243
Rajah 5.92	Gelombang pada beban lampu pijar 101W (a) Kuasa (b) Voltan dan arus	243
Rajah 5.93	Spektrum harmonik pada beban lampu pijar 101W (a) THDi (b) THDv	244
Rajah 5.94	Gelombang voltan dan arus pada beban lampu pijar 613W	244
Rajah 5.95	Gelombang pada beban lampu pijar 613W (a) Kuasa (b) Voltan dan arus.	245
Rajah 5.96	Spektrum harmonik pada beban lampu pijar 613W (a) THDi (b) THDv	245
Rajah 5.97	Nilai THDi dan THDv topologi MSMLI-CC sambungan PV beban induktif	247
Rajah 5.98	Kecekapan topologi MSMLI-CC sambungan PV beban induktif	247
Rajah 5.99	Gelombang voltan dan arus pada beban lampu FL 36W (a) Mod litar CC mati (b) Mod litar CC hidup	248
Rajah 5.100	Voltan, arus dan kuasa pada beban lampu FL 36W (a) Voltan dan arus untuk mod litar CC mati (b) Kuasa untuk mod litar CC mati (c) Kuasa untuk mod litar CC hidup (d) Voltan dan arus untuk mod litar CC hidup	249
Rajah 5.101	Spektrum harmonik pada beban lampu FL 36W (a) THDi mod litar CC mati (b) THDv mod litar CC mati (c) THDi mod litar CC hidup (d) THDv mod litar CC hidup	250

Rajah 5.102	Gelombang voltan dan arus pada beban lampu FL 72W (a) Mod litar CC mati (b) Mod litar CC hidup	251
Rajah 5.103	Bentuk gelombang pada beban lampu FL 72W (a) Kuasa mod litar CC mati (b) Voltan dan arus mod litar CC mati (c) Kuasa mod litar CC hidup (b) Voltan dan arus mod litar CC hidup	252
Rajah 5.104	Spektrum harmonik pada beban lampu FL 72W (a) THDi mod litar CC mati (b) THDv mod litar CC mati (c) THDi mod litar CC hidup (d) THDv mod litar CC hidup	253
Rajah 5.105	Nilai THDi dan THDv topologi MSMLI-CC sambungan PV beban lampu kalimantang	255

SENARAI SIMBOL

P_{con}	Kehilangan kuasa pengaliran
$R_{DS(ON)}$	Rintangan dalam Mosfet
i_D	Arus salir (drain) Mosfet
$U_{on}(t)$	Voltan jatuh pada keadaan hidup
i_{Dv}	Arus salir (<i>drain</i>) Mosfet mengalir ke beban
P_{sw}	Kehilangan kuasa pensuisan
V_{sw}	Voltan pensuisan
I_{sw}	Arus pensuisan
f_{sw}	Frekuensi pensuisan
$t_{sw(on)}$	Masa suis <i>turn-on</i>
$t_{sw(off)}$	Masa suis <i>turn-off</i>
P_D	Jumlah kehilangan kuasa
P_{sw}	Kehilangan kuasa pensuisan
P_G	Kehilangan kuasa kuasa gerbang
C_{GD}	Kapasitansi gerbang- salir
C_{DS}	Kapasitansi salir-sumber
α	Sudut
η	Kecekapan
D	Kitar tugas
R	Rintangan
R_L	Rintangan peraruh
R_s	Rintangan Siri

R_{sh}	Rintangan selari
f_s	Frekuensi pensuisan
ΔI_L	Arus riak dalam peraruh
ΔV_o	Voltan riak
ω_0	Frekuensi sudut
V_{sh}	Komponen harmonik voltan
$m_{peringkat}$	Bilangan peringkat keluaran
V_S	Voltan sumber
I_{sh}	Komponen harmonik arus
S_O	Konstata suria.
V_{rms}	Voltan efektif
I_{rms}	Arus efektif
V_{mak}	Voltan maksimum
I_{mak}	Arus maksimum
S	Kuasa ketara
P	Kuasa sebenar
Q	Kuasa reaktif
$\cos \alpha$	Faktor kuasa
t_r	Masa naik
t_{rr}	Masa pulihan balikan
t_f	Masa jatuh
I_{sc}	<i>Arus litar pintas</i>
V_{oc}	Voltan litar terbuka
V_m	Voltan maksimum

V_{kp}	Peningkatan voltan
dt	Darjah tengah isyarat pensuisan
da	Darjah batas atas
db	Darjah batas bawah
Q_{Δ}	Batas nilai kuasa reaktif
I_{suis}	Arus suis
$t_{pensuisan}$	Masa suis
C_{sn}	Pemuat <i>snubber</i>
R_{sn}	Perintang <i>snubber</i>

SENARAI SINGKATAN

PV	Photovoltaic
DC	Direct Current
AC	Alternating Current
MLI	Multilevel Inverter
THD	Total Harmonic Distortion
PWM	Pulse Width Modulation
SPWM	Sinusoidal Pulse Width Modulation
SVM	Space Vector Modulation
RDC-MLI	Reduced Device Count Multilevel Inverter
MLDCL	Multilevel DC Link
SSPS	Switched Series/Parallel Sources
SCSS	Series Connected Switched Sources
MLM	Multilevel Module
RV	Reversing Voltage
2SELG	Two Switch Enabled Level Generation
CC	Capacitor Compensator
MSMLI-CC	Minimum Switch Multilevel Inverter using Capacitor Compensator
MPPT	Maximum Power Point Tracking
CHB	Cascaded H-Bridge
MMC	Modular Multilevel Converter
ZCS	Zero Current Switching
ZVS	Zero Voltage Switching

ESR	Equivalent Series Resistance
LPF	Low Pass Filter
VAR	Volt Amps Reactive
SMPS	Switched Mode Power Supply
PF	Power Factor
PC	Power Calculation
SC	Circuit Control
LIM	Limiter
PI	Proportional Integral
FL	Fluorescent Lamp
TNB	Tenaga Nasional Berhad

**REKA BENTUK DAN IMPLEMENTASI PENYONGSANG BERKASKAD
PELBAGAI PERINGKAT BERSUIS MINIMUM MENGGUNAKAN LITAR
PEMAMPAS UNTUK SISTEM PV**

ABSTRAK

Dalam sistem fotovoltaiik (PV) penyongsang digunakan untuk menukarkan bekalan elektrik dari arus terus (A.T) ke arus ulang-alik (A.U). Penyongsang pelbagai peringkat dikelaskan dalam tiga jenis iaitu: Kapit-Diod, Pemuat-Terbang dan penyongsang berkaskad pelbagai peringkat. Sehingga kini, banyak pembangunan penyongsang berkaskad pelbagai peringkat telah dibangunkan seperti penyongsang MLI-DC Link, CMLI-MNS, MLI-SSPS, MLI-SCSS, penyongsang MLM, MLI-RV, MLI-2SELG dan CMLI-MNCS. Tetapi kebanyakan penyongsang ini menggunakan bilangan suis dan sumber dalam kuantiti yang besar untuk mendapatkan peringkat keluaran yang tinggi. Tujuan daripada penyelidikan ini ialah merekabentuk dan membangunkan penyongsang pelbagai peringkat serta empat penukar dorongan untuk implementasi pada PV banyak panel (sekurang-kurangnya 15 panel). Keluaran yang dirancang mengandungi nilai jumlah herotan harmonik (THD) rendah (di bawah 3%) dan kecekapan yang lebih tinggi (di atas 90%) pada beban rintangan dan induktif. Penyongsang pelbagai peringkat dalam penyelidikan ini ialah sebuah topologi baru iaitu penyongsang pelbagai peringkat menggunakan bilangan suis dan sumber dalam kuantiti yang rendah untuk mendapatkan peringkat yang lebih tinggi. Topologi ini juga dibangunkan bersama litar pemuat pemampas untuk menghilangkan voltan runcing pada beban induktif. Topologi yang diperkenalkan boleh dipanggil sebagai penyongsang berkaskad pelbagai peringkat bersuis minimum menggunakan litar pemampas (MLIMS-CC). Litar topologi terdiri daripada penjanaan peringkat, titi-H, dan litar pemuat pemampas (CC). Sebanyak empat sumber A.T asimetri dan 8 peranti

suis digunakan. Litar pemuat pemampas terdiri daripada 6 pemuat dan 6 geganti dan gabungan selari daripada kapasitor pemampas mampu menghasilkan 63 nilai kapasitif. Nilai pemuat pemampas ditentukan oleh kuasa reaktif beban, menerusi sistem kawalan suapbalik. Topologi yang dibangunkan menghasilkan 31 peringkat gelombang output. Pada beban rintangan kuasa 600 watt kecekapan 97% dan nilai THDv =1.6%, THDi=1.7% diperolehi. Untuk beban induktif pada kuasa 619.8W kecekapan 94,3% dan nilai THDi=1.1%, THDv=1.8% diperolehi. Dalam aplikasi pada PV dan penggunaan penukar dorongan, nilai kecekapan keseluruhan terdapat sedikit penurunan kepada 95.7% pada beban rintangan dan 93.81% pada beban induktif. Litar pemuat pemampas yang dibangunkan boleh menghilangkan voltan runcing dan mengurangkan THDi daripada 14.5%, turun ke 9.3% dan THDv 20.6% turun ke 1.3% hasil ujikaji pada beban lampu kalimantang.

