

Teknik Modulasi Inverter Jembatan-H



Mataram University Press

Teknik Modulasi Inverter Jembatan-H

*I Nyoman Wahyu Satiawan
Ida Bagus Fery Citarsa
I Made Ginarsa*



UNRAM PRESS

Mataram University Press

Judul:

Teknik Modulasi Inverter Jembatan-H

Penulis:

I Nyoman Wahyu Satiawan
Ida Bagus Fery Citarsa
I Made Ginarsa

Layout:

Fatia Hijriyanti

Design Sampul:

Zulhermansyah

Design Isi:

Fatia Hijriyanti

Penerbit:

Mataram University Press

Jln. Majapahit No. 62 Mataram-NTB

Telp. (0370) 633035, Fax. (0370) 640189, Mobile Phone +6281917431789

e-mail: upt.mataramuniversitypress@gmail.com

website: www.uptpress.unram.ac.id.

Cetakan Pertama, November 2019

ISBN: 978-623-7608-04-2

Hak Cipta: Dalam Proses

Hak cipta dilindungi oleh undang-undang. Dilarang memperbanyak, sebagian atau seluruh isi buku ini dalam bentuk dan dengan cara apapun, tanpa izin penulis dan penerbit.

KATA PENGANTAR

Dengan semakin meningkatnya upaya pemanfaatan sumber-sumber energi terbarukan seperti energy matahari, energi bayu (angin), energi gelombang laut yang menghasilkan tegangan listrik DC maka keberadaan inverter menjadi sangat penting. Inverter diperlukan untuk merubah tegangan DC menjadi AC. Hal ini dilakukan karena peralatan listrik yang tersedia kebanyakan dirancang untuk menerima tegangan AC (220 V rms dan frekuensi 50 Hz). Saat ini teknologi inverter sudah sangat berkembang dengan pesat. Pada inverter jembatan-H, perkembangan meliputi dua hal, yakni yang berkaitan dengan perbaikan strktur inverter jembatan dan yang kedua yang berkaitan dengan teknik modulasinya. Keduanya bertujuan untuk memperbaiki kualitas tegangan keluaran inverter. Namun demikian, sampai saat ini belum banyak ditemukan buku yang secara khusus membahas teknik modulasi inverter.

Buku ini disusun sebagai upaya untuk memperkaya wawasan kita tentang perkembangan teknik modulasi inverter Jembatan-H bertingkat (Cascaded H-Bridge Inverter). Buku ini secara khusus membahas teknik modulasi inverter jembatan-H diantaranya menyangkut perkembangan teknologi modulasi dan perkembangan struktur inverter jembatan-H. Teknik modulasi yang dibahas mulai dari yang paling sederhana yakni metode konduksi 180°, metode sinusoidal PWM, metode campuran (Hybrid), teknik modulasi untuk inverter jembatan-H bertingkat dengan

tegangan DC tidak sama dan metode untuk inverter jembatan-H termodifikasi. Semua teknik modulasi tersebut dijelaskan prinsip operasinya dengan terperinci, cara pembangkitan pulsanya serta verifikasi menggunakan MATLAB/Simulink.

Semoga kehadiran buku ini dapat bermanfaat bagi pembaca sekalian, khususnya para mahasiswa, dosen, dan praktisi yang bergerak dibidang konversi daya dan energy terbaharukan serta masyarakat secara umum. Saran dan kritik membangun sangat kami harapkan untuk perbaikan buku ini selanjutnya.

UCAPAN TERIMAKASIH

Puji syukur kepada Tuhan atas berkatNya Buku ini akhirnya bisa diselesaikan. Ucapan terima kasih yang setulus-tulusnya kami ucapkan kepada pihak-pihak yang telah membantu sehingga atas kontribusi dan dukungannya buku ini bisa berhasil terbit, diantaranya Direktorat Riset dan Pengabdian Masyarakat (DRPM), Kementerian Riset dan Teknologi dan Pendidikan Tinggi (Ristek Dikti), Lembaga Penelitian dan Pengabdian Masyarakat (LPPM) Universitas Mataram, Unram Press dan teman-teman di kelompok penelitian Ektronika Daya dan Kendali Motor (*Power Electronics and Drives*) Universitas Mataram, teman-teman di Laboratorium Teknik Kendali Universitas Mataram. Terima kasih atas bantuan material, sumbangan tenaga, saran dan pendapat yang sangat berharga.

Terima kasih khusus kepada bapak Suyono atas segala dukungannya, terima kasih kepada kolega kami bapak Cipta Ramadhani atas motivasi sekaligus teman diskusi yang konstruktif serta masukan yang sangat berharga berkaitan dengan tata-letak (Layout) dan juga terima kasih dan penghargaan yang tak terhingga untuk **Metta Savitri** atas desain sampulnya.

HALAMAN PERSEMBAHAN

*Buku ini dipersembahkan kepada yang terkasih istri
dan anak-anakku,
Dewi, Metta dan Kenzie*

*Juga untuk keluarga dari Bpk Citarsa, dan keluarga
dari Bpk Ginarsa*

Terima kasih atas dukungan yang diberikan

*“You can always edit a bad page. You can’t edit a
blank page.”
— Jodi Picoult*

DAFTAR ISI

KATA PENGANTAR.....	v
UCAPAN TERIMA KASIH	vii
HALAMAN PERSEMBAHAN.....	ix
DAFTAR ISI.....	xi
DAFTAR TABEL	xvii
DAFTAR GAMBAR.....	xix
BAB I PENGETAHUAN DASAR INFERTER	1
1.1 Pendahuluan	1
1.2 Inverter dan Aplikasinya.....	3
1.3 Pulse Width Modulation (PWM)/Modulasi Lebar Pulsa.....	5
1.4 Klasifikasi modulasi PWM.....	11
1.5 Penutup.....	13
Pustaka	14
BAB II METODE KONDUKSI 180°	15
2.1 Pendahuluan	15
2.2 Inverter.....	16
2.3 Prinsip operasi inverter jembatan	17
2.4 Simulasi metode konduksi 180°	19
2.5 Kualitas tegangan yang dihasilkan	26
2.6 Penutup.....	29

	Pustaka	30
BAB III	METODE SINUSOIDAL PWM.....	31
3.1	Pendahuluan	31
3.2	Prinsip operasi metode Sinusoidal PWM (SPWM)	32
3.2.1	Metoda SPWM dengan phase digeser (Phase Shifted).....	33
3.2.2	Metoda SPWM dengan level digeser (Level Shifted)	34
3.3	Hasil simulasi metoda SPWM	35
3.3.1	Metoda SPWM dengan phase digeser (Phase Shifted).....	35
3.3.2	Metoda SPWM dengan level digeser (LS-SPWM)	40
3.4	Penutup.....	48
	Pustaka	48
BAB IV	METODE PWM CAMPURAN / MIXED SWITCHING FREQUENCY (MSF) PWM	49
4.1	Pendahuluan	49
4.2	Prinsip operasi Metode Campuran / MSF PWM.....	50
4.3	Simulasi Metoda Campuran / MSF PWM.....	54
4.3.1	Tegangan keluar untuk rasio DC-link 1:1 (12 V: 12 V)	54
4.3.2	Tegangan keluar untuk rasio DC-link 2:1 (16 V: 8 V).....	60
4.4	Penutup.....	67
	Pustaka	68

BAB V	METODE SELECTIVE HARMONICS ELIMINATION (SHE).....	69
5.1	Pendahuluan	69
5.2	Prinsip operasi Metoda SHE	70
5.2.1	Penghapusan harmonisa sepenuhnya (Unipolar SHE)	70
5.2.2	Penghapusan Harmonik sebagian (Bipolar SHE).....	72
5.2.3	Metodologi solusi untuk penghapusan komponen Harmonisa	73
5.2.4	Inverter Multilevel.	74
5.3	Simulasi metode SHE	77
5.3.1	Hasil Simulasi metode SHE dengan teknik penghapusan sepenuhnya.....	79
5.3.2	Analisa Hasil Simulasi.....	83
5.4	Penerapan metoda SHE pada inverter jembatan – H bertingkat	86
5.5	Penutup.....	93
	Pustaka	93
BAB VI	METODE PWM INVERTER JEMBATAN BERTINGKAT DENGAN DC-LINK TIDAK SAMA (UN-EQUAL DC-Link).....	95
6.1	Pendahuluan	95
6.2	Prinsip Operasi.....	96
6.2.1	Struktur multilevel inverter	96
6.2.2	Teknik Modulasi Inverter tiga sel rasio 1 : 2: 4	98
6.3	Simulasi Matlab / Simulink	100
6.3.1	Rangkaian Simulasi	100
6.3.2	Hasil Simulasi	103

6.4	Penutup.....	109
	Pustaka	110
BAB VII	PERBAIKAN STRUKTUR INVERTER	
	JEMBATAN-H	111
7.1	Pendahuluan	111
7.2	Struktur Inverter Tujuh Level Tujuh Saklar (7L-7S).....	113
7.2.1	Topologi inverter inverter 7L-7S	113
7.2.2	Prinsip operasi inverter 7L-7S	113
7.2.3	Proses pembangkitan pulsa inverter 7L-7S	114
7.2.4	Pembangkitan Pulsa PWM.....	116
7.2.5	Pengembangan struktur inverter 7L-7S	119
7.2.6	Pengembangan inverter level ke-n.....	122
7.3	Struktur inverter 7 keluaran 10 Saklar (7L-10S).....	123
7.3.1	Prinsip operasi inverter 7L-10S dengan rasio tegangan DC 1 : 1 : 1.....	123
7.3.2	Pembentukan pulsa PWM untuk inverter 7L-10S.....	125
7.3.3	Prinsip operasi inverter 7L-10S untuk rasio 1:2:4	128
7.4	Penutup.....	138
	Pustaka	138
BAB VIII	VERIFIKASI TEKNIK MODULASI	
	DENGAN SIMULASI DAN REALISASI	
	HARDWARE.....	139

8.1	Desain teknik modulasi dan perbaikan struktur inverter 1-phase jembatan-H	139
8.2	Langkah-langkah Simulasi dan realisasi inverter	143
8.3	Hasil Pemodelan inverter bertingkat ...	145
8.4	Bentuk pulsa saklar-saklar inverter Cascaded H-Bridge 3 sel.....	148
8.5	Pembangkitan pulsa / sudut penyalaan saklar-saklar inverter CHB 3 sel	150
8.5.1	Hasil simulasi	150
8.5.2	Realisasi hardware dan software.....	152
8.5.3	Realisasi Pembangkitan Pulsa Inverter Untuk Rasio DC-Link 1:2:4.....	153
8.5.4	Realisasi Pembangkitan Pulsa Inverter Untuk Rasio DC-Link 1:3:9.....	157
8.6	Tegangan keluaran inverter Cascaded H-Bridge 3 sel.....	159
8.6.1	Tegangan Keluaran untuk Perbandingan DC-link 1:2:4 ...	159
8.6.2	Tegangan Keluaran Untuk Perbandingan DC-Link 1:3:9 ..	161
8.6.3	Realisasi perbaikan struktur inverter jembatan-H	162
8.7	Analisi Hasil Yang Dicapai.....	165
8.8	Penutup.....	167
	Pustaka	167
	DAFTAR PUSTAKA.....	169

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1	Hubungan kondisi saklar dengan tegangan keluaran inverter setengah jembatan	19
Tabel 2.2	Hubungan kondisi saklar dengan tegangan keluaran inverter jembatan-H	19
Tabel 3.1	Resume performa tegangan keluar menggunakan metode SPWM	47
Tabel 4.1.	Sakelar operasi dengan tingkat tegangan yang berbeda untuk DC-link yang sama	59
Tabel 4. 2.	Sakelar Operasi dengan level tegangan yang berbeda untuk dc-link yang tidak sama	63
Table 5.1	Resume hasil metode SHE pada tegangan keluaran inverter jembatan-H 1 sel	83
Tabel 7.1.	Hubungan saklar konduksi dengan tegangan keluaran inverter.....	116
Table 7.2	Perbandingan jumlah saklar inverter modifikasi dan inverter jembatan-H konvensional	122
Table 7.3.	Hubungan kombinasi saklar dengan tegangan keluaran inverter.....	125

Tabel 7.4. Hubungan kombisani saklar dengan
tegangan keluaran inverter 132

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1	Inverter 200 Watt	3
Gambar 1.2	Gelombang persegi, gelombang sinusoidal termodifikasi dan sinusoidal murni	4
Gambar 1.3	Prinsip Pulse Width Modulation.....	6
Gambar 1.4	Sinyal PWM	7
Gambar 1.5	Referensi gelombang sinusoidal, dan sinyal segitiga.....	8
Gambar 1.6	Gelombang segitiga termodifikasi dan tegangan sinusoidal referensi	9
Gambar 1.7	Sinyal kontrol PWM	10
Gambar 1.8	Sinyal Trilevel PWM	11
Gambar 1.9	Klasifikasi modulasi PWM.....	13
Gambar 2.1	Inverter fase tunggal.....	16
Gambar 2.2	Struktur inverter fase tunggal; (a) Inverter setengah jembatan (b) Inverter Jembatan-H	18
Gambar 2.3	Model Simulink inverter jembatan-H ...	20
Gambar 2.4	Model Simulink inverter jembatan bertingkat.....	20
Gambar 2.5	Pulsa PWM inverter jembatan-H dengan metode konduksi 180°.....	21

Gambar 2.6	Tegangan keluaran inverter jembatan-H dengan metode konduksi 180°	21
Gambar 2.7	Pulsa PWM inverter jembatan-H dengan metode konduksi 180° dengan pergeseran fase	22
Gambar 2.8	Tegangan keluaran inverter jembatan-H dengan metode konduksi 180° dengan pergeseran fase.....	23
Gambar 2.9	Pulsa PWM untuk sel-1 inverter jembatan-H bertingkat	24
Gambar 2.10	Gambar 2.10 Pulsa PWM untuk sel-2 inverter jembatan-H bertingkat.....	25
Gambar 2.11	Tegangan keluaran masing-masing sel inverter jembatan bertingkat	25
Gambar 2.12	Tegangan keluar inverter jembatan-H bertingkat dengan 2-sel	26
Gambar 2.13	Tegangan keluaran inverter Jembatan-H satu sel dengan metode konduksi 180° dan spektrum harmonisa	27
Gambar 2.14	Tegangan keluaran inverter Jembatan-H satu sel menggunakan metode konduksi 180° dengan pergeseran fase dan spektrum harmonisa	28
Gambar 2.15	Tegangan keluaran inverter Jembatan-H bertingkat (dua sel) dan spektrum harmonisa	29
Gambar 3.1	Perbandingan sinyal carrier dengan sinyal referensi pada PS-SPWM	33
Gambar 3.2	Prinsip dari Metoda LS-SPWM, (a) Phase Distribution (PD), (b) Phase Opposition Distribution (POD), (c)	

	Alternative Phase Opposition Distribution (APOD).....	35
Gambar 3.3	Blok Simulink inverter bertingkat dengan 2 buah sel jembatan-H.....	36
Gambar 3.4	Sudut penyalaan saklar-saklar inverter jembatan-H Sel-1.....	37
Gambar 3.5	Sudut penyalaan saklar-saklar inverter jembatan-H Sel 2.....	37
Gambar 3.6	Tegangan keluaran inverter jembatan-H dan spektrum harmonisa Sel-1 dan (b) Sel-2.....	39
Gambar 3.7	Tegangan keluaran inverter jembatan-H dan spektrum harmonisa menggunakan PS-SPWM....	40
Gambar 3.8	Pulsa PWM lengan kiri sel -1 inverter jembatan bertingkat dengan PD LS-SPWM.....	41
Gambar 3.9	Pulsa PWM lengan kanan sel -1 inverter jembatan bertingkat dengan PD LS-SPWM.....	42
Gambar 3.10	Pulsa PWM lengan kiri sel -2 inverter jembatan bertingkat dengan PD LS-SPWM.....	42
Gambar 3.11	Pulsa PWM lengan kanan sel -2 inverter jembatan bertingkat dengan PD LS-SPWM.....	43
Gambar 3.12	Tegangan keluar masing-masing sel inverter jembatan bertingkat dengan PD LS-SPWM	44
Gambar 3.13	Tegangan keluaran inverter jembatan bertingkat dan spektrum harmonisa menggunakan metode PD LS-SPWM	45

Gambar 3.14	Tegangan keluaran inverter jembatan bertingkat dan spektrum harmonisa menggunakan metode POD LS- SPWM	46
Gambar 3.15	Tegangan keluaran inverter jembatan bertingkat dan spektrum harmonisa menggunakan metode APOD LS-SPWM	47
Gambar 4.1	Skema inverter jembatan bertingkat (lima-tingkat)	51
Gambar 4.2	Diagram skematik metode PWM campuran / MSF dari inverter CHB.....	52
Gambar 4.3	Pembentukan sinyal modulasi untuk metode MSF PWM (rasio tegangan DC-link 1:1).....	53
Gambar 4.4	Pulsa PWM sel-1 inverter CHB dengan MSF PWM (rasio DC-link 1:1).....	55
Gambar 4.5	Pulsa PWM sel-2 inverter CHB dengan MSF PWM (rasio DC-link 1:1).....	55
Gambar 4.6	Tegangan keluaran sel-1 inverter dengan MSF PWM dan spektrum harmonisa (rasio DC-link 1:1).....	57
Gambar 4.7	Tegangan keluaran sel-2 inverter dengan MSF PWM dan spektrum harmonisa (rasio DC-link 1:1).....	57
Gambar 4.8	Tegangan keluar inverter bertingkat dengan metode MSF PWM dan spektrum harmonisa (rasio DC-link 1:1).....	59
Gambar 4.9	Pembentukan sinyal modulasi untuk metode MSF PWM (rasio tegangan DC-link 2:1).....	61

Gambar 4.10	Variasi sinyal carrier untuk pembangkitan pulsa pada metode MSF PWM.....	61
Gambar 4.11	Pulsa PWM sel-1 inverter CHB dengan MSF PWM (rasio DC-link 2:1).....	62
Gambar 4.12	Pulsa PWM sel-2 inverter CHB dengan MSF PWM (rasio DC-link 2:1).....	62
Gambar 4.13	Tegangan keluar sel-1 inverter dengan MSF PWM dan spektrum harmonisa (rasio DC-link 2 : 1).....	64
Gambar 4.14	Tegangan keluar sel-2 inverter dengan MSF PWM dan spektrum harmonisa (rasio DC-link 2 : 1).....	64
Gambar 4.15	Tegangan keluar dan spectrum harmonisa metode MSF PWM dengan metode Level Shifted PWM (rasio DC-link 2: 1)	66
Gambar 4.16	Tegangan keluar dan spektrum harmonisa metode MSF dengan metode Phase Shifted PWM (rasio DC-link 2 : 1).....	67
Gambar 5.1	Skema switching Unipolar PWM	71
Gambar 5.2	Skema switching Bipolar PWM	73
Gambar 5.3	Inverter dengan dua sel dan sumber DC terpisah	75
Gambar 5.4	Tegangan keluar dari masing-masing inverter jembatan-H dengan 2 sumber terpisah	77
Gambar 5.5	Model inverter Jembatan-H menggunakan Simpower Blockset dan Simulink.....	78

Gambar 5.6	Model Simulink pembangkit pulsa inverter Jembatan-H bertingkat.....	78
Gambar 5.7	Hasil iterasi sudut penyalan dengan metode Newton Raphson	80
Gambar 5.8	Bentuk pulsa PWM dari Saklar S1-S4 menggunakan metode SHE	80
Gambar 5.9	Tegangan keluar inverter dengan metode SHE dan spektrum harmonisa	81
Gambar 5.10	Hasil iterasi metode Newton Raphson pada inverter jembatan-H untuk eliminasi harmonisa ke-3 sampai ke-9.....	82
Gambar 5.11	Pulsa PWM dari Saklar S1-S4 menggunakan metode SHE untuk eliminasi harmonisa ke-3 sampai ke-9.....	84
Gambar 5.12	Tegangan keluaran inverter jembatan-H menggunakan metode SHE dan spektrum harmonisanya.....	84
Gambar 5.13	Hasil iterasi metode Newton Raphson pada inverter jembatan-H untuk eliminasi harmonisa ke-3 sampai ke-11.....	85
Gambar 5.14	Pulsa PWM dari Saklar S1-S4 menggunakan metode SHE untuk eliminasi harmonisa ke-3 sampai ke-11	85
Gambar 5.15	Tegangan keluaran inverter jembatan-H menggunakan metode SHE dan spektrum harmonisanya.....	86
Gambar 5.16	Model Simulink inverter jembatan-H bertingkat dengan 2 sel inverter jembatan-H	87

Gambar 5. 17	Pulsa PWM dari Saklar S1-S4 inverter jembatan-H bertingkat dengan metode SHE	88
Gambar 5. 18	Pulsa PWM dari Saklar S5-S8 inverter jembatan-H bertingkat dengan metode SHE	88
Gambar 5.19.	Tegangan keluaran inverter jembatan 5 tingkat dan spektrum harmonisanya	89
Gambar 5.20	Pulsa PWM dari Saklar S1-S4 inverter-1 untuk eliminasi harmonisa ke-3 sampai ke-9	90
Gambar 5.21.	Bentuk pulsa PWM dari Saklar S5-S8 inverter-2 untuk eliminasi harmonisa ke-3 sampai ke-9	91
Gambar 5.22.	Bentuk tegangan keluaran inverter 5-tingkat dengan metode SHE dan spektrum harmonisanya.....	91
Gambar 5.23.	Bentuk tegangan keluaran sel-1 inverter 5-tingkat dengan metode SHE dan spektrum harmonisanya.....	92
Gambar 5.24.	Bentuk tegangan keluaran sel-2 inverter 5-tingkat dengan metode SHE dan spektrum harmonisanya.....	92
Gambar 6.1.	Inverter bertingkat 3 sel jembatan-H dengan sumber DC terpisah	97
Gambar 6.2.	Tegangan keluar setiap masing sel invrter dan tegangan keluar total (atas) pada rasio tegangan DC-link 1: 1: 1.....	99
Gambar 6.3.	Tegangan keluar inverter menggunakan rasio tegangan DC-link 1: 2: 4.....	100
Gambar 6.4.	Simulink model inverter bertingkat tiga sel dan pembangkit pulsa PWM ..	101

Gambar 6.5	Simulink blok pembangkitan inverter sel ke-3 (tegangan DC-link 24 Volt).....	101
Gambar 6.6	Simulink blok pembangkitan inverter sel ke-2 (tegangan DC-link sebesar 12 V).....	102
Gambar 6.7	Simulink blok pembangkitan inverter sel ke-1 (tegangan DC-link sebesar 6 V).....	102
Gambar 6. 8.	Sinyal PWM untuk sakelar inveter sel-1 (rasio DC-link 1 : 2: 4).....	104
Gambar 6. 9	Sinyal PWM untuk sakelar inveter sel-2 (rasio DC-link 1 : 2: 4).....	104
Gambar 6.10.	Sinyal PWM untuk sakelar inveter sel-3 (rasio DC-link 1 : 2: 4).....	105
Gambar. 6.11.	Tegangan keluar inverter bertingkat tiga sel (rasio DC-link 1 : 2: 4)	106
Gambar. 6.12.	Spektrum harmonisa tegangan keluar inverter bertingkat tiga sel (rasio DC-link 1 : 1 :1)	108
Gambar. 6.13.	Spektrum harmonisa tegangan keluar inverter bertingkat tiga sel (rasio DC-link 1:2:4)	109
Gambar 6.14.	Perbandingan kandungan harmonisa ke-3 sampai ke-9 tegangan keluar inverter bertingkat tiga sel dengan variasi rasio tegangan DC-link.....	110
Gambar 7.1	Struktur umum perbaikan inverter jembatan-H	113
Gambar 7.2.	Perbaikan inverter jembatan-H menggunakan 7 saklar dengan 7 level tegangan keluaran	114

Gambar 7.3.	Kombinasi saklar untuk menghasilkan tegangan positif; (a) V_{dc1} , (b) $V_{dc1}+V_{dc2}$, (c) $V_{dc1}+V_{dc2}+V_{dc3}$	115
Gambar 7.4.	Kombinasi saklar untuk menghasilkan tegangan negative; (a) $-V_{dc1}$, (b) $-(V_{dc1}+V_{dc2})$, (c) $-(V_{dc1}+V_{dc2}+V_{dc3})$	115
Gambar 7.5.	Kombinasi saklar untuk menghasilkan tegangan Nol; (a) S1 dan S3 ON, (b) S2 dan S4 ON.....	115
Gambar 7.6.	Matrik biner untuk pembentukan pulsa PWM inverter 7L-7S.....	116
Gambar 7.7	Proses pembangkitan pulsa PWM untuk saklar S5, S6 dan S7 inverter 7L-7S.....	117
Gambar 7.8.	Blok Simulink pembangkitan pulsa PWM Saklar S5, S6, S7 inverter 7L-7S.....	118
Gambar 7.9.	Pulsa PWM inverter 7L-7S : (a) untuk saklar pada inverter utama (S1 - S4), (b) untuk inverter bantuan (S5-S7)	118
Gambar 7.10.	Bentuk tegangan keluaran modifikasi inverter jembatan dengan struktur 7L-7S	120
Gambar 7.11.	(a) Pengembangan struktur inverter 7L-7S untuk tegangan keluar 15 level, (b) Bentuk pulsa PWM saklar-saklar pada inverter pembantu.....	121
Gambar 7.12.	Tegangan keluar pengembangan inverter 7L-7S dan spektrum harmonisanya	121
Gambar 7.13.	Struktur inverter 7L-10S.....	124

Gambar 7.14.	Matrik biner untuk pembentukan pulsa PWM inverter 7L-10S	125
Gambar 7.15	Pulsa PWM untuk saklar S5-S10 inverter 7L-10S.....	126
Gambar 7.16.	Tegangan keluaran struktur inverter 7L-10S.....	127
Gambar 7.17	Kombinasi saklar untuk menghasilkan tegangan; (a) + Vdc1, (b) - Vdc1	128
Gambar 7.18	Kombinasi saklar untuk menghasilkan tegangan; (a) + Vdc2, (b) - Vdc2	129
Gambar 7.19	Kombinasi saklar untuk menghasilkan tegangan; (a) + Vdc3, (b) - Vdc3	129
Gambar 7.20	Kombinasi saklar untuk menghasilkan tegangan; (a) +(Vdc1 +Vdc2), (b) -(Vdc1 +Vdc2).....	130
Gambar 7.21	Kombinasi saklar untuk menghasilkan tegangan; (a) +(Vdc2 +Vdc3), (b) -(Vdc2 +Vdc3).....	130
Gambar 7.22	Kombinasi saklar untuk menghasilkan tegangan; (a) +(Vdc1 +Vdc3), (b) -(Vdc1 +Vdc3).....	131
Gambar 7.23	Kombinasi saklar untuk menghasilkan tegangan; (a) +(Vdc1 +Vdc2 + Vdc3), (b) -(Vdc1 +Vdc2 + Vdc3)	131
Gambar 7.24	Kombinasi saklar untuk menghasilkan tegangan keluaran nol.....	132
Gambar 7.25	Matrik biner untuk pembentukan pulsa PWM inverter 7L-S10 rasio tegangan DC 1 :2:4	133