DESIGN AND IMPLEMENTATION OF CASCADED MULTILEVEL INVERTER WITH MINIMUM NUMBER SWITCHES USING CAPACITOR COMPENSATOR CIRCUIT

ABSTRACT

In photovoltaic system (PV), an inverter is used to convert electricity supply from direct current (DC) into alternating current (AC). The multilevel inverter is classified into three types namely: Diode-clamped; Flying-Capacitors and various tiers. At the present, there has been a lot of multi-tiered inverter development like MLI-DC Link inverter, CMLI-MNS, MLI-SSPS, MLI-SCSS, MLM inverter, MLI-RV, MLI-2SELG, and CMLI-MNCS. But these inverters use a large number of switches and resources in order to get high output levels. The purpose of this research is design and develop a multilevel inverter and four the boost converter for the implementation at PV panels (at least 15 panels). The designed output contains a total harmonic distortion (THD) value (below 3%) and higher efficiency (above 90%) at the resistive and inductive load. The multilevel inverters in this research is a new topology of multilevel inverters using less switches and power resources while obtaining high output levels that can be used with PV source. The topology will also be combined with capacitor compensator circuit to eliminate voltage spikes when connected with an inductive load. This new topology can be called the minimum number of switch multilevel inverter using compensator circuit (MSLIMS-CC). It consists of stage generation, H-bridge, and capacitor compensator circuit (CC). 4 asymmetry dc sources and 8 switches were used. The capacitor compensator circuit was composed of 6 capacitors, 6 relays. Parallel combinations of compensators can produce 63 capacitive values. The capacitor compensator works according to the load reactive power, which uses a feedback control system. The topology produced 31 level output

waves. At 600W resistive load, the THD_v, THD_i and efficiency obtained were 1.6%, 1.7% and 97% respectively. At 619,8W inductive load, the THD_i, THD_v, and efficiency were 1,1%, 1.8% and 94,3% respectively. With implementation with a dorongan converter, the MLIMS-CC efficiency slightly down to 95.7% with resistive load and 93.81% with inductive load. Test results with fluorescent lamp load demonstrated that the capacitor compensator circuits able to eliminate voltage spikes and reduce THD_i and THD_v from 14.5%, and 20.6% down to 9.3% and 1.3% respectively

BAB SATU

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

PV suria (*Fotovoltaik*) adalah sejenis tenaga diperbaharui yang berkembang setiap tahun. Kapasiti PV terpasang di dunia sehingga 2016 mencapai 303 GW di mana China, Jepun, Jerman dan Amerika Syarikat mewakili pasaran terbesar iaitu masing-masing 78 GW, 40 GW, 41.3 GW dan 39 GW[1]. Malaysia dari tahun 2012 sehingga 2016 telah memasang 335.77 MW kapasiti PV suria [2].

Fotovoltaik adalah peranti yang menukar cahaya langsung ke kuasa arus terus (AT). Dalam sistem PV suria yang bersambung grid, penyongsang digunakan untuk menukarkan elektrik dari arus terus (A.T) ke dalam arus ulang alik (A.U) yang kemudiannya dibekalkan ke grid kuasa. Dalam sistem luar grid (*off-grid*), bateri digunakan untuk penyimpanan tenaga dan akan membekalkan beban ketika sinaran matahari rendah dan juga pada waktu malam. Dalam sistem luar grid, penyongsang juga digunakan jika ada keperluan untuk bekalan kuasa ac [3].

Litar penyongsang menggunakan peranti pensuisan seperti Mosfet/ IGBT, dan teknik pensuisan tertentu digunakan untuk memperolehi bentuk gelombang keluaran ac. Penyongsang yang berkualiti baik haruslah menghasilkan gelombang ac menghampiri bentuk sinusoidal pada frekuensi asas [4]. Gelombang ac sinusoidal yang baik ditentukan oleh nilai jumlah herotan harmonik (THD). Nilai THD bagi gelombang sinusoidal tulen menghampiri sifar, sedangkan dalam gelombang bukan sinusoidal ia mengandungi nilai THD yang tinggi. Selain nilai THD yang rendah, penyongsang juga haruslah mempunyai nilai kecekapan yang tinggi.

Berdasarkan teknik pensuisan, klasifikasi penyongsang terdiri daripada SPWM, SVM, penyongsang denyutan resonan dan penyongsang pelbagai peringkat (*Multilevel inverter*). Penyongsang pelbagai peringkat adalah penyongsang yang menyatukan pelbagai peringkat voltan masukan A.T untuk membentuk gelombang keluaran sinusoidal. Apabila bilangan peringkat voltan lebih banyak maka ia boleh menghasilkan gelombang sinusoidal yang lebih baik. Penyongsang pelbagai peringkat boleh diklasifikasikan kepada beberapa topologi, antaranya ialah: Kepitan Diod (*Diode-clamped*); Pemuat-Terbang (*Flying-capacitor*) dan penyongsang berkaskad pelbagai peringkat (*Cascaded multilevel inverter*) [5].

Penyongsang berkaskad pelbagai peringkat terdiri daripada beberapa penyongsang titi-H yang disambung secara siri. Setiap titi-H disambungkan kepada sumber A.T yang berasingan. Voltan keluaran adalah jumlah voltan sumber A.T dan biasanya bilangan titi-H menentukan jumlah peringkat voltan keluaran [6]

Sehingga kini, banyak reka bentuk penyongsang berkaskad pelbagai peringkat dibangunkan bertujuan untuk mengurangkan penggunaan peranti pensuisan. Di antaranya ialah topologi yang popular dipanggil *Reduced Device Count Multilevel Inverter (RDC-MLI)*. Jenis jenis topologi RDC-MLI termasuk: Penyongsang Rangkaian A.T Pelbagai Peringkat (*MLDCL*), Topologi Penyongsang Baru Pelbagai Peringkat Berkaskad, Penyongsang Jenis-*T*, Penyongsang Sumber Suis Siri/Selari (SSPS), Penyongsang Sumber Suis Sambungan Siri (SCSS), Sel Suis Bipolar Berkaskad, Topologi Sel Bungkus-U, Modul Pelbagai Peringkat (MLM), topologi Voltan Balikan (RV) dan Generasi-Peringkat Membenarkan 2 Suis (2SELG) [7].

Penyongsang Rangkaian A.T Pelbagai Peringkat (*MLDCL*) dan topologi penyongsang Pelbagai Peringkat Berkaskad dengan suis minimum sebenarnya adalah

topologi yang sama. Topologi ini terdiri dari gabungan teknik penjaan peringkat (*level generation*) dan titi-H. Sistem penjaan peringkat menggunakan 12 suis, iaitu 6 suis ke hadapan, 6 suis terbalik dan titi-H. Topologi ini adalah sama dengan penyongsang satu fasa konvensional yang menggunakan 4 suis pensuisan dan 6 sumber A.T simetri. Gelombang keluaran yang dihasilkan hanyalah 13 peringkat [8],[9].

Penyongsang pelbagai peringkat topologi SSPS terdiri daripada titi-H dan suis siri/selari yang disambungkan ke sumber A.T. Bilangan suis titi-H adalah 4 dan suis siri/selari yang berjumlah 9 disambungkan kepada 4 sumber A.T. Topologi ini mampu menghasilkan bentuk gelombang voltan sebanyak 15 peringkat sahaja [10].

Penyongsang pelbagai peringkat topologi SCSS terdiri daripada titi-H dan 8 masukan suis yang disambungkan kepada 4 sumber A.T. Topologi ini hanya menghasilkan gelombang voltan 5 peringkat sahaja [11].

Berbanding dengan penyongsang pelbagai peringkat topologi MLM yang terdiri daripada titi-H dan suis dua hala, jika 10 suis dua hala disambungkan kepada empat sumber A.T, topologi ini mampu menghasilkan gelombang keluaran 9 peringkat [12].

Bagi penyongsang pelbagai peringkat topologi voltan balikan (RV) yang dibina daripada titi-H dan 8 suis pada penjaan peringkat serta empat sumber A.T, gelombang keluaran yang diperolehi hanyalah sebanyak 11 peringkat [13].

Penyongsang pelbagai peringkat topologi 2SELG pula terdiri daripada titi-H dan penjaan berperingkat. Dalam topologi ini terdapat 12 suis yang disambungkan ke 4 sumber A.T dan ianya hanya mampu menghasilkan gelombang voltan keluaran sebanyak 7 peringkat [14].

1.2 Penyataan Masalah

Penyongsang pelbagai peringkat (MLI) yang mempunyai kualiti yang baik haruslah menghasilkan gelombang keluaran sinusoidal yang mempunyai nilai THD rendah yang melepasi piawaian IEC6000-3-2 dan juga mempunyai kecekapan tinggi. Untuk mendapatkan nilai THD yang rendah, keluaran MLI haruslah mempunyai nilai peringkat voltan keluaran yang tinggi. Nilai peringkat voltan keluaran yang tinggi pada MLI akan memerlukan penggunaan peranti suis yang banyak. Hubungan nilai peringkat voltan keluaran iaitu semakin tinggi peringkat voltan keluaran, semakin rendah nilai THD. Nilai MLI 3 peringkat mempunyai nilai THD bersamaan 47.7%, 9 peringkat mempunyai nilai THD bersamaan 9%, 11 peringkat mempunyai nilai THD bersamaan 9%, 15 peringkat mempunyai nilai THD bersamaan 6.8% [10].

Pada beban induktif, voltan keluaran MLI akan akan menghasilkan voltan runcing (spikes) yang disebabkan oleh daya gerak elektrik (d.g.e) balikan (emf back). Voltan runcing ini akan akan membawa kepada peningkatan nilai THD. Untuk menghilangkan voltan runcing ini, suis balikan ditambah pada litar MLI. Jumlah suis balikan ini sama dengan jumlah suis hadapan. Penambahan suis balikan meningkatkan jumlah suis pada litar MLI.

Di dalam reka bentuk litar pensuisan, semakin banyak peranti suis yang digunakan akan menyebabkan kehilangan kuasa yang tinggi. Kehilangan kuasa yang tinggi ini disebabkan oleh bertambahnya arus gate, bertambah jumlah rugi $R_{DS(ON)}$, dan bertambah jumlah kehilangan disebabkan pensuisan. Peranti suis yang banyak juga menjadikan reka bentuk litar kuasa dan kawalan menjadi lebih rumit. Ini kerana disamping penambahan peranti suis, terdapat juga penambahan litar pemacu,

penambahan bekalan A.T, peningkatan saiz dan reka bentuk papan litar tercetak (PCB) dan juga saiz pengaturcaraan semakin besar.

Oleh itu, untuk mendapatkan kedua-dua ciri tersebut iaitu nilai THD yang rendah dan kecekapan yang tinggi, MLI yang dibina haruslah mempunyai nilai peringkat voltan keluaran yang tinggi dan menggunakan peranti suis yang minimum. Hal ini boleh diselesaikan dengan menggunakan topologi Penyongsang Pelbagai Peringkat Peranti Kiraan Terkurang (Reduced Device Count Multilevel Inverter) atau ringkasnya RDC-MLI. Daripada topologi sedia ada [8], [9], [10], [11], [12], [14], [51], masalah ini boleh diselesaikan seperti berikut:

1. Mengurangkan jumlah sumber A.T kepada 4 dengan penggunaan voltan A.T asimetri (asymmetric), iaitu 4 voltan sumber (VS) tidak sama dengan satu sama lain dengan perbandingan $V_{S1}:V_{S2}:V_{S3}:V_{S4} = V_{S1}:2V_{S1}:4V_{S1}:8V_{S1}$
2. Suis balikan pada peringkat penjanaan dihilangkan supaya satu sumber menggunakan satu suis sahaja, maka kaedah ini akan mengurangkan bilangan peranti suis. Hasilnya ialah 4 sumber A.T hanya memerlukan 4 peranti suis sahaja pada peringkat penjanaan dan 4 peranti suis pada titi-H (keseluruhannya berjumlah 8 suis)
3. Suis balikan diganti dengan litar pemampas pemuat (atau dipanggil CC) pada tingkat Vbus (iaitu di keluaran penjanaan berperingkat).

Voltan keluaran daripada PV suria berubah-ubah bergantung kepada kondisi sinaran matahari. Nilai voltan ini perlu ditetapkan apabila disambungkan kepada penyongsang. Voltan keluaran daripada penyongsang juga boleh berubah apabila kuasa pada beban berubah-ubah. Untuk memastikan voltan masukan dan keluaran penyongsang yang malar, pengubah arus terus seperti penukar dorongan dengan

sistem kawalan suab balik diperlukan. Oleh kerana terdapat empat voltan masukan penyongsong sumber asimetri maka juga empat buah penukar dorongan diperlukan. Voltan keluaran bagi setiap penukar dorongan adalah tidak sama ($V_{S1}:2V_{S1}:4V_{S1}:8V_{S1}$) maka nilai peraruh siri dan nilai kitar tugas isyarat modulasi lebar denyut (PWM) adalah berbeza.

Penyelesaian terhadap masalah di atas dapat diatasi dengan reka bentuk topologi yang akan dibentangkan dalam penyelidikan ini. Topologi ini boleh diperkenalkan sebagai Penyongsang Pelbagai Peringkat Suis Minimum menggunakan Pemampas Pemuat atau ringkasnya MSMLI-CC (*Minimum Switch Multilevel Inverter using capacitor compensator*).

1.3 Objektif Penyelidikan

Objektif utama penyelidikan ini ialah mereka bentuk dan membangunkan penyongsang berkaskad pelbagai peringkat menggunakan pemampas pemuat. Topologi ini juga boleh mengurangkan penggunaan peranti suis dan boleh disambungkan kepada sistem PV suria. Objektif terperinci adalah seperti berikut:

1. Untuk mereka bentuk dan membangunkan litar penyongsang berkaskad berbilang peringkat, dengan gelombang keluaran 31 peringkat, THDi dan THDv di bawah 3%, dan kecekapan sistem melebihi 90%. Litar yang direka juga haruslah menggunakan suis minimum dan berupayamenghilangkan voltan runcing pada beban induktif.
2. Untuk membangunkan litar penukar dorongan dengan sistem kawalan suap ulang bagi meningkatkan voltan masukan daripada PV suria, dan mengekalkan voltan keluaran penyongsang tetap pada 240V.

3. Untuk membandingkan keputusan ujikaji simulasi dan juga litar prototaip bagi litar penyongsang, penukar dorongan dan implementasi pada sistem PV suria.

1.4 Metodologi

Rekabentuk dan pembangunkan MSMLI-CC implementasi pada PV terdiri daripada penyongsong pelbagai peringkat, penukar dorongan dan sambungan PV. Topologi penyongsong pelbagai peringkat terdiri daripada 4 sumber A.T asimetri, 4 suis pada peringkat penjanaan, 4 suis pada titi-H dan 6 pemuat yang disambung selari dengan geganti pada litar CC. Litar CC ini terletak di bahagian V_{bus} , litar CC ini hanya akan hidup pada beban induktif. Nilai dari pemuat dikira berdasarkan kuasa reaktif beban. Empat sumber A.T asimetri masing-masing disambungkan ke keluaran penukar dorongan. Empat sumber A.T asimetri ini mempunyai nisbah perbandingan seperti berikut; iaitu $V_{S1} : V_{S2} : V_{S3} : V_{S4} = V_{S1} : 2V_{S1} : 4V_{S1} : 8V_{S1}$

Penukar dorongan menggunakan topologi biasa (konvensional). Ada 4 penukar dorongan yang dibangunkan dan mempunyai topologi yang sama. Perbezaan hanya pada nilai peraruh siri (L_s) dan kita tugas (D). Voltan keluaran dipastikan malar dengan menggunakan kawalan suap balik. Voltan keluaran masing-masing yang malar pada $V_{S1}=22.63V$, $V_{S2}=45.25V$, $V_{S3}=90.51V$, dan $V_{S4}=181.02V$. Sedangkan voltan masukan dari PV adalah berubah-ubah iaitu $V_{S1}=10V\sim 20V$, $V_{S2}=20V\sim 40V$, $V_{S3}=40V\sim 80V$, dan $V_{S4}=80V\sim 160V$. Masukan dari masing-masing penukar dorongan disambungkan ke keluaran panel PV

Panel PV disambung dalam bentuk siri dalam setiap susunan. Susunan 1 (M_1) hanya terdiri dari satu PV, susunan 2 (M_2) mempunyai dua PV sambungan siri, susunan 3 (M_3) terdiri dari empat PV sambungan siri, dan susunan 4 (M_4) mempunyai empat PV juga sambungan siri. Nisbah susunan diberi seperti berikut iaitu; $V_{M1} :$

$V_{M2} : V_{M3} : V_{M4} = V_{M1} : 2V_{M1} : 4V_{M1} : 8V_{M1}$. Dengan susunan PV seperti ini, diperolehi voltan maksimum (V_{mak}) iaitu: $M_1=18.7V$, $M_2=37.4V$, $M_3=74.8V$, dan $M_4=149.6V$.