Gambar 7.26	Pembentukan pulsa dasar untuk inverter 7L-10S dengan rasio tegangan DC 1:2:4.....	135
Gambar 7.27	Bentuk pulsa PWM inverter 7L-10S dengan rasio tegangan DC 1:2:4.....	136
Gambar 7.28	Bentuk gelombang tegangan keluaran inverter 7L-S10 dengan rasio tegangan DC 1:2:4	137
Gambar 8.1	Skema Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS).....	140
Gambar 8.2	Tegangan keluar masing-masing sel inverter bertingkat 7 level dan tegangan keluar total (paling atas)....	142
Gambar 8.3	Hasil Simulasi gelombang tegangan keluar inverter bertingkat (a) tegangan 15 level (b) tegangan 27 level.....	144
Gambar 8.4.	Inverter bertingkat (Cascaded) dengan 3 sel inverter jembatan-H.....	147
Gambar 8.5.	Tegangan keluaran inverter bertingkat 3 sel dengan rasio DC-link 1:2:4.....	149
Gambar 8.7	Simulink blok kuantisasi gelombang sinus menjadi 15 tegangan DC.....	151
Gambar 8.8.	Hasil kuantisasi tegangan sinusoidal menjadi 15 level.....	151
Gambar 8.9	Rangkaian pengujian inverter secara keseluruhan	152
Gambar 8.10	Rangkaian skematik inverter jembatan-H bertingkat tiga- sel	154
Gambar 8.11	Hasil realisasi sinyal PWM inverter bertingkat rasio DC-link 1: 2: 4 untuk saklar S1 (atas) dan S2 (bawah).....	155

Gambar 8.12	Hasil realisasi sinyal PWM inverter bertingkat rasio DC-link 1: 2: 4 untuk saklar S3 (atas) dan S4 (bawah).....	155
Gambar 8.13	Hasil realisasi sinyal PWM inverter bertingkat rasio DC-link 1: 2: 4 untuk saklar S5 (atas) dan S6 (bawah).....	155
Gambar 8.14	Hasil realisasi sinyal PWM inverter bertingkat rasio DC-link 1: 2: 4 untuk saklar S7 (atas) dan S8 (bawah).....	156
Gambar 8.15	Hasil realisasi sinyal PWM inverter bertingkat rasio DC-link 1: 2: 4 untuk saklar S9 (atas) dan S10 (bawah).....	156
Gambar 8.16	Hasil realisasi sinyal PWM inverter bertingkat rasio DC-link 1: 2: 4 untuk saklar S11 (atas) dan S12 (bawah).....	156
Gambar 8.17	Hasil realisasi sinyal PWM inverter bertingkat rasio DC-link 1: 3: 9 untuk saklar S1 (atas) dan S2 (bawah).....	157
Gambar 8.18	Hasil realisasi sinyal PWM inverter bertingkat rasio DC-link 1: 3: 9 untuk saklar S3 (atas) dan S4 (bawah).....	157
Gambar 8.19	Hasil realisasi sinyal PWM inverter bertingkat rasio DC-link 1: 3: 9 untuk saklar S5 (atas) dan S6 (bawah).....	158
Gambar 8.20	Hasil realisasi sinyal PWM inverter bertingkat rasio DC-link 1: 3: 9 untuk saklar S7 (atas) dan S8 (bawah).....	158

Gambar 8.21	Hasil realisasi sinyal PWM inverter bertingkat rasio DC-link 1: 3: 9 untuk saklar S9 (atas) dan S10 (bawah).....	158
Gambar 8.22	Hasil realisasi sinyal PWM inverter bertingkat rasio DC-link 1: 3: 9 untuk saklar S11 (atas) dan S12 (bawah).....	159
Gambar 8.23	Hasil realisasi tegangan keluaran untuk masing-masing sel 1, sel 2 dan sel 3 inverter bertingkat rasio DC-link 1: 2: 4	160
Gambar 8.24	Realisasi tegangan keluar inverter bertingkat 3 sel dengan rasio DC-link 1:2:4.....	161
Gambar 8.25	Realisasi tegangan keluar setiap sel inverter bertingkat 3-sel untuk rasio DC-link 1:3:9.....	162
Gambar 8.26	Realisasi Pulsa PWM perbaikan inverter jembatan-H untuk saklar (a) S1, (b) S2, (c) S3, (d) S4	163
Gambar 8.27	Realisasi Pulsa PWM perbaikan inverter jembatan-H untuk saklar (a) S5, (b) S6, (c) S7	164
Gambar 8.28	Realisasi tegangan keluar inverter bertingkat 7 level.....	164

BAB I

PENGETAHUAN DASAR INFERTER

1.1 Pendahuluan

Di dunia saat ini ada dua bentuk transmisi listrik, *Direct Current* (DC) dan *Alternating Current* (AC), masing-masing dengan kelebihan dan kekurangannya sendiri. Daya DC adalah penggunaan suatu tegangan konstan yang stabil pada suatu rangkaian yang menghasilkan adanya aliran arus yang konstan. Baterai adalah sumber yang paling umum dari transmisi DC karena arus dapat dialirkan dari terminal satu rangkaian ke terminal rangkaian yang lain.

Sebagian besar sirkuit digital saat ini menggunakan daya DC karena memiliki kemampuan untuk menyediakan tegangan rendah dan tegangan tinggi yang konstan, yang dapat memungkinkan logika digital untuk memproses suatu kode. Secara historis, listrik pertama kali ditransmisikan secara komersial oleh *Thomas Edison*, berupa saluran listrik DC. Namun, karena saluran listrik tersebut bertegangan rendah, karena ketidakmampuan untuk meningkatkan tegangan DC pada saat itu, sehingga tidak mampu mentransmisikan daya jarak jauh.

Daya yang hilang pada saluran transmisi sama dengan perkalian antara nilai arus listrik yang dikuadratkan dan hambatan saluran transmisi. Ketika tegangan meningkat, arus menurun dan secara

bersamaan kehilangan daya menurun secara eksponensial; oleh karena itu transmisi tegangan tinggi mengurangi daya yang hilang. Untuk alasan ini listrik dihasilkan di pembangkit listrik dan dikirim ke rumah tangga dan industry melalui listrik AC. Arus bolak-balik, tidak seperti DC, berosilasi di antara dua nilai tegangan pada frekuensi yang ditentukan, dan arus dan tegangan yang selalu berubah membuatnya mudah untuk naik atau turun tegangan. Untuk situasi transmisi tegangan tinggi dan transmisi jarak jauh semua yang diperlukan untuk meningkatkan atau menurunkan tegangan adalah transformator. Dikembangkan pada tahun 1886 oleh **William Stanley Jr.**, trafo membuat transmisi listrik jarak jauh menggunakan kekuatan AC.

Transmisi listrik karena itu telah terutama didasarkan pada daya AC, memasok sebagian besar rumah Amerika dengan sumber AC 120 volt. Perlu dicatat bahwa sejak tahun 1954 telah ada banyak sistem transmisi DC tegangan tinggi yang diterapkan di seluruh dunia dengan munculnya konverter DC/DC, yang memungkinkan mudahnya menaikkan dan menurunkan tegangan DC.

Seperti daya DC, ada banyak perangkat seperti alat listrik, radio, dan TV yang menjalankan daya AC. Oleh karena itu penting bahwa kedua bentuk transmisi listrik ada; dunia tidak dapat ditangani dengan satu bentuk sederhana. Ini kemudian menjadi hal yang penting karena di sana ada cara mudah untuk mengubah daya DC ke AC dan sebaliknya dengan cara yang efisien. Tanpa kemampuan ini orang akan dibatasi pada perangkat elektronik apa yang mereka gunakan tergantung pada sumber listrik yang tersedia. Konverter AC/DC listrik dan inverter DC/AC memungkinkan orang-orang ini bebas dalam mentransfer tenaga listrik di antara keduanya.

1.2 Inverter dan Aplikasinya

Inverter daya adalah perangkat yang dapat mengubah energi listrik dari bentuk DC menjadi AC. Mereka datang dalam berbagai bentuk dan ukuran, mulai dari fungsi daya rendah seperti menyalakan radio hingga mem-back up gedung jika terjadi pemadaman listrik. Variasi inverter yang dibuat adalah berdasarkan perbedaan dalam harga, kekuatan, efisiensi dan tujuan. Tujuan dari power inverter DC/AC biasanya untuk mengambil daya DC yang disuplai oleh baterai, seperti baterai mobil 12 volt, dan mengubahnya menjadi sumber daya AC 120 volt yang beroperasi pada 60 Hz, meniru daya yang tersedia pada umumnya outlet listrik rumah tangga.

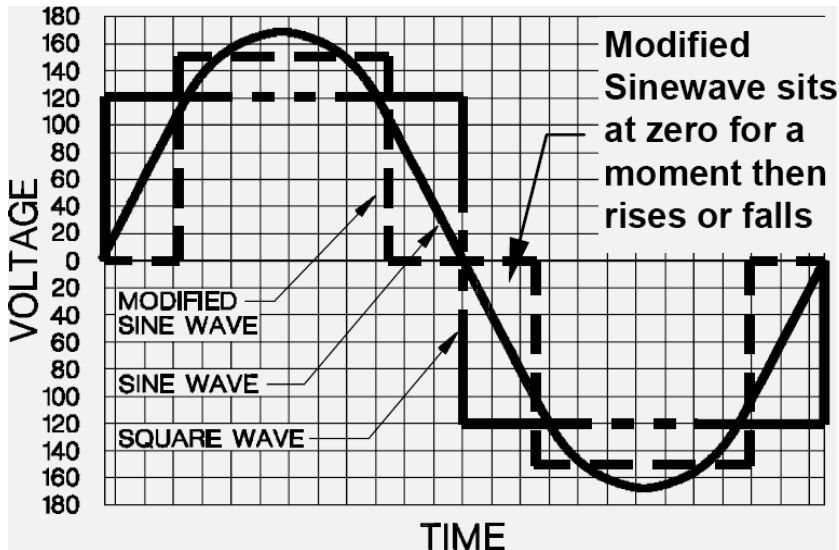


Gambar 1.1 Inverter 200 Watt

Gambar 1.1 memperlihatkan sebuah produk inverter daya kapasitas kecil (200 Watt). Saat ini inverter daya banyak digunakan untuk menyelesaikan banyak tugas seperti memberikan catu tegangan pada peralatan rumah tangga seperti lampu penerangan, Personal Computer (PC), telepon seluler, radio dan televisi. Mereka juga berguna bagi konsumen yang memiliki kendaraan

berkemah, perahu dan di lokasi konstruksi di mana jaringan listrik mungkin tidak dapat diakses. Inverter memungkinkan pengguna untuk menyediakan daya AC di area di mana hanya baterai yang dapat tersedia, memungkinkan portabilitas dan membebaskan pengguna kabel daya yang panjang.

Di pasaran saat ini ada dua jenis inverter daya, modifikasi gelombang sinus dan generator gelombang sinus murni. Inverter ini berbeda dalam output mereka, menyediakan berbagai tingkat efisiensi dan distorsi yang dapat mempengaruhi perangkat elektronik dengan cara yang berbeda.



Gambar 1.2 Gelombang persegi, gelombang sinusoidal termodifikasi dan sinusoidal murni

Gelombang sinus termodifikasi mirip dengan gelombang persegi tetapi memiliki tampilan perubahan yang lebih mengikuti bentuk gelombang sinus. Ini dapat dilihat pada Gambar 1.2, yang menampilkan bagaimana gelombang sinus yang dimodifikasi mencoba untuk meniru gelombang sinus itu sendiri. Bentuk gelombang mudah untuk diproduksi karena hanya produk yang beralih antara 3 nilai pada frekuensi yang ditetapkan,

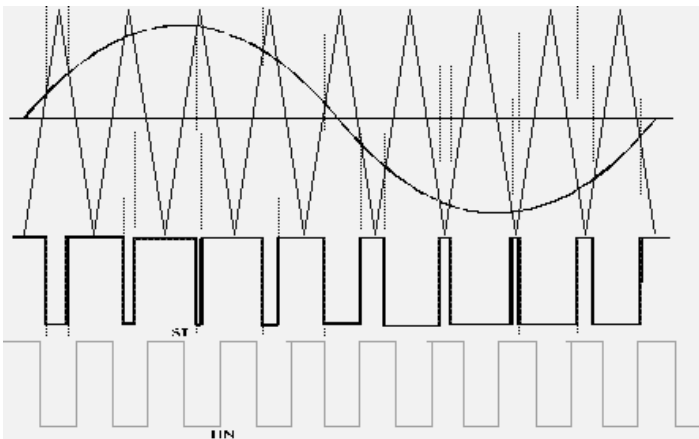
sehingga meninggalkan sirkuit yang lebih rumit yang diperlukan untuk gelombang sinus murni. Inverter gelombang sinus yang dimodifikasi menyediakan solusi yang murah dan mudah untuk menyalakan perangkat yang membutuhkan daya AC. Memang ada beberapa kekurangan karena tidak semua perangkat bekerja dengan baik pada gelombang non-sinusoidal yang dimodifikasi, produk seperti komputer dan peralatan medis tidak tahan terhadap distorsi sinyal dan harus dijalankan dari sumber daya gelombang sinus murni.