1.5 Skop Penyelidikan

Penyelidikan ini melibatkan reka bentuk penyongsang berbilang peringkat dengan suis minimum, litar pemampas pemuat dan litar penukar dorongan yang boleh digunakan dengan sumber tenaga PV. Skop penyelidikan ini adalah untuk aplikasi topologi MSMLI-CC untuk sistem PV satu fasa di luar grid. Simulasi litar dibuat menggunakan perisian Powersim (PSIM), dengan model komponen dianggap sebagai ideal dan peranti Mosfet hanyalah menggunakan model $r_{ds(ON)}$. Dalam kajian ini teknik Penjejakan Titik Kuasa Maksimum (MPPT) bagi system PV suria dan penggunaan sistem penyimpanan bateri adalah diluar skop penyelidikan.

Litar utama topologi MSMLI-CC terdiri daripada penjanaan peringkat dan titi-H. Menggunakan 8 suis dan 4 sumber asimetri iaitu $V_{S1}:V_{S2}:V_{S3}:V_{S4} = V_{S1}:2V_{S1}:4V_{S1}:8V_{S1}$. Dalam uji kaji, suis yang digunakan adalah Mosfet IRFP460 dan kawalan suis menggunakan mikrokontroler PIC16F877. Litar pemampas pemuat CC terdiri daripada 6 pemuat dan 6 geganti (*relay*). Kawalan isyarat penukar dorongan dan bacaan isyarat penderia menggunakan Arduino Nano. Penderia voltan menggunakan modul ZMPT101B dan penderia arus menggunakan modul ACS712.

Panel PV disambung dalam empat susunan (*array*) dan setiap susunan disambungkan secara siri (kecuali susunan-1). Susunan M_1 hanya mengandungi satu PV sahaja manakala susunan M_2 terdiri dari 2 PV yang disambung secara siri. Susunan M_3 pula terdiri dari 4 PV yang disambung secara siri dan susunan M_4 merupakan 8 PV

yang disambung secara siri. Dalam penyelidikan ini pelaksanaan simulasi dan ekeperimen menggunakan panel polisilikon PV SPM100-M. Dalam pelaksanaan simulasi nilai penyinaran (*irradiation*) ditetapkan pada 800 W/m^2 dan suhu 32°C , oleh kerana nilai ini menghampiri dengan nilai purata penyinaran dan suhu di sekitar kampus kejuruteraan Universiti Sains Malaysia.

Penukar dorongan yang direka untuk simulasi dan uji kaji iaitu voltan masukan masing-masing: $V_{S1}=10\text{V}\sim 20\text{V}$, $V_{S2}=20\text{V}\sim 40\text{V}$, $V_{S3}=40\text{V}\sim 80\text{V}$ dan $V_{S4}=80\text{V}\sim 160\text{V}$. Sementara voltan keluaran adalah malar pada nilai: $V_{S1}=22.63\text{V}$, $V_{S2}=45.25\text{V}$, $V_{S3}=90.51\text{V}$ dan $V_{S4}=181.02\text{V}$. Voltan ouput ini adalah sepadan dengan masukan bagi topologi MSMLI-CC. Dalam uji kaji, peranti suis yang digunakan adalah Mosfet IRFP460 dan sistem kawalan menggunakan mikropengawal Arduino Uno.

1.6 Sumbangan Penyelidikan

Topologi MSMLI-CC yang dibina menghasilkan nilai THDi dan THDv di bawah 3% serta mempunyai kecekapan tinggi untuk beban rintangan dan juga induktif. Aplikasi MSMLI-CC dengan sumber PV menghasilkan gelombang ac berkualiti tinggi. Hasil penyelidikan ini menjadi salah satu penyelesaian yang boleh digunapakai dalam sistem tenaga boleh diperbaharui terutama untuk sistem luar grid.

1.7 Garis Panduan Tesis

Keseluruhan tesis ini dibahagikan kepada enam bab yang merangkumi penerangan umum, tinjauan ilmiah, metodologi, reka bentuk dan implementasi, hasil kajian serta perbincangan.

Bab 2 membincangkan teori asas bagi litar-litar utama termasuk penyongsang berbilang peringkat, pemampas pemuat, penukar dorongan, kandungan harmonik dan PV suria.

Bab 3 menjelaskan metodologi proses reka bentuk litar topologi MSMLI-CC. Proses reka bentuk ini berdasarkan teori dan prinsip asas, pengiraan voltan dan kuasa, pengiraan nilai pemuat pemampas, penukar dorongan dan sambungan PV suria.

Bab 4 menghuraikan pelaksanaan pembangunan litar topologi MSMLI-CC, penukar dorongan, sambungan panel PV dan aplikasi pada PV.

Bab 5 memaparkan hasil kajian uji kaji dari sambungan PV suria, prestasi penukar dorongan, prestasi topologi MSMLI-CC untuk beban rintangan, induktif, lampu pijar dan lampu kalimantang (*fluorescent*).

Bab 6 memberikan kesimpulan yang diperolehi daripada proses rekabentuk sehingga menghasilkan suatu rekabentuk yang memenuhi tujuannya. Beberapa cadangan berkaitan penyelidikan yang telah dijalankan diberikan bagi membolehkan kesinambungan penyelidikan ini.

BAB DUA

TINJAUAN ILMIAH

2.1 Penyongsang

Sumber arus ulang-alik (A.U) dijana oleh penjana A.U. Penjana diputar oleh penggerak utama dan dalam hal ini satu putaran adalah 360 darjah. Kelajuan putaran malar akan menghasilkan gelombang keluaran sinusoidal dan berfrekuensi tetap. Penjana gelombang A.U menghasilkan keluaran sinusoidal yang tulen semula jadi dan tidak mengandungi harmonik iaitu jumlah herotan harmonik (THD) adalah menghampiri sifar.

Sumber tenaga yang boleh diperbaharui seperti fotovoltai (PV) menghasilkan arus terus (A.T). Bagi membekalkan kuasa pada beban A.U, arus A.T mesti ditukarkan ke A.U dengan menggunakan penukar kuasa. Penyongsang adalah penukar kuasa untuk menukar arus/voltan A.T ke arus/voltan A.U. Keluaran penyongsang yang baik haruslah menghasilkan gelombang sinusoidal tulen dengan nilai THD menghampiri sifar. Penukar kuasa penyongsang ini menggunakan peranti semikonduktor kuasa seperti Mosfet, IGBT, Thyristor, GTO, IGCT, MTO yang berfungsi sebagai suis.

Berdasarkan teknik pensuisan, penyongsang boleh dikelaskan seperti berikut: modulasi lebar denyut sinusoid (SPWM), modulasi vektor ruang (SVM), penyongsang denyutan resonan dan penyongsang pelbagai peringkat (MLI). MLIs pula boleh dikelaskan kepada : Kepitan-Diod (*Diode-clamped*); Pemuat-Terbang (*Flying-capacitor*) dan penyongsang berkaskad pelbagai peringkat [16]. Banyak jenis penyongsang pelbagai peringkat yang telah direka dan dibangunkan, terutamanya topologi titi-H, bertujuan untuk meningkatkan bilangan peringkat voltan keluaran dan mengurangkan bilangan suis [6], [7].

Aplikasi penyongsang dalam sistem PV memerlukan penukar A.T sama ada untuk meningkatkan atau merendahkan nilai voltan mengikut keperluan, dan juga dapat mengekalkan nilai voltan keluaran. Pada umumnya penukar A.T yang digunakan pada sistem PV adalah penukar dorongan. Penukar dorongan boleh meningkatkan voltan A.T lebih tinggi daripada voltan sumber dan nilai voltan keluaran dapat dikekalkan menggunakan sistem kawalan suapbalik (*feedback control*).