Inverter gelombang sinusoidal murni mampu mensimulasikan secara tepat daya AC yang dikirimkan oleh sumber tegangan AC. Biasanya inverter gelombang sinus lebih mahal daripada pembangkit gelombang sinusoidal termodifikasi karena adanya sirkuit yang ditambahkan. Biaya ini, bagaimanapun, dibuat karena kemampuannya untuk menyediakan daya ke semua perangkat elektronik AC, memungkinkan muatan induktif untuk berjalan lebih cepat dan lebih tenang, dan mengurangi kebisingan yang dapat didengar dan listrik di peralatan audio, TV, dan lampu fluoresen.

1.3 Pulse Width Modulation (PWM)/Modulasi Lebar Pulsa

Dalam konverter daya dan motor listrik, PWM digunakan secara luas sebagai alat untuk menghidupkan perangkat arus bolak-balik (AC) dengan sumber arus searah (DC) yang tersedia atau untuk konversi DC / AC tingkat lanjut. Variasi *duty cycle* pada sinyal PWM untuk menyediakan tegangan DC melintasi beban dalam pola tertentu akan muncul pada beban sebagai sinyal AC, atau dapat mengontrol kecepatan motor yang sebaliknya hanya akan berjalan pada kecepatan penuh atau mati. Ini dijelaskan lebih lanjut di bagian ini. Pola di mana *duty cycle* sinyal PWM bervariasi dapat dibuat melalui komponen analog sederhana, mikrokontroler digital, atau sirkuit terpadu PWM spesifik.

Kontrol PWM Analog membutuhkan penggabungan sinyal referensi dan sinyal pembawa (*carrier*) yang masuk ke komparator yang menciptakan sinyal pulsa PWM dengan lebar berdasarkan perbedaan antara sinyal tersebut. Sinyal referensi adalah gelombang sinusoidal pada frekuensi sinyal tegangan keluar yang diinginkan, sedangkan sinyal pembawa sering berupa gigi gergaji atau gelombang segitiga pada frekuensi yang secara signifikan lebih besar dari referensi. Ketika sinyal pembawa melebihi referensi, sinyal keluaran komparator berada pada satu keadaan, dan ketika referensi berada pada tegangan yang lebih tinggi, sinyal keluaran berada pada keadaan yang kedua. Proses ini ditunjukkan pada Gambar 1.3 dengan gelombang pembawa segitiga dibandingkan gelombang referensi sinusoidal paling atas, pulsa sinusoidal termodulasi di bagian tengah dan sinyal tidak termodulasi paling bawah.

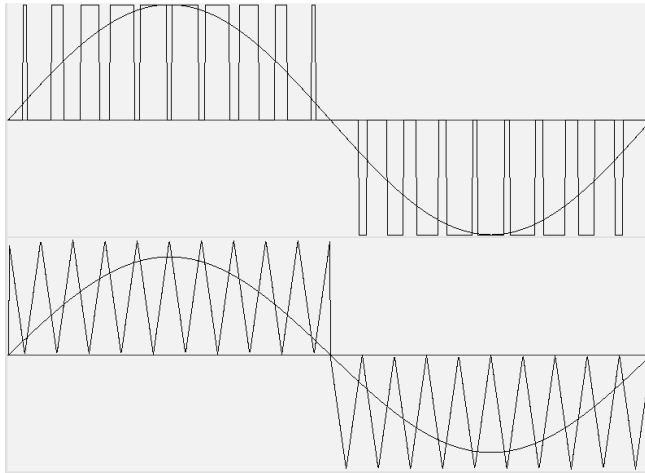


Gambar 1.3 Prinsip Pulse Width Modulation

Modulasi lebar pulsa Bilevel adalah konsep sederhana, dan tidak sulit untuk diimplementasikan. Trilevel PWM tidak jauh dari bilevel, tetapi secara signifikan lebih sulit untuk diterapkan. Di bawah ini ditunjukkan contoh gelombang PWM trilevel.

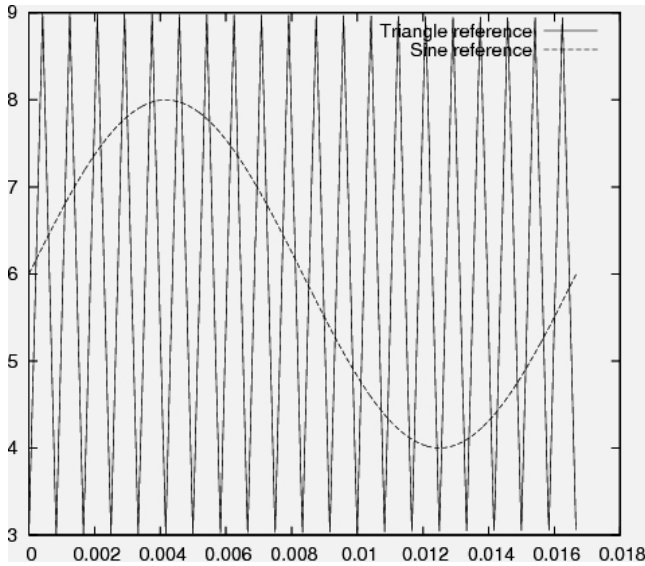
Gambar 1.4 menunjukkan input referensi bentuk gelombang, **dan sinyal PWM yang dihasilkan dilapis**.

Gambar bawah menunjukkan sinyal yang dilewatkan ke komparator untuk mendapatkan bentuk gelombang PWM. Gelombang segitiga mudah dibuat, menggunakan *driver Op-Amp*. Kemudian harus dimodifikasi sedemikian rupa sehingga beralih antara gelombang segitiga *midtowhigh*, ke gelombang segitiga *midtowlow*. Ini dilakukan dengan menghasilkan gelombang segitiga pada kira-kira setengah amplitudo referensi sinus, berpusat pada tegangan yang sama. Gelombang ini kemudian diteruskan ke penjumlah tegangan dengan gelombang persegi (terbuat dari referensi sinus, untuk membuat satu dengan frekuensi identik), yang menciptakan tampilnya gelombang segitiga yang dimodifikasi.



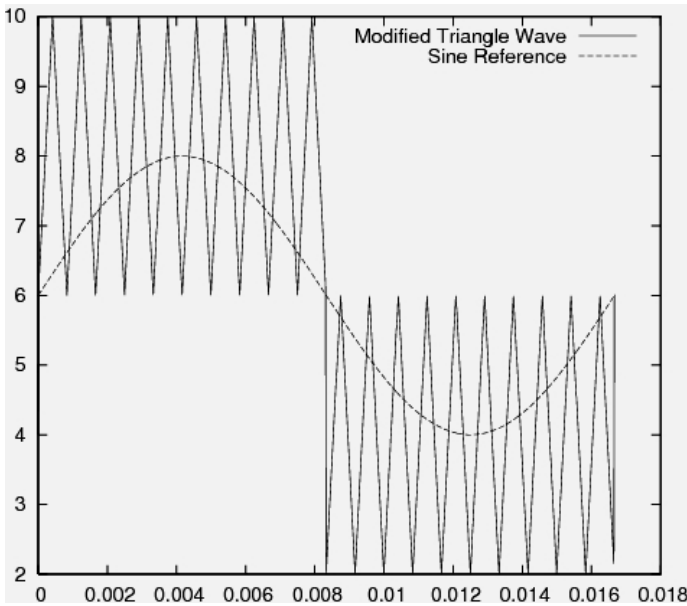
Gambar 1.4 Sinyal PWM

Pembangkitan sinyal referensi, sinyal segitiga dibahas secara terpisah, bagian ini akan menganggap gelombang tersebut sudah ada, dan akan memodifikasinya untuk keperluan menghasilkan PWM tiga level. Pertama, gambar referensi sinus, gelombang persegi yang disebutkan di atas, dan gelombang segitiga diperlihatkan pada Gambar 1.5.



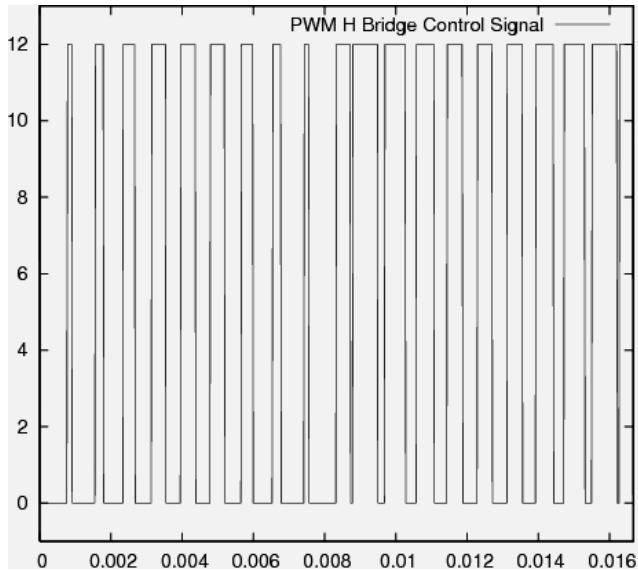
Gambar 1.5 Referensi gelombang sinusoidal, dan sinyal segitiga

Sekarang, dengan menerapkan gelombang segitiga dan gelombang persegi ke penjumlahan tegangan (gelombang persegi diperkecil dengan faktor 12), kita memperoleh gelombang segitiga termodifikasi seperti Gambar 1.6:



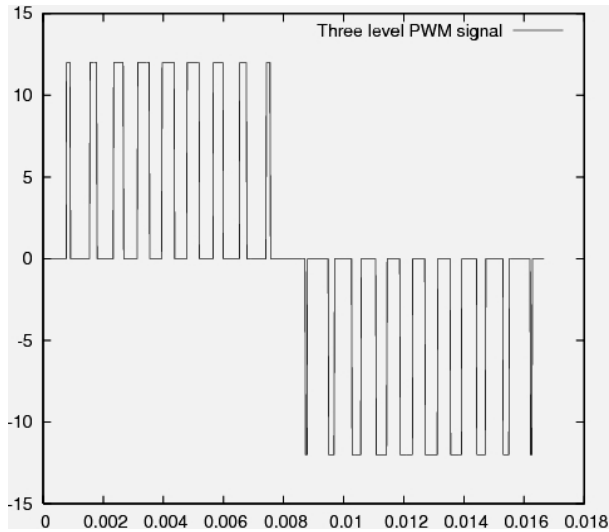
Gambar 1.6 Gelombang segitiga termodifikasi dan tegangan sinusoidal referensi

Referensi sinus disertakan untuk menunjukkan hasil memodifikasi gelombang segitiga. Jika bentuk gelombang ini dilewatkan ke komparator, kita akan memperoleh sinyal / pulsa seperti Gambar 1.7:



Gambar 1.7 Sinyal kontrol PWM

Sinyal ini akan digunakan untuk mengontrol MOSFET. Seperti yang dapat dilihat secara teliti, *duty cycle* mendekati 1 (atau nol) di puncak dan, meskipun mungkin tidak sepenuhnya terlihat, pada persimpangan nol dari gelombang sinus, siklus tugas pertama mendekati nol, kemudian beralih ke satu (sebagai referensi persegi mengubah polaritas). Sekarang, menggunakan konfigurasi *HBridge* MOSFET, dan memanfaatkan kedua sinyal PWM di atas dan gelombang persegi yang dihasilkan, kita dapat memperoleh sinyal seperti Gambar 1.8:



Gambar 1.8 Sinyal Trilevel PWM

Ini adalah sinyal terakhir yang bisa dihasilkan. Jika disaring, kita akan mendapatkan sebuah gelombang sinusoidal (meskipun gelombang sinus 12 V). Jika kita mengganti sumber V 12 dari bentuk gelombang ini dengan sumber 170 V, kita akan memiliki puncak 170V.

1.4 Klasifikasi modulasi PWM

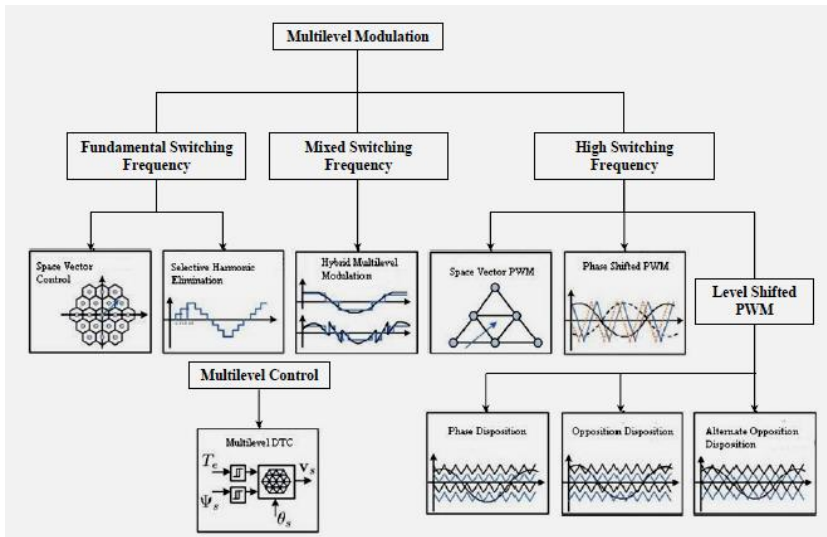
Ada beberapa cara untuk mengklasifikasikan teknik modulasi, di sinicara ditampilkan secara grafis pada Gambar 1.9. Perbedaan antara modulasi multilevel dan kontrol multilevel telah dilakukan. Modulasi multilevel dimaksudkan untuk menghasilkan tegangan keluar rata-rata sebanding dengan referensi yang diberikan oleh beberapa algoritma eksternal, sementara kontrol bertingkat dimaksudkan untuk menerapkan tegangan keluaryang dihasilkan oleh mereka sendiri, seperti *Multilevel Direct Torque Control* (MDTC).

Frekuensi *switching* dapat membagi modulasi multilevel menjadi tiga kelas: frekuensi *switching* dasar, campuran dan tinggi. Modulasi frekuensi *switching*

mendasar menghasilkan pergantian switch pada frekuensi dasar output dan dapat ditujukan untuk membatalkan beberapa harmonik frekuensi rendah tertentu. Di kelas ini ada *Space Vector Control* (SVC) dan eliminasi harmonik selektif. Dalam Ruang Pengendalian Vektor (SVC) dataran kompleks dibagi dalam beberapa zona heksagonal mendefinisikan kedekatan referensi ke vektor umum terdekat yang pasti diterapkan. Dalam eliminasi harmonik selektif output adalah gelombang tangga dengan langkah-langkah yang dioptimalkan untuk membatalkan harmonik yang ditentukan.

Namun jumlah harmonisa yang dapat dihilangkan pada saat yang sama sebanding dengan jumlah tingkat konverter. *Mixed switching frequency modulation* adalah modulator dimana switch berganti pada frekuensi yang berbeda, seperti modulasi multilevel hibrida, dan sangat cocok untuk konverter hibrida: sel yang berbeda dapat dengan mudah berganti pada frekuensi yang berbeda.

Modulasi frekuensi switching tinggi adalah adaptasi dari PWM standar ke multilevel dan mereka dimaksudkan untuk beralih pada frekuensi yang sangat tinggi, sekitar 10 hingga 20 kHz. Diantaranya, ada *Space Vector PWM* (SVPWM) dan *Phase Shifted PWM* (PSPWM) dan subclass yang disebut level shifted PWM. *Phase Opposition* (PO), *Opposition Disposition* (OD) dan *Alternate Opposition Disposition* (AOD) modulasi milik tingkat terakhir ini. SVPWM adalah perpanjangan dari Modulasi Ruang Vektor 2 tingkat standar ke tingkat yang lebih banyak. Dalam PSPWM beberapa referensi fase-bergeser digunakan untuk menghasilkan pulsa kontrol. PO, OD, dan AOD hanya memanfaatkan satu bentuk gelombang referensi yang dibandingkan dengan carry yang mencakup semua rentang variasi referensi. Jumlah operator yang digunakan sama dengan $(n-1)$.



Gambar 1.9 Klasifikasi modulasi PWM

1.5 Penutup

Bab ini membahas tentang pengetahuan awal inverter dan pengantar teknik modulasi yang digunakan untuk mengontrol sudut penyalan saklar-saklar inverter yakni metoda konduksi 180° , metoda Sinusoidal PWM (SPWM) dan berbagai variasinya yakni Level Shifted SPWM dan Phase Shifted SPWM. Selanjutnya dibahas juga tentang klasifikasi modulasi PWM yang digolongkan berdasarkan frekwensi switching yang digunakan, diantaranya Fundamental Switching Frekuensi PWM, High Switching Frequency PWM dan Mixed Switching Frequency PWM.

Pustaka

J. Doucet, D. Eggleston, J. Shaw, DC/AC Pure Sine wave Inverter, Worcester Polytechnic Institute, UK.

BAB II

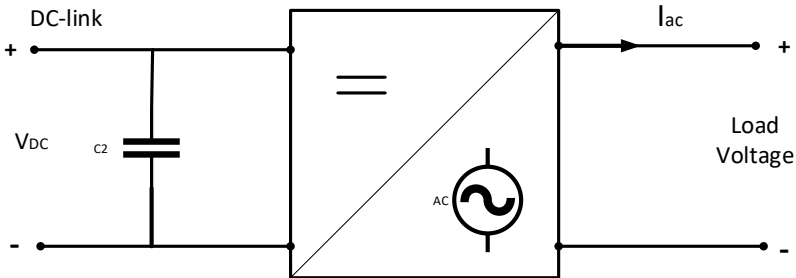
METODE KONDUKSI 180°

2.1 Pendahuluan

Teknik modulasi yang pertama dibahas dalam buku ini adalah metoda konduksi 180°. Metoda konduksi 180° merupakan teknik modulasi yang paling sederhana diantara teknik modulasi untuk inverter jembatan yang ada. Keunggulan metoda ini dibandingkan dengan metoda yang lain adalah kecepatan pulsa yang relatif lambat menyebabkan lebih mudah direalisasikan bahkan dengan menggunakan mikrokontroler dengan memori dan kapasitas kecil semacam Arduino. Namun demikian metoda ini memiliki kelamahan yang sangat mendasar yakni tegangan keluaran mengandung harmonisa yang tinggi sehingga tidak disarankan untuk digunakan mencatu beban secara langsung kecuali dipasang filter atau digabung dengan metoda yang lain. Namun demikian metoda ini sangat bagus digunakan untuk memperlihatkan prinsip operasi dari sebuah inverter jembatan terutama untuk siswa / mahasiswa tingkat pertama.

2.2 Inverter

Inverter adalah peralatan yang berfungsi mengubah tegangan DC (*Direct Current*) menjadi AC (*Alternating Current*). Gambar 2.1 menunjukkan blok diagram dasar untuk sebuah inverter. Berdasarkan fasenya, inverter digolongkan menjadi inverter tiga fase dan inverter fase tunggal.



Gambar 2.1 Inverter fase tunggal

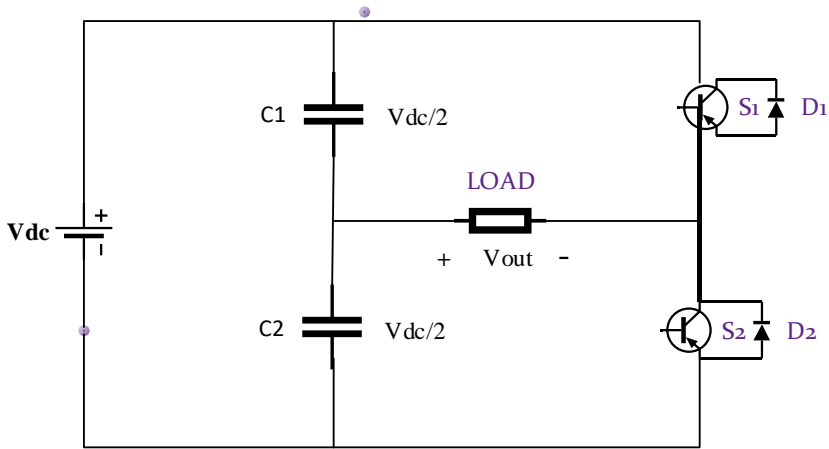
Pada inverter fase tunggal terdapat dua topologi yang lazim digunakan yakni inverter dengan dua perangkat switching dan inverter dengan empat perangkat switching. Inverter dengan empat perangkat switching dibentuk oleh empat buah saklar semikonduktor daya yang tersusun membentuk huruf “H” sehingga biasa disebut sebagai inverter jembatan-H. Istilah lain dari topologi inverter tersebut adalah inverter setengah jembatan dan inverter jembatan penuh. Struktur inverter tersebut diperlihatkan pada Gambar 2.2. Inverter setengah jembatan menggunakan saklar yang lebih sedikit dari inverter jembatan-H. Namun demikian realisasinya lebih rumit karena inverter harus melibatkan rangkaian kapasitor yang tersusun seri sebagai titik pengambilan tegangannya seperti terlihat pada Gambar 2.2 (a). Sebagai alternative dalam pengambilan tegangan pada inverter setengah jembatan adalah dengan menggunakan transformator dengan tap

tengah (*centre tap trafo*). Sebaliknya, realisasi inverter jembatan-H lebih mudah karena tegangan diambil pada titik tengah dari kedua lengan inverter seperti terlihat pada Gambar 2.2 (b). Disamping itu inverter jembatan-H dapat menghasilkan tegangan keluaran yang lebih besar dibanding tegangan yang dihasilkan oleh inverter setengah jembatan. Keuntungan lain dari inverter jembatan-H adalah terdapat kombinasi kondisi saklar yang lebih banyak dari inverter setengah jembatan, sehingga tegangan keluarannya dapat membentuk tiga nilai, yakni $+V_{dc}$, 0 dan $-V_{dc}$. Pada inverter setengah jembatan hanya terdapat dua kondisi pada tegangan keluar yakni bernilai $+V_{dc}/2$ dan $-V_{dc}/2$.

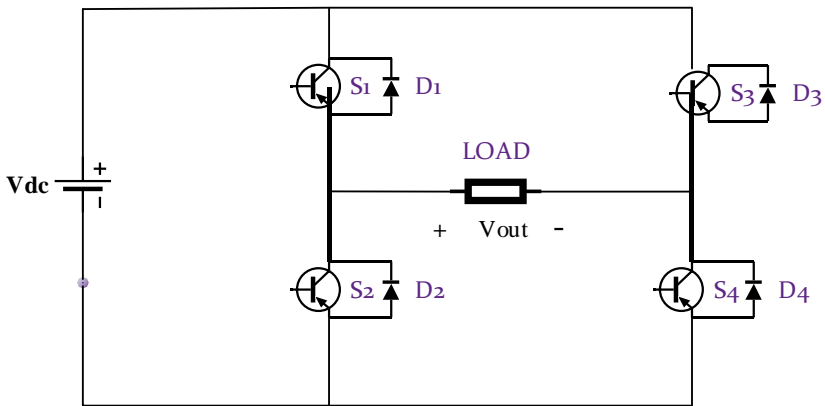
2.3 Prinsip operasi inverter jembatan

Prinsip operasi inverter jembatan untuk menghasilkan tegangan keluaran yang berupa tegangan AC adalah dengan mengaktifkan saklar-saklar yang ada dengan teknik tertentu. Pada Bab 2 ini dibahas teknik modulasi dengan kecepatan switching yang relatif rendah yakni sama dengan kecepatan atau frekwensi komponen fundamental dari tegangan sinusoidal referensi. Kombinasi saklar dan nilai tegangan keluaran diperlihatkan pada Tabel 2.1 dan 2.2 untuk masing-masing inverter setengah jembatan dan inverter jembatan-H.

Memperhatikan Tabel 2.1, dapat dilihat bahwa inverter setengah jembatan hanya mungkin menghasilkan dua jenis nilai tegangan keluaran yakni $+V_{dc}/2$ dan $-V_{dc}/2$ karena hanya ada dua kombinasi saklar yang mungkin yakni S_1 ON, S_2 OFF atau sebaliknya S_1 OFF dan S_2 ON. Sedangkan dari Tabel 2.2 terlihat ada 4 kondisi kombinasi saklar dan menghasilkan tiga nilai pada tegangan keluaran yakni $+V_{dc}$, 0, dan $-V_{dc}$



(a)



(b)

Gambar 2.2. Struktur inverter fase tunggal; (a) Inverter setengah jembatan (b) Inverter Jembatan-H

Tabel 2.1 Hubungan kondisi saklar dengan tegangan keluaran inverter setengah jembatan

S_1	S_2	Tegangan keluar (V_{out})
ON	OFF	$+ V_{dc}/2$
OFF	ON	$- V_{dc} /2$

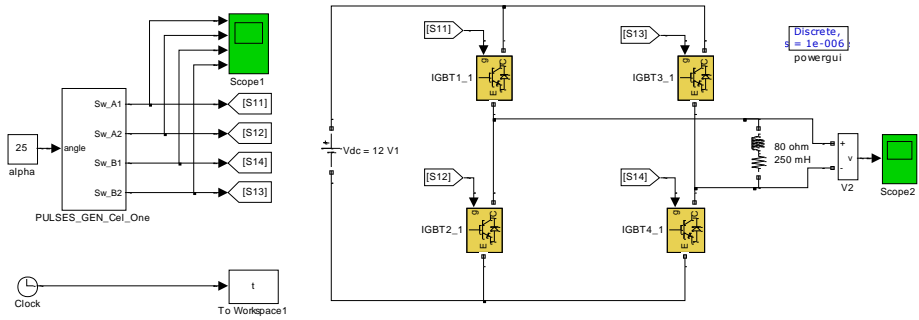
Tabel 2.2 Hubungan kondisi saklar dengan tegangan keluaran inverter jembatan-H

S_1	S_2	S_3	S_4	Tegangan keluar (V_{out})
ON	OFF	ON	OFF	0
ON	OFF	OFF	ON	$+ V_{dc}$
OFF	ON	ON	OFF	$- V_{dc}$
OFF	ON	OFF	ON	0