2.1.1 Ciri-ciri Pensuisan

Peranti semikonduktor kuasa seperti Mosfet (suis) berfungsi dalam dua keadaan iaitu hidup atau mati, dan proses ini disebut sebagai pensuisan. Dalam proses ini terjadi kehilangan kuasa iaitu pada keadaan pengaliran dan pensuisan peranti [17].

Kehilangan kuasa pada keadaan pengaliran (jika merujuk kepada Mosfet) disebabkan oleh rintangan dalam Mosfet iaitu $R_{DS(ON)}$. Kehilangan kuasa ini boleh ditunjukkan dalam persamaan 2.1 [18].

$$P_{Con} = \frac{1}{T} \int_0^T I_D R_{DS(ON)} dt = R_{DS(ON)} \cdot I_{rms}^2 \quad (2.1)$$

iaitu,

P_{con} = Kehilangan kuasa pengaliran

$R_{DS(ON)}$ = Rintangan dalam Mosfet

I_D = Arus salir (*drain*) Mosfet mengalir ke beban

I_{rms} = Arus rms salir Mosfet mengalir ke beban

Untuk peranti IGBT rintangan dalam menyebabkan penurunan voltan diod bias hadapan (V_F) dan kehilangan kuasa pengaliran pada IGBT boleh dinyatakan dalam persamaan 2.2 [19], [20]

$$P_{con} = \frac{1}{T} \int_0^T v_{on}(t) i(t) dt \quad (2.2)$$

iaitu,

$v_{on}(t)$ = Voltan jatuh pada keadaan on (V_F)

$i(t)$ = Arus beban.

Ciri-ciri pensuisan peranti di tunjukkan dalam Rajah 2.1. Model litar pensuisan dalam Rajah 2.1a berfungsi seperti berikut, apabila suis hidup (*turn on*), arus i_{sw} mengalir dari sumber V_{DD} melalui beban ke suis, voltan di antara dua terminal suis adalah V_{sw} . Bagi bentuk gelombang dalam Rajah 2.1b, apabila suis hidup semasa $t_{sw(on)}$ arus i_{sw} dari sifar meningkat untuk mencapai I_{sw} semasa masa naik t_r (*rise time*), dalam masa yang sama voltan v_{sw} jatuh daripada V_{DD} ke $V_{sw(sat)}$. Pada masa $t_{sw(on)}$ ini ada peningkatan arus dan voltan sehingga berlaku pelepasan kuasa (*power dissipation*). Apabila suis dimatikan (*turn off*) pada masa $t_{sw(off)}$, arus turun menjadi sifar dalam masa t_f (iaitu masa jatuh), dan pada masa yang sama voltan v_{sw} meningkat kepada V_{DD} . Sepanjang tempoh ini iaitu $t_{sw(off)}$, berlaku peningkatan arus dan voltan yang menyebabkan pelepasan kuasa (*power dissipation*). Kehilangan kuasa dalam $t_{sw(on)}$ dan $t_{sw(off)}$ boleh dinyatakan dalam persamaan 2.3 [21], [22]

$$P_{sw} = V_{sw} I_{sw} \left(\frac{t_{sw(on)} + t_{sw(off)}}{2} \right) f_{sw} + \frac{(C_{GD} + C_{DS}) V_{sw}^2 f_{sw}}{2} \quad (2.3)$$

iaitu,

P_{sw} = Kehilangan kuasa pensuisan (W)

V_{sw} = Voltan pensuisan (V)

I_{sw} = Arus pensuisan (A)

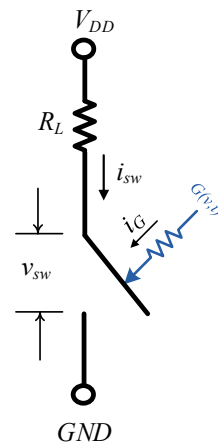
f_{sw} = Frekuensi pensuisan (kHz)

$t_{sw(on)}$ = Masa suis *turn-on* (detik)

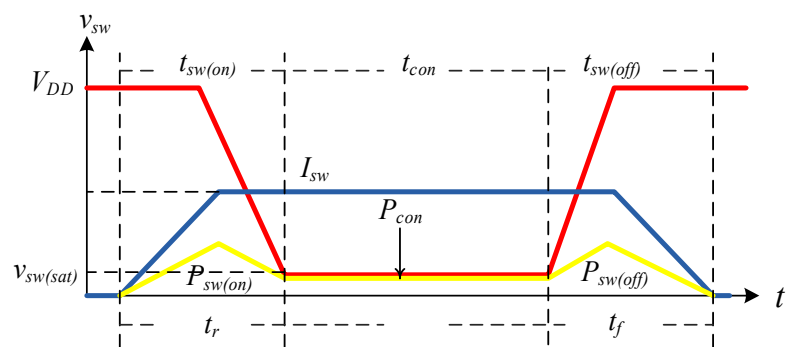
$t_{sw(off)}$ = Masa suis *turn-off* (detik)

C_{GD} = Kapasitansi gerbang- salir

C_{DS} = Kapasitansi salir-sumber



(a)



(b)

Rajah 2.1: Ciri-ciri pensuisan (a) Model litar suis (b) Gelombang pensuisan

Kehilangan kuasa dalam suis juga disebabkan oleh kuasa pemicu gerbang (P_G) Mosfet. Hasil darab arus I_G dengan voltan V_G akan menghasilkan kuasa pemicu get, P_G . Jumlah kehilangan kuasa pada suis ialah [23]:

$$P_D = P_{con} + P_{sw} + P_G \quad (2.4)$$

iaitu,

P_D = Jumlah kehilangan kuasa (W)

P_{con} = Kehilangan kuasa pengaliran (W)

P_{sw} = Kehilangan kuasa pensuisan (W)

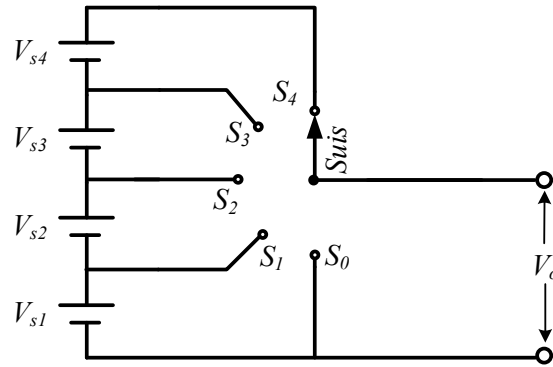
P_G = Kehilangan kuasa gerbang (W)

Untuk mengurangkan kehilangan kuasa pada peranti semikonduktor, perkara berikut boleh dilakukan:

- a. Pada peranti Mosfet pilih nilai $R_{DS} (On)$, $t_r (t_{sw(on)})$, $t_f (t_{sw(off)})$ yang rendah dan pada IGBT pilih nilai voltan *on-state drop* (V_F) yang rendah.
- b. Gunakan frekuensi pensuisan (f_{sw}) yang rendah, atau boleh juga menggunakan teknik pensuisan arus sifar (ZCS) atau pensuisan voltan sifar (ZVS).

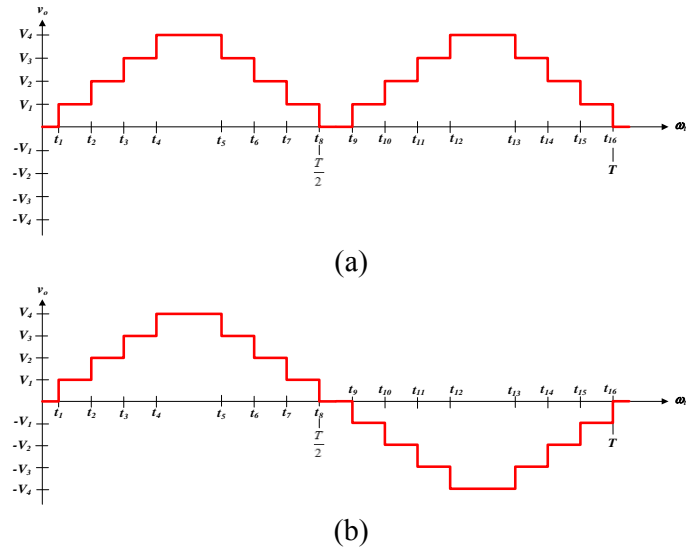
2.1.2 Penyongsang pelbagai peringkat

Penyongsang pelbagai peringkat (MLI) adalah penyongsang yang menyatukan beberapa peringkat voltan masukan A.T untuk membentuk gelombang keluaran sinusoidal. Bilangan peringkat voltan yang tinggi dalam topologi MLI akan menghasilkan gelombang sinusoidal yang lebih baik. Konsep asas sintesis gelombang pada penyongsang berbilang peringkat ditunjukkan dalam Rajah 2.2 [5], [24], [25].