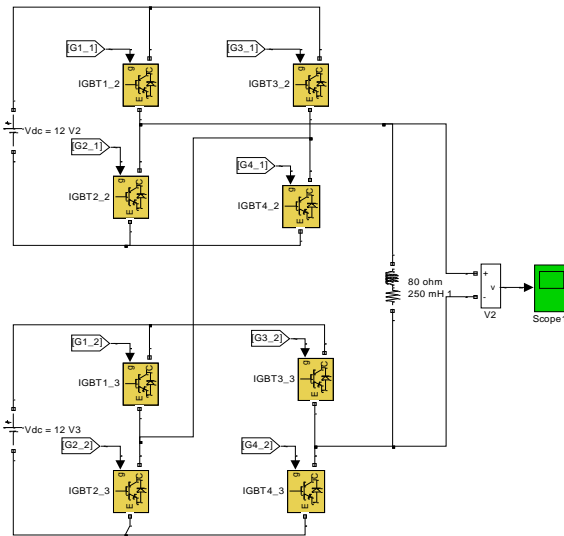
2.4 Simulasi metode konduksi 180°

Metode konduksi 180° diverifikasi menggunakan program komputer dan diterapkan pada inverter jembatan-H satu fase. Inverter dimodelkan menggunakan *Simpower Blockset*, sedangkan pulsa PWM dibangkitkan menggunakan *Simulink* / Matlab seperti terlihat pada Gambar 2.3 dan Gambar 2.4 untuk masing-masing inverter jembatan-H dan inverter jembatan bertingkat. Simulasi menggunakan tegangan $V_{dc} = 12$ Volt. Gambar 2.5 memperlihatkan hasil simulasi pulsa untuk ke empat saklar pada inverter Jembatan-H untuk 2 level tegangan. Dengan menggunakan referensi Gambar 2.3 maka jelas terlihat pada Gambar 2.5 bahwa saklar S_{11} dan S_{12} selalu dalam kondisi berlawanan demikian juga dengan saklar S_{13} dan S_{14} . Saklar S_{11} dan S_{13} (dan juga (S_{12} dan S_{14}) mempunyai pulsa yang sama. Dengan menggunakan pulsa seperti Gambar 2.5 tegangan keluaran

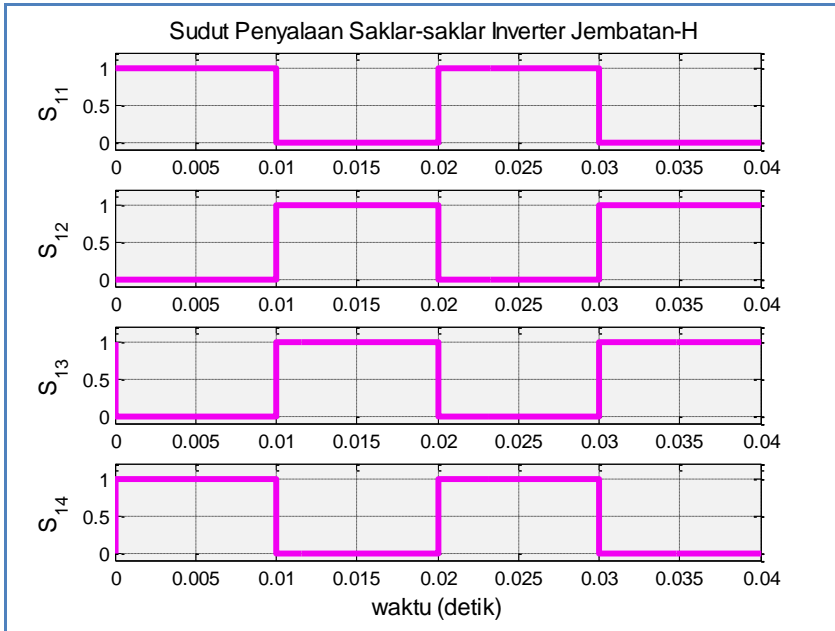
mengandung 2 kondisi saja yakni $+V_{dc}$ dan $-V_{dc}$ seperti terlihat pada Gambar 2.6.



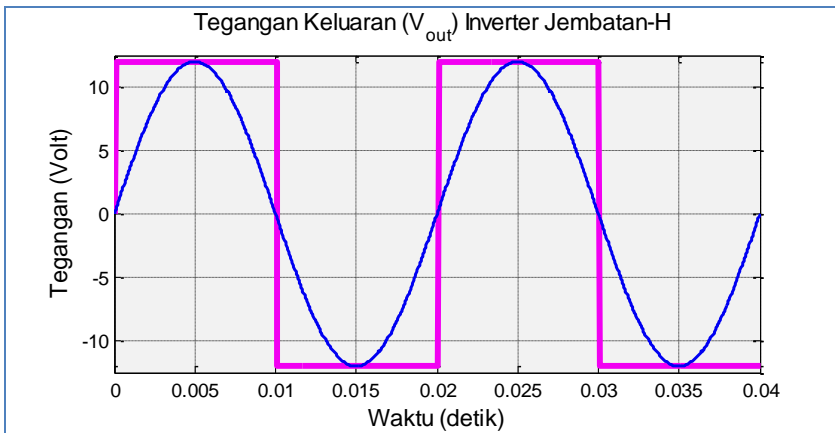
Gambar 2.3 Model Simulink inverter jembatan-H



Gambar 2.4 Model Simulink inverter jembatan bertingkat



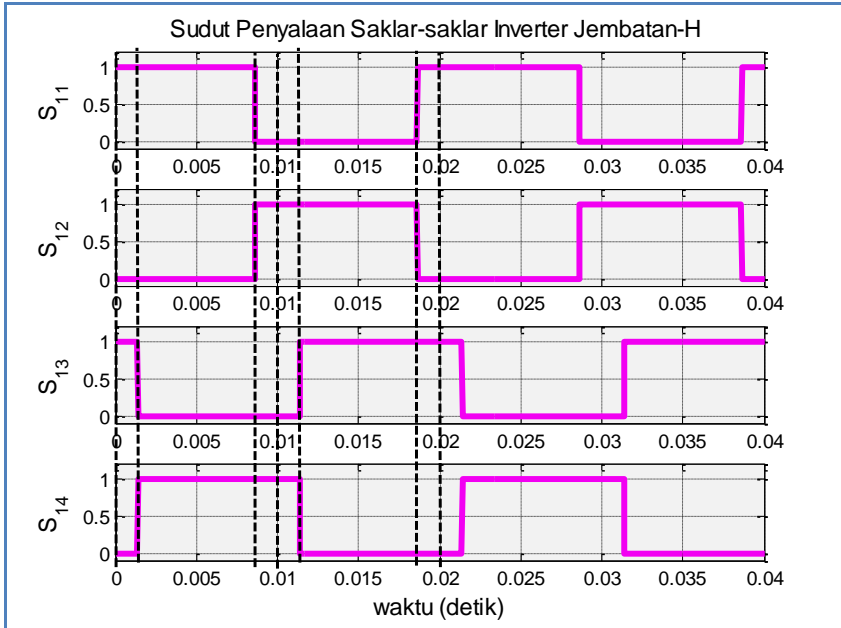
Gambar 2.5 Pulsa PWM inverter jembatan-H dengan metode konduksi 180°



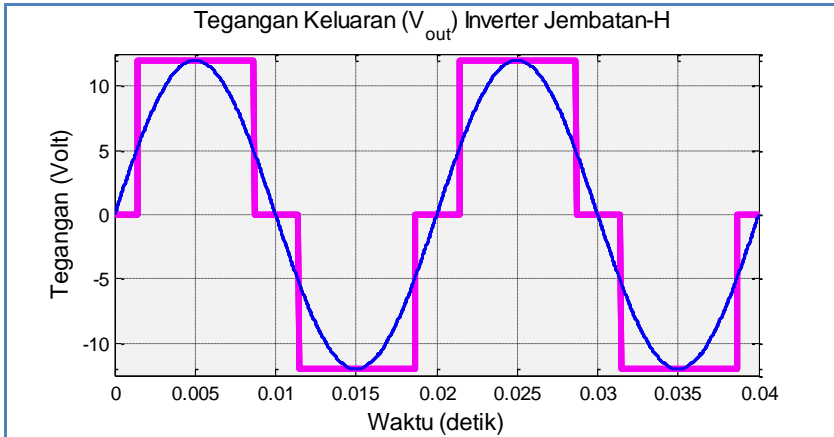
Gambar 2.6 Tegangan keluaran inverter jembatan-H dengan metode konduksi 180°

Untuk memperbaiki kualitas tegangan keluaran, inverter jembatan-H dapat dimodulasikan dengan memvariasikan pulsa PWM yakni dengan cara menggeser

pulsa sebesar α seperti terlihat pada Gambar 2.7. Dapat dilihat pada Gambar 2.7 bahwa S_{11} dan S_{12} digeser ke kiri sebesar α dan saklar S_{13} dan S_{14} digeser ke kanan sebesar α . Jika inverter Jembatan-H dimodulasikan dengan pulsa seperti Gambar 2.7 maka keluaran akan mengandung 3 kondisi saja yakni $+V_{dc}$, 0 dan $-V_{dc}$ seperti terlihat pada Gambar 2.8.

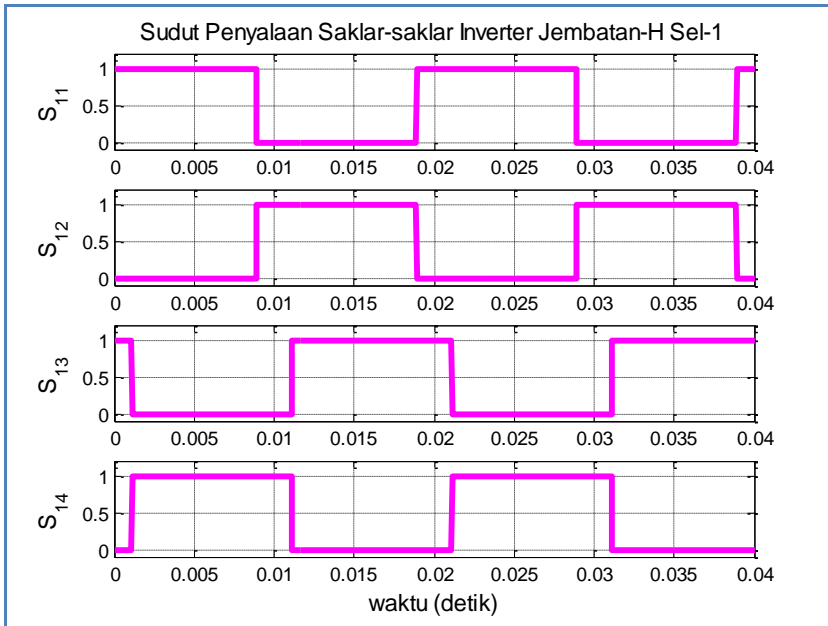


Gambar 2.7 Pulsa PWM inverter jembatan-H dengan metode konduksi 180° dengan pergeseran fase



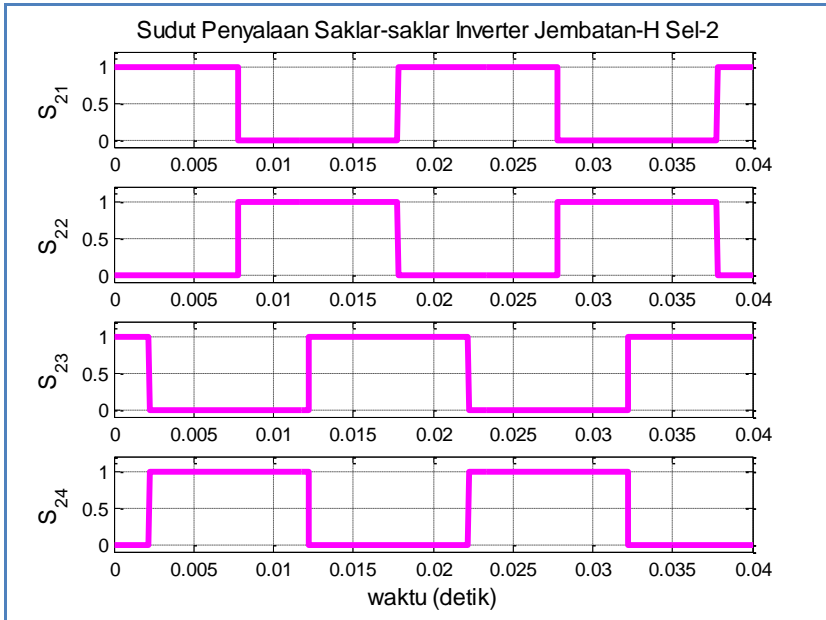
Gambar 2.8 Tegangan keluaran inverter jembatan-H dengan metode konduksi 180° dengan pergeseran fase

Selanjutnya dengan menggunakan referensi Gambar 2.3 pulsa PWM untuk saklar-saklar inverter jembatan bertingkat dibangkitkan dengan menggunakan prinsip yang sama dengan pulsa Gambar 2.7. Gambar 2.9 dan Gambar 2.10 memperlihatkan hasil simulasi pulsa untuk saklar-saklar pada inverter Jembatan-H sel 1 dan sel 2. Dapat dilihat pada Gambar 2.9 untuk sel 1 bahwa saklar S_{11} dan S_{12} dan juga S_{13} dan S_{14} selalu dalam kondisi berlawanan sedangkan S_{11} dan S_{13} (dan juga S_{12} dan S_{14}) mempunyai pulsa yang sama..