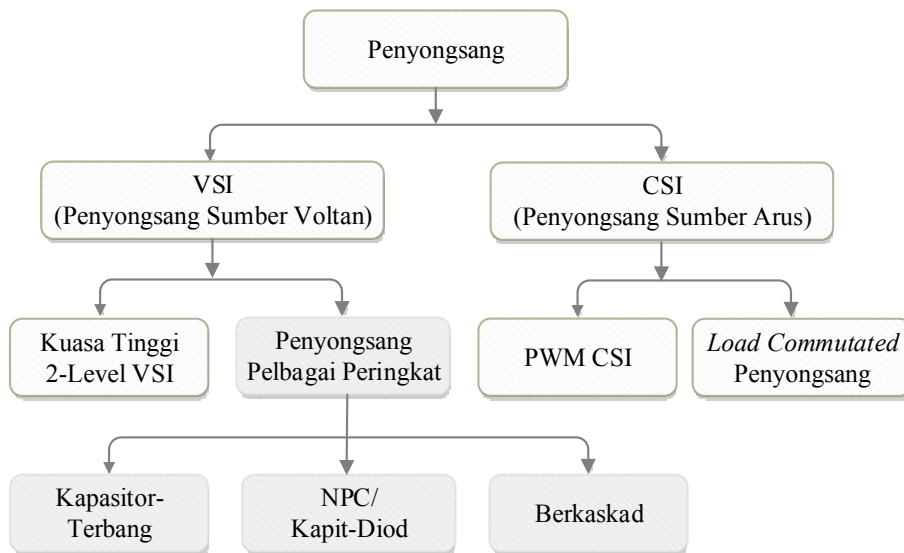
Rajah 2.2: Konsep sintesis gelombang penyongsang pelbagai peringkat [5].

Sumber $V_{s1} \sim V_{s4}$ adalah voltan yang simetri dan pesuisan setengah tempoh ($T/2$) dalam masa t_0 hingga t_8 . Dalam masa t_0 suis berada pada kedudukan S_0 dan voltan keluaran V_o adalah 0. Pada masa t_1 suis bertukar kepada kedudukan S_1 dan voltan keluaran V_o adalah V_{s1} . Pada masa t_2 suis berada pada kedudukan S_2 dan dalam tempoh ini voltan keluaran V_o adalah $(V_{s1} + V_{s2})$. Untuk masa t_3 pula suis akan berada pada kedudukan S_3 dan dalam masa ini voltan keluaran V_o adalah $(V_{s1} + V_{s2} + V_{s3})$. Untuk masa t_4 , suis bertukar kepada kedudukan S_4 manakala voltan keluaran V_o adalah $(V_{s1} + V_{s2} + V_{s3} + V_{s4})$. Untuk masa t_5 , didapati suis bertukar balik kepada kedudukan S_3 dan disini voltan keluaran V_o adalah $(V_{s1} + V_{s2} + V_{s3})$. Pada waktu t_6 , suis akan berada pada kedudukan S_2 dan voltan keluaran V_o adalah $(V_{s1} + V_{s2})$. Bagi tempoh t_7 suis berada pada kedudukan S_1 dan dalam tempoh ini voltan keluaran V_o adalah V_{s1} . Untuk tempoh t_8 pula suis berada pada kedudukan S_0 manakala keluaran V_o adalah 0. Seterusnya dalam tempoh t_9 hingga t_{16} suis akan kembali kepada kedudukan awal ($t_0 \sim t_8$). Bentuk gelombang keluaran ditunjukkan dalam Rajah 2.3a. Apabila keluaran V_o disambungkan ke titi-H maka gelombang yang diperolehi adalah seperti ditunjukkan oleh Rajah 2.3b. Gelombang penyongsang berbilang peringkat ini menghasilkan 9 peringkat keluaran.



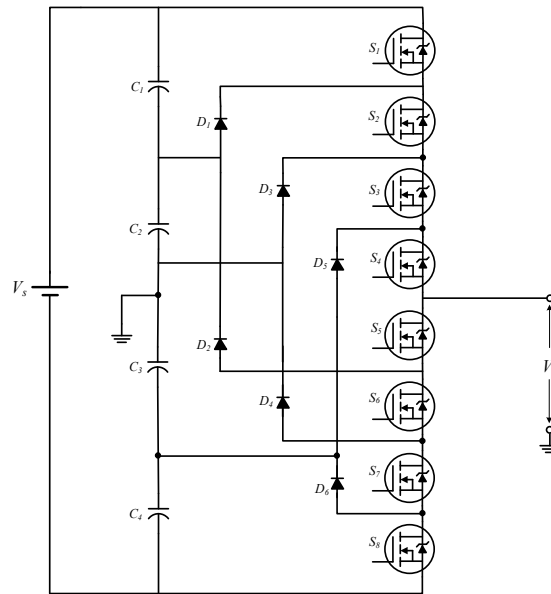
Rajah 2.3: Bentuk gelombang MLI 9 peringkat [5] (a) Gelombang keluaran V_o
 (b) Gelombang keluaran titi-H

Penyongsang pelbagai peringkat adalah kategori penyongsang sumber voltan (VSI), dan ianya boleh dibahagikan kepada tiga jenis iaitu : Pelbagai Peringkat Kaput-Diod, Pemuat-Terbang dan Berkaskad [26], seperti yang ditunjukkan pada Rajah 2.4.



Rajah 2.4: Klasifikasikan penyongsang [26]

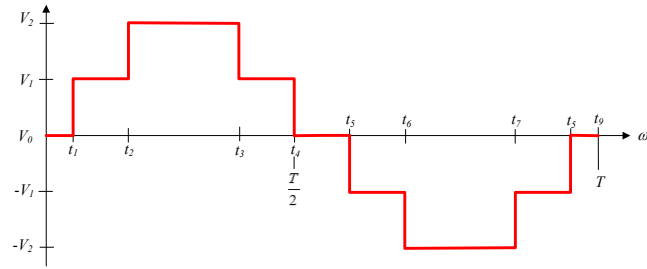
Penyongsang pelbagai peringkat kaput-diod menggunakan satu sumber dan beberapa pemuat sebagai pembahagi voltan bagi memperolehi m-peringkat, dan bilangan pemuat diperlukan ialah m-1. Diod digunakan untuk memisahkan pemuat m-sumber apabila suis dihidupkan, oleh sebab itu diod ini disebut kaput-diod. Topologi penyongsang kaput-diod 5 peringkat ditunjukkan pada Rajah 2.5. Urutan suis hidup - mati diberi dalam Jadual 2.1 dan gelombang keluaran ditunjukkan oleh Rajah 2.6. [27], [28].



Rajah 2.5: Topologi penyongsang kaput-diod 5 peringkat [27], [28].

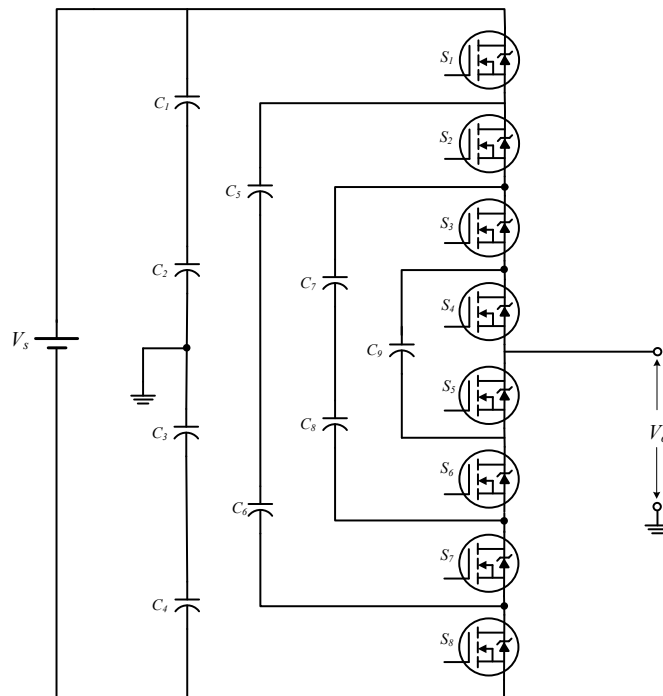
Jadual 2.1: Urutan urutan suis hidup atau mati [27], [28].

t	V_o	<i>Keadaan switch: 1=Hidup; 0=Mati</i>							
		S_1	S_2	S_3	S_4	S_5	S_6	S_7	S_8
t_0	$V_0=0$	0	0	1	1	1	1	0	0
t_1	$V_1=V_s/2$	0	1	1	1	1	0	0	0
t_2	$V_2=V_s$	1	1	1	1	0	0	0	0
t_3	$V_0=0$	0	0	1	1	1	1	0	0
t_4	$-V_1=V_s/2$	0	0	0	1	1	1	1	0
t_5	$-V_2=V_s$	0	0	0	0	1	1	1	1



Rajah 2.6: Gelombang keluaran penyongsang kaput-diod 5 peringkat [27], [28].

Penyongsang pelbagai peringkat pemuat-terbang mula diperkenalkan pada tahun 1992. Topologi penyongsang ini hampir sama dengan penyongsang kaput-diod, di mana diod sahaja yang diganti dengan pemuat. Topologi penyongsang ini ditunjukkan dalam Rajah 2.7. Gelombang ouput 5 peringkat yang dihasilkan adalah sama seperti penyongsang kaput-diod (iaitu Rajah 2.6) dan urutan pergerakan suis hidup atau mati juga sama seperti kaput-diod (Jadual 2.1) [28].

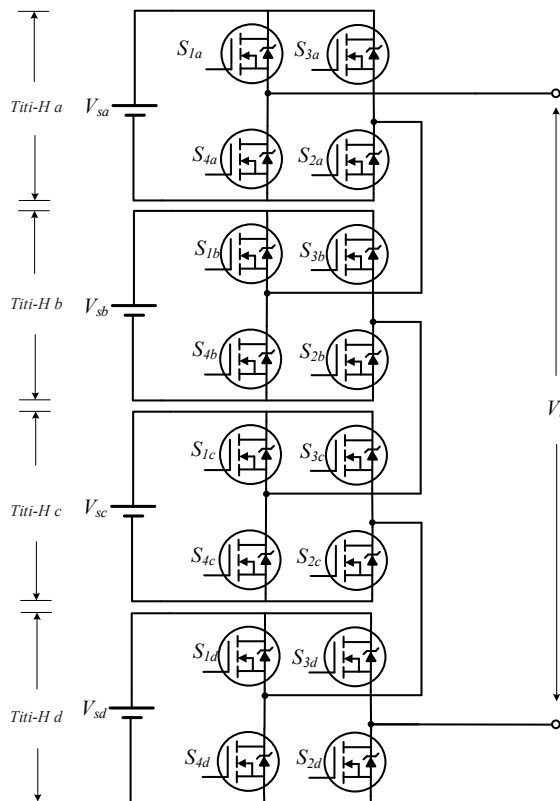


Rajah 2.7: Topologi MLI pemuat-terbang) [28].

2.1.3 Asas Penyongsang berkaskad pelbagai peringkat

2.1.3.1 Topologi

Topologi penyongsang berkaskad pelbagai peringkat pada dasarnya adalah mudah kerana ia hanya menggabungkan penyongsang titi-H dalam hubungan siri [29]. Setiap titi-H menghasilkan tiga tahap voltan yang berbeza iaitu $+V_s$, 0 dan $-V_s$. Pada waktu suis S_1 dan S_2 dihidupkan voltan keluaran V_o adalah V_s , manakala pada waktu S_3 dan S_4 dihidupkan voltan keluaran V_o adalah $-V_s$. Pada ketika suis S_1 dan S_4 dimatikan V_o adalah 0. Topologi penyongsang berkaskad 9 peringkat ditunjukkan dalam Rajah 2.8 [30], [31].

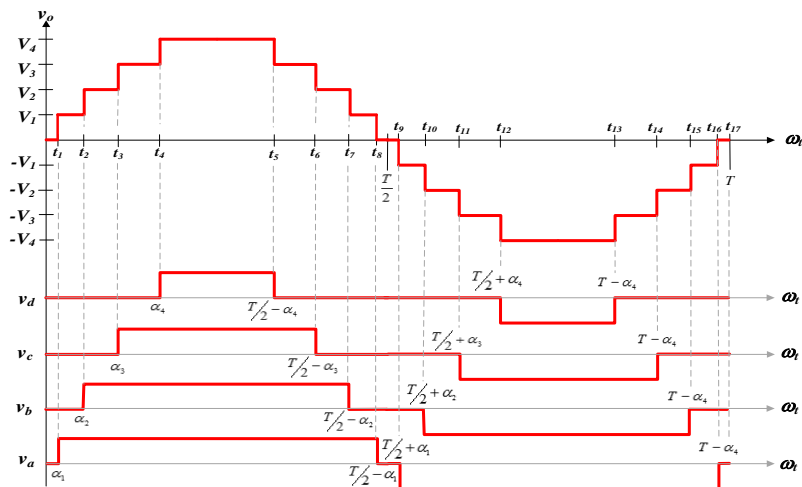


Rajah 2.8: Topologi penyongsang berkaskad 9 peringkat [30], [31].

Urutan suis hidup atau mati daripada titi-H ditunjukkan pada Jadual 2.2 dan bentuk gelombang 9 peringkat ditunjukkan pada Rajah 2.9.

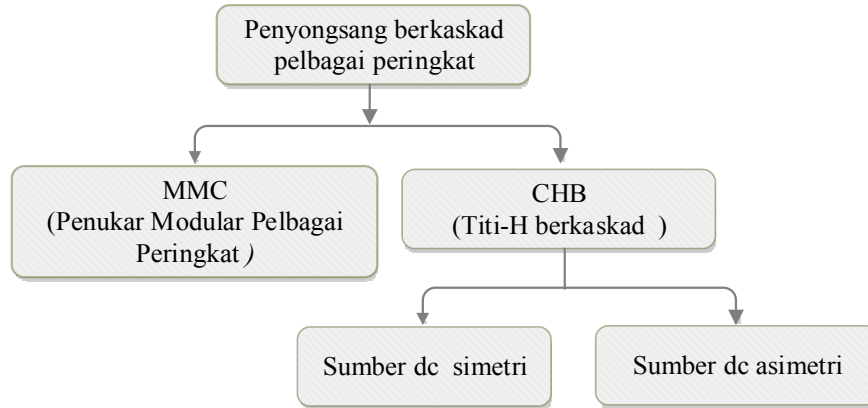
Jadual 2.2: Urutan suis hidup atau mati penyongsang berkaskad 9 peringkat

t	<i>Suis hidup</i>				V_O
	<i>titi-H a</i>	<i>titi-H b</i>	<i>titi-H c</i>	<i>titi-H d</i>	
t_0	S_{2a}, S_{4a}	S_{2b}, S_{4b}	S_{2c}, S_{4c}	S_{2d}, S_{4d}	0
t_1	S_{1a}, S_{2a}	S_{1b}, S_{3b}	S_{1c}, S_{3c}	S_{1d}, S_{3d}	$V_1 = V_{Sa}$
t_2	S_{1a}, S_{2a}	S_{1b}, S_{2b}	S_{1c}, S_{3c}	S_{1d}, S_{3d}	$V_2 = V_{Sa} + V_{Sb}$
t_3	S_{1a}, S_{2a}	S_{1b}, S_{2b}	S_{1c}, S_{2c}	S_{1d}, S_{3d}	$V_3 = V_{Sa} + V_{Sb} + V_{Sc}$
t_4	S_{1a}, S_{2a}	S_{1b}, S_{2b}	S_{1c}, S_{2c}	S_{1d}, S_{2d}	$V_4 = V_{Sa} + V_{Sb} + V_{Sc} + V_{Sd}$
t_5	S_{1a}, S_{2a}	S_{1b}, S_{2b}	S_{1c}, S_{2c}	S_{1d}, S_{3d}	$V_3 = V_{Sa} + V_{Sb} + V_{Sc}$
t_6	S_{1a}, S_{2a}	S_{1b}, S_{2b}	S_{1c}, S_{3c}	S_{1d}, S_{3d}	$V_2 = V_{Sa} + V_{Sb}$
t_7	S_{1a}, S_{2a}	S_{1b}, S_{3b}	S_{1c}, S_{3c}	S_{1d}, S_{3d}	$V_1 = V_{Sa}$
t_8	S_{2a}, S_{4a}	S_{2b}, S_{4b}	S_{2c}, S_{4c}	S_{2d}, S_{4d}	0
t_9	S_{3a}, S_{4a}	S_{1b}, S_{3b}	S_{1c}, S_{3c}	S_{1d}, S_{3d}	$-V_1 = V_{Sa}$
t_{10}	S_{3a}, S_{4a}	S_{3b}, S_{4b}	S_{1c}, S_{3c}	S_{1d}, S_{3d}	$-V_2 = V_{Sa} + V_{Sb}$
t_{11}	S_{3a}, S_{4a}	S_{3b}, S_{4b}	S_{3c}, S_{4c}	S_{1d}, S_{3d}	$-V_3 = V_{Sa} + V_{Sb} + V_{Sc}$
t_{12}	S_{3a}, S_{4a}	S_{3b}, S_{4b}	S_{3c}, S_{4c}	S_{3d}, S_{4d}	$-V_4 = V_{Sa} + V_{Sb} + V_{Sc} + V_{Sd}$
t_{13}	S_{3a}, S_{4a}	S_{3b}, S_{4b}	S_{3c}, S_{4c}	S_{1d}, S_{3d}	$-V_3 = V_{Sa} + V_{Sb} + V_{Sc}$
t_{14}	S_{3a}, S_{4a}	S_{3b}, S_{4b}	S_{1c}, S_{3c}	S_{1d}, S_{3d}	$-V_2 = V_{Sa} + V_{Sb}$
t_{15}	S_{3a}, S_{4a}	S_{1b}, S_{3b}	S_{1c}, S_{3c}	S_{1d}, S_{3d}	$-V_1 = V_{Sa}$
t_{16}	S_{2a}, S_{4a}	S_{2b}, S_{4b}	S_{2c}, S_{4c}	S_{2d}, S_{4d}	0