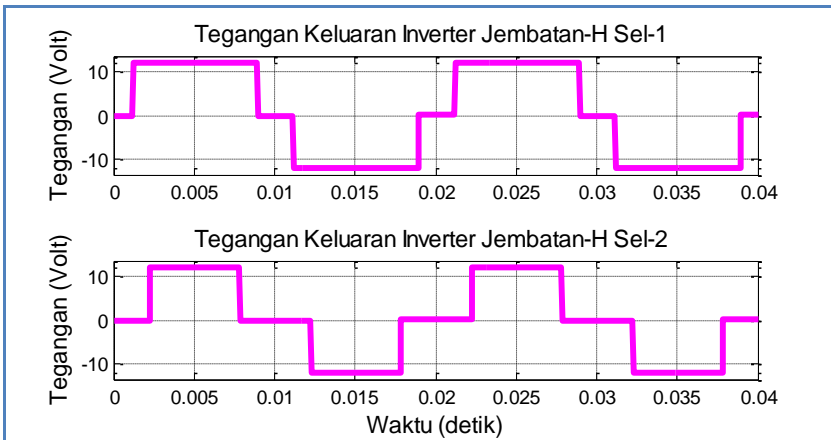


Gambar 2.9. Pulsa PWM untuk sel-1 inverter jembatan-H bertingkat

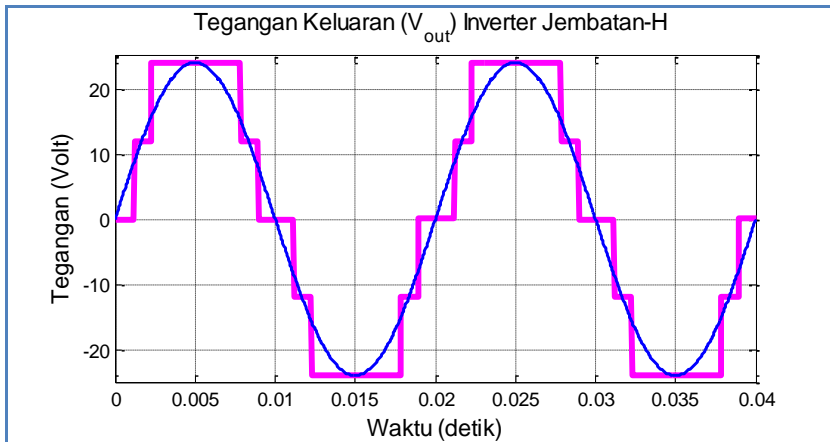
Gambar 2.10 memperlihatkan pulsa untuk untuk sel 2, terlihat bahwa saklar S_{21} dan S_{22} dan juga S_{23} dan S_{24} selalu dalam kondisi berlawanan sedangkan S_{21} dan S_{23} (dan juga (S_{22} dan S_{24})) mempunyai pulsa yang sama. Jika inverter Jembatan-H dimodulasikan dengan pulsa seperti Gambar 2.9 dan 2.10 maka keluaran tegangan inverter Jembatan-H sel 1 dan sel 2 seperti terlihat pada gambar 2.11 dan keluaran inverter Jembatan-H akan mengandung 5 kondisi (level) tegangan yakni $+2V_{dc}$, $+1V_{dc}$, 0 , $-1V_{dc}$, dan $-2V_{dc}$ seperti terlihat pada Gambar 2.12.



Gambar 2.10 Gambar 2.10 Pulsa PWM untuk sel-2 inverter jembatan-H bertingkat



Gambar 2.11 Tegangan keluaran masing-masing sel inverter jembatan bertingkat



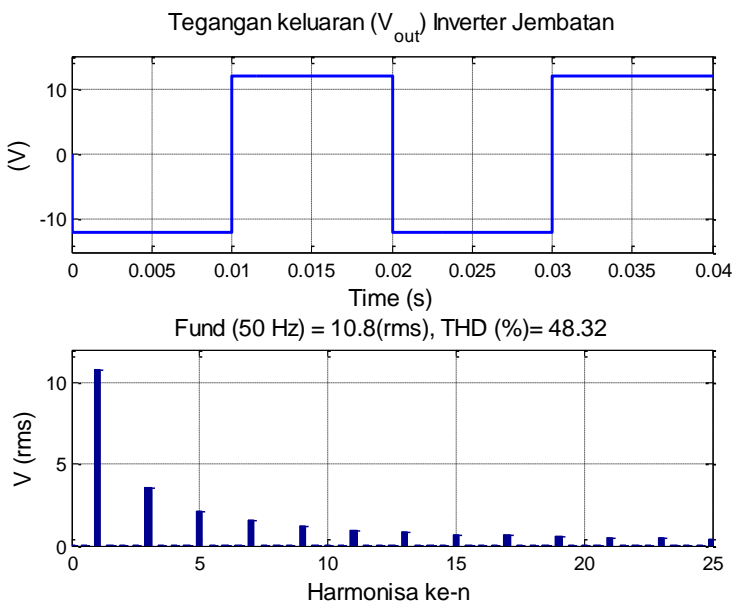
Gambar 2.12 Tegangan keluar inverter jembatan-H bertingkat dengan 2-sel

2.5 Kualitas tegangan yang dihasilkan

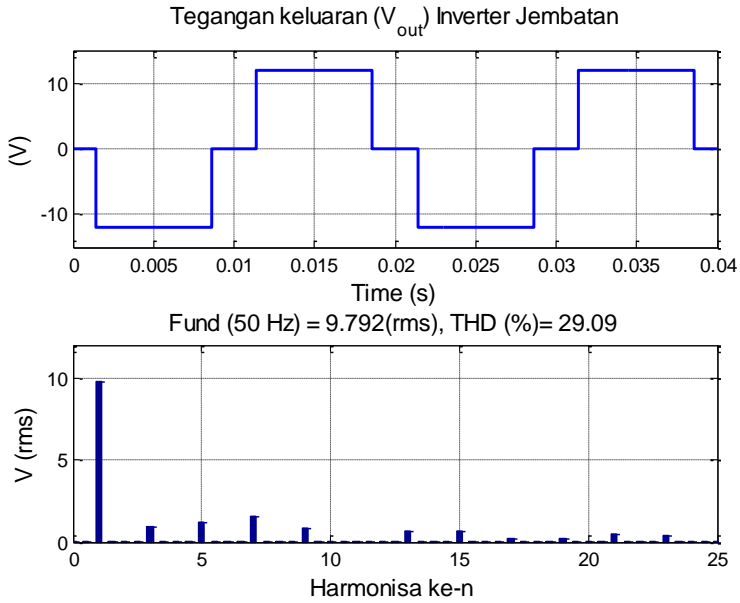
Untuk membandingkan kualitas tegangan keluar dari masing-masing teknik modulasi yang sudah diverifikasi dengan program Matlab/Simulink pada Sub Bab 2.4 maka tegangan keluaran diuraikan komponennya dengan menggunakan teknik FFT / *Fast Fourier Transform* dan hasilnya ditampilkan dalam bentuk spectrum harmonisa.

Gambar 2.13, Gambar 2.14 dan Gambar 2.15 memerlihatkan tegangan keluar dan spektrum harmonisa untuk tegangan keluar inverter jembatan-H satu fase dengan metode konduksi 180° , metode konduksi 180° dengan pergeseran fase dan inverter jembatan-H bertingkat dengan 2 sel. Terlihat pada Gambar 2.13 bahwa kualitas tegangan inverter jembatan-H dengan metode 180° masih mengandung harmonisa yang cukup besar, semua harmonisa rendah dari harmonisa ke-3, ke-5 dan seterusnya muncul sehingga kualitas tegangan sangat buruk yang ditandai dengan nilai THD yang cukup besar (48%). Kualitas

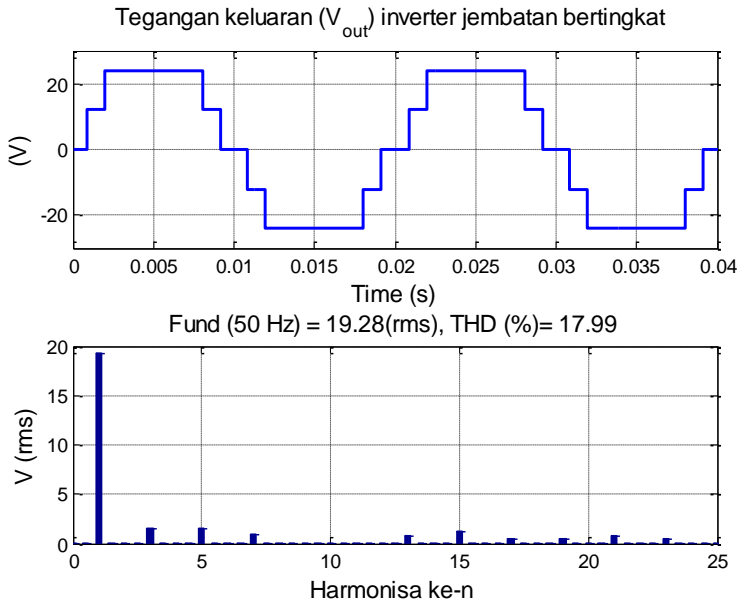
tegangan keluaran menjadi lebih baik dengan menggunakan metode konduksi 180 dengan pergeseran fase seperti terlihat pada Gambar 2.14. Dengan menggeser fase pulsa PWM maka magnitudo harmonisa rendah dapat diperkecil sehingga THD menjadi lebih kecil (29%). Selanjutnya pada Gambar 2.15 terlihat bahwa dengan menggunakan pulsa PWM seperti Gambar 2.9 dan 2.10 maka terbentuk gelombang tangga (staircase waveform) pada tegangan keluar inverter dengan magnitudo yang lebih tinggi dari magnitudo tegangan keluar inverter jembatan-H. Spektrum harmonisa memperlihatkan perbaikan kualitas tegangan dengan perbaikan nilai THD menjadi 17.99% yang berarti tegagan keluar lebih mendekati dengan bentuk gelombang sinsiodal referensi.



Gambar 2.13 Tegangan keluaran inverter Jembatan-H satu sel dengan metode konduksi 180° dan spektrum harmonisa



Gambar 2.14 Tegangan keluaran inverter Jembatan-H satu sel menggunakan metode konduksi 180° dengan pergeseran fase dan spektrum harmonisa



Gambar 2.15 Tegangan keluaran inverter Jembatan-H bertingkat (dua sel) dan spektrum harmonisa

2.6 Penutup

BAB 2 ini membahas secara terperinci teknik modulasi inverter jembatan-H dengan metode konduksi 180° . Simulasi inverter jembatan-H dilakukan dengan menggunakan *Simpower Blockset*, dan pulsa PWM dibangkitkan menggunakan *Simulink / Matlab*. Bentuk pulsa dan hasil tegangan keluaran inverter untuk metode konduksi 180° , metode konduksi 180° dengan pergeseran fase dan teknik modulasi untuk inverter jembatan-H bertingkat diperlihatkan dengan ilustrasi gambar yang lengkap. Hasil simulasi memperlihatkan perbaikan bentuk tegangan keluaran yang dihasilkan dengan cara menggeser pulsa dan juga dengan merangkai inverter inverter jembatan-H secara bertingkat (*cascaded*) untuk menghasilkan tegangan keluar berbentuk tangga (square waveform).

Pustaka

A.K.A. Khan, D.B. Amir, M.F. Athar, U. Nasir, Electrical System (Motor Control) Of A Series HEV, National University of Sciences and Technology (NUST), Islamabad, Pakistan

BAB III

METODE SINUSOIDAL PWM

3.1 Pendahuluan

Metoda Sinusoidal PWM (SPWM) adalah metode yang sangat populer digunakan untuk mengatur tegangan keluaran inverter satu fase jembatan-H maupun inverter tiga fase. Dulu, sebelum adanya system kontrol digital, pembangkitan pulsa dengan metoda SPWM dilakukan dengan menggunakan peralatan analog. Saat ini, ketika sistem digital semakin populer, pengaturan inverter dengan metode SPWM juga bisa dilakukan secara digital. Pada metode SPWM saklar-saklar inverter dikontrol dengan frekwensi yang lebih cepat dibandingkan dengan metoda konduksi 180° .

Dengan mengontrol inverter menggunakan frekwensi yang lebih cepat, harmonisa rendah dari tegangan keluaran inverter dapat digeser ke sekitar harmonisa frekwensi *switching* dan kelipatannya. Selain dapat menghilangkan harmonisa rendah, keuntungan metode SPWM dibandingkan dengan metode konduksi 180° adalah magnitude sekaligus frekwensi tegangan keluaran dapat dikontrol secara bersamaan sehingga dapat dipergunakan untuk mengontrol kecepatan motor dengan metode v/f konstan. Sebaliknya pada metoda konduksi 180° dengan tegangan DC-link input tetap hanya frekuensi dari tegangan keluaran yang bisa dikontrol sedangkan magnitudenya bernilai tetap (tidak bisa dikontrol).