Rajah 2.9: Gelombang keluaran penyongsang berkaskad 9 peringkat

Penyongsang berkaskad pelbagai peringkat boleh diklasifikasikan kepada 2 jenis iaitu, berkaskad titi-H (CHB) dan Penukar Modular Pelbagai Peringkat (MMC) seperti ditunjukkan pada Rajah 2.10 [32].



Rajah 2.10: Klasifikasi penyongsang berkaskad pelbagai peringkat

2.1.3.2 Pensuisan penyongsang berkaskad pelbagai peringkat

Bentuk gelombang bertingkat seperti pada Rajah 2.9 memiliki persamaan Transformasi Fourier seperti yang diberikan oleh persamaan 2.5 [33], [34].

$$v_o(t) = \sum_{n=1,3,5,\dots}^{\infty} \frac{4V_s}{n\pi} [\cos(n\alpha_1) + \cos(n\alpha_3) + \dots + \cos(n\alpha_k)] \sin(n\omega t) \quad (2.5)$$

iaitu,

α = sudut pensuisan

n = peringkat harmonik

Magnitud koefisien Fourier dari persamaan 2.5 diberi oleh persamaan 2.6 iaitu:

$$V_n = \frac{4V_s}{n\pi} [\cos(n\alpha_1) + \cos(n\alpha_2) + \dots + \cos(n\alpha_k)] \quad (2.6)$$

iaitu, $n = 1, 3, 5, 7, \dots$

Indek modulasi M_i adalah :

$$M_i = \frac{V_{f1}}{\frac{4kV_s}{\pi}} = \frac{\cos(\alpha_1) + \cos(\alpha_2) + \dots + \cos(\alpha_k)}{k} \quad (2.7)$$

iaitu,

V_{f1} = Voltan puncak komponen asas

k = Jumlah sudut pensuisan

Harmonik boleh diminimumkan daripada voltan keluaran dengan menggunakan persamaan 2.8 :

$$\cos(n\alpha_1) + \cos(n\alpha_2) + \dots + \cos(n\alpha_n) = 0 \quad (2.8)$$

Penyongsang berkaskad pelbagai peringkat mempunyai 5 titi- H , dan untuk meminimumkan harmonik ke 5, 7, 11 dan 13, maka indek modulasi M_i perlu di tetapkan pada nilai 0.8. Sudut pensuisan diberikan seperti persamaan 2.9 iaitu:

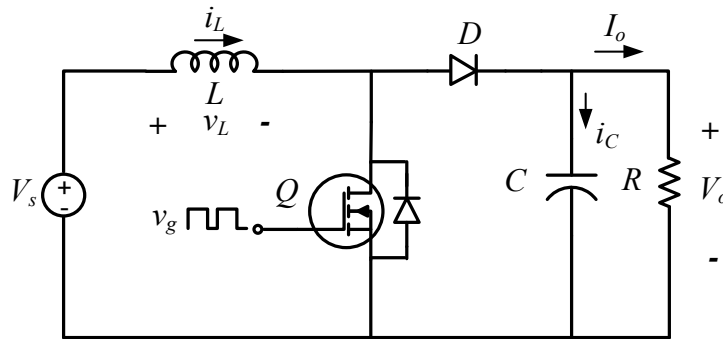
$$\begin{aligned} \cos(5\alpha_1) + \cos(5\alpha_2) + \cos(5\alpha_3) + \cos(5\alpha_4) + \cos(5\alpha_5) &= 0 \\ \cos(7\alpha_1) + \cos(7\alpha_2) + \cos(7\alpha_3) + \cos(7\alpha_4) + \cos(7\alpha_5) &= 0 \\ \cos(11\alpha_1) + \cos(11\alpha_2) + \cos(11\alpha_3) + \cos(11\alpha_4) + \cos(11\alpha_5) &= 0 \\ \cos(13\alpha_1) + \cos(13\alpha_2) + \cos(13\alpha_3) + \cos(13\alpha_4) + \cos(13\alpha_5) &= 0 \\ \cos(\alpha_1) + \cos(\alpha_2) + \cos(\alpha_3) + \cos(\alpha_4) + \cos(\alpha_5) &= 5M_i = 5(0,8) = 4 \end{aligned} \quad (2.9)$$

Daripada persamaan 2.9, dengan menggunakan kaedah Newton-Raphson dan Mathcad maka sudut pensuisan diperolehi seperti berikut :

$$\alpha_1 = 6.57^\circ, \alpha_2 = 18.94^\circ, \alpha_3 = 27.18^\circ, \alpha_4 = 45.14^\circ, \alpha_5 = 62.24^\circ. \quad (2.10)$$

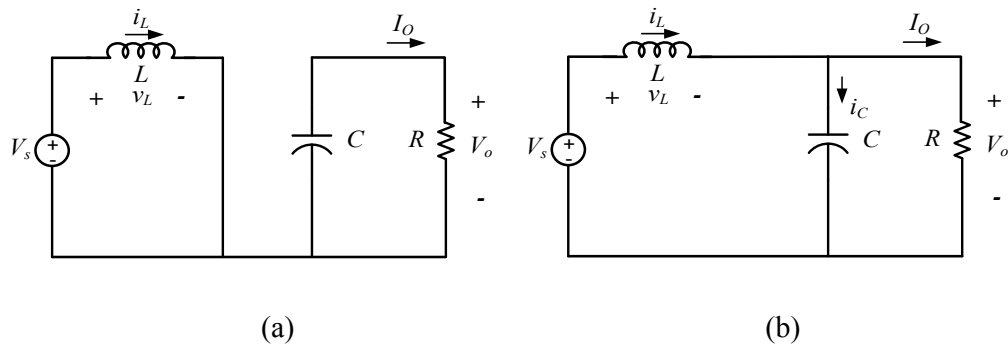
2.1.4 Penukar dorongan

Penukar dorongan berfungsi untuk meningkatkan voltan dari paras voltan sumber ke tahap voltan yang lebih tinggi. Salah satu dari topologi litar penukar dorongan ditunjukkan dalam Rajah 2.11.



Rajah 2.11: Topologi litar penukar dorongan

Mod operasi ditunjukkan pada Rajah 2.12 dan gelombang arus dan voltan ditunjukkan pada Rajah 2.13. Merujuk kepada Rajah 2.12a, pada mod t_{on} suis Q dihidupkan aliran arus bergerak daripada sumber ke dalam peraruh (I_L) dan kembali ke sumber. Pada masa ini tenaga disimpan dalam peraruh dan pemuat menyahcas. Merujuk kepada Rajah 2.12b, pada mod t_{off} iaitu suis Q dimatikan, tenaga daripada peraruh dipindahkan ke beban melalui diod D dan pemuat dicas [35], [36].



Rajah 2.12: Mod Operasi penukar dorongan (a) Masa t_{on} (b) Masa t_{off}