3.2 Prinsip operasi metode Sinusoidal PWM (SPWM)

Prinsip dari metode SPWM adalah pembangkitan pulsa diperoleh dengan membandingkan gelombang sinusoidal referensi (V_{ref}) dengan gelombang segitiga atau gelombang gigi gergaji frekwensi tinggi. Gelombang segitiga atau gigi gergaji disebut juga gelombang pembawa / *carrier* (V_c). Pembangkitan pulsa dari metode SPWM menggunakan logika yang sangat sederhana seperti diatur oleh persamaan (3-1). Persamaan (3-1) berarti jika gelombang sinus referensi (V_{ref}) lebih besar dari gelombang *carrier* (V_c) maka pulsa bernilai satu (*high*) dan sebaliknya jika gelombang sinus (V_{ref}) lebih kecil dari gelombang *carrier* (V_c) maka pulsa bernilai nol (*low*). Gelombang *carrier* biasanya mempunyai frekwensi minimal 20 kali lebih cepat dari frekwensi gelombang sinus sehingga dapat menggeser harmonisa rendah cukup jauh dari komponen fundamental tegangan keluaran inverter.

$$\begin{aligned} V_{ref} > V_c & \quad M_x = 1 \text{ (high)} \\ V_{ref} < V_c & \quad M_x = 0 \text{ (low)} \end{aligned} \dots\dots\dots(3.1)$$

Pada inverter jembatan-H jumlah sinyal *carrier* yang digunakan bisa lebih dari satu. Teknik ini disebut juga metode *multi carrier based* PWM. Berdasarkan posisi sinyal-sinyal *carrier* yang digunakan terhadap sinyal sinusoidal referensi maka metode SPWM dapat dikelompokkan menjadi :

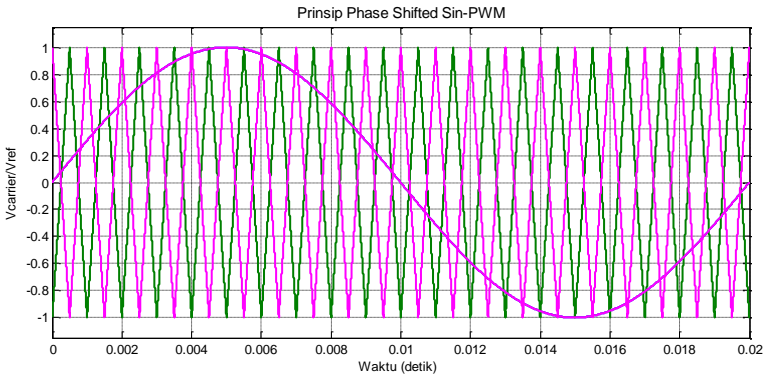
1. Metoda SPWM dengan phase digeser (*Phase Shifted*)
2. Metode SPWM dengan level digeser (*Level Shifted*) yang terdiri dari PD, POD, dan APOD.

3.2.1 Metoda SPWM dengan phase digeser (*Phase Shifted*)

Metoda SPWM dengan phase digeser (*Phase Shifted*) yang selanjutnya disebut PS SPWM menggunakan beberapa sinyal carrier yang penempatannya diatur berdasarkan jumlah sinyal carier yang digunakan sesuai dengan persamaan (3.2)

$$\theta = 360/n \dots \dots \dots (3.2)$$

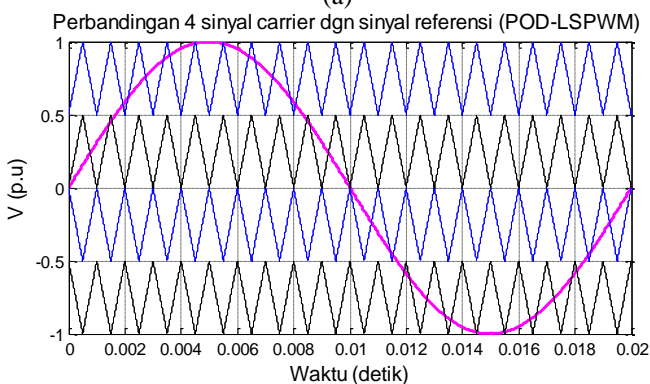
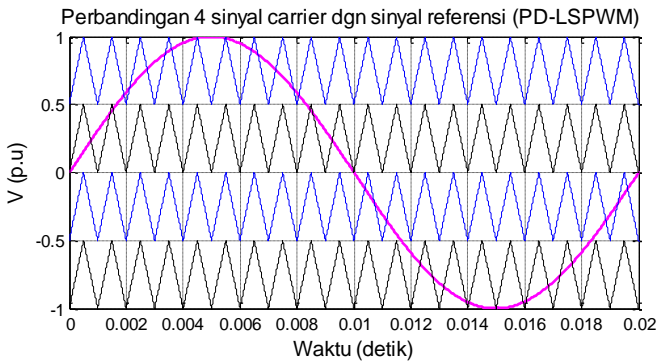
dimana θ adalah jarak antar sinyal carrier dan n adalah jumlah sinyal carrier Gambar 3.1 memperlihatkan metode multi carrier SPWM dimana sinyal referensi dibandingkan dengan 2 sinyal carrier yang mempunyai beda phase sebesar 180° yang ditentukan dengan persamaan (3.2)

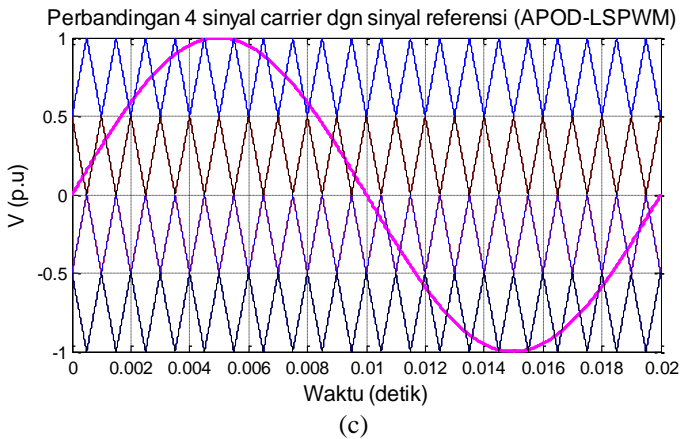


Gambar 3.1 Perbandingan sinyal *carrier* dengan sinyal referensi pada PS-SPWM

3.2.2 Metoda SPWM dengan level digeser (*Level Shifted*)

Metode Level Shifted SPWM (LS SPWM) juga beroperasi dengan cara membandingkan sinyal referensi dengan beberapa sinyal *carrier* tetapi posisi sinyal *carrier*-nya berbeda level satu dengan yang lain sedangkan phasanya bisa sama atau berbeda. Berdasarkan penempatan sinyal *carrier*-nya, metode LS-SPWM dibedakan menjadi *Phase Distribution* (PD) PWM, *Phase Opposition Distribution* (POD) PWM dan *Alternatif Phase Opposition Distribution* (APOD) PWM. Gambar 3.2 memperlihatkan prinsip dari metode LS SPWM dengan empat buah sinyal *carrier*.





Gambar 3.2 Prinsip dari Metoda LS-SPWM, (a) Phase Distribution (PD), (b) Phase Opposition Distribution (POD), (c) Alternative Phase Opposition Distribution (APOD)

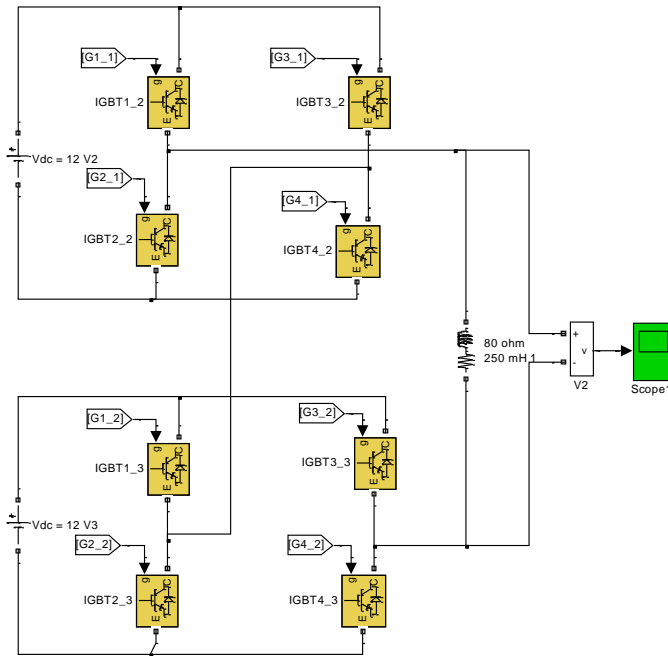
Seperti terlihat pada Gambar 3.2 PD SPWM menggunakan sinyal carrier dengan phase yang sama, sedangkan POD SPWM menggunakan sinyal carrier diatas sumbu datar berbeda phase sebesar 180° dengan sinyal carrier dibawah sumbu datar, dan APOD SPWM, menggunakan sinyal carrier yang berdekatan berbeda phase sebesar 180° . Teknik APOD SPWM hanya bisa diterapkan pada inverter dengan jumlah sinyal carrier lebih dari 2.

3.3 Hasil simulasi metoda SPWM

3.3.1 Metoda SPWM dengan phase digeser (*Phase Shifted*)

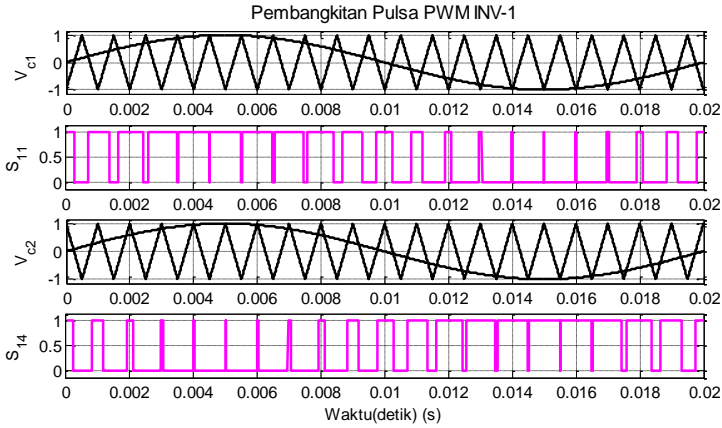
Metode multi-carrier PS SPWM diverifikasi menggunakan Simulink / Matlab. Inverter jembatan 2 sel dimodelkan dengan menggunakan *SimPower BlockSet* seperti terlihat pada Gambar 3.3 yang merupakan pengulangan Gambar 2.4. Frekwensi sinyal carrier ditentukan sebesar 1000 Hz dan frekwensi sinyal

referensi adalah 50 Hz. Inverter jembatan 2-sel yang terdiri dari delapan saklar elektronik memerlukan 4 sinyal carier yang mempunyai beda phase masing-masing 90° dengan phase terdekat. Gambar 3.4 dan 3.5 memperlihatkan perbandingan sinyal referensi dengan masing-masing sinyal carier untuk inverter sel-1 dan sel-2. Hasil perbandingan sinyal carrier dengan

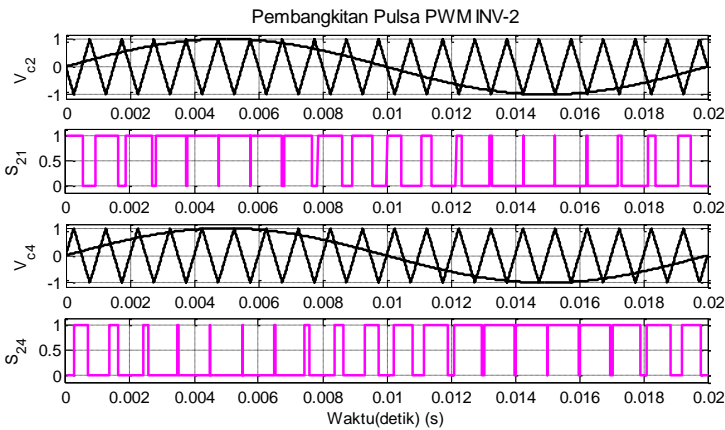


Gambar 3.3 Blok Simulink inverter bertingkat dengan 2 buah sel jembatan-H

sinyal referensi menghasilkan pulsa PWM seperti Gambar 3.5 dan Gambar 3.6 untuk masing-masing S_{11} , S_{14} , S_{21} , dan S_{24} . Sedangkan untuk PWM saklar S_{12} , S_{13} dan S_{21} S_{23} tidak diperlihatkan karena hanya merupakan kebalikan dari masing-masing saklar S_{11} , S_{14} , S_{21} , dan S_{24} . Simulasi menggunakan tegangan DC-link seragam sebesar 12 V.



Gambar 3.4 Sudut penyalan saklar-saklar inverter jembatan-H Sel-1

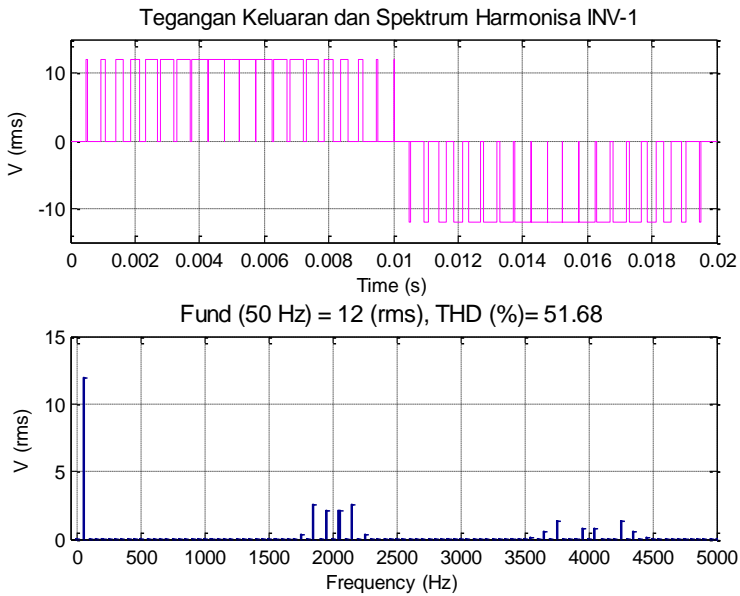


Gambar 3.5 Sudut penyalan saklar-saklar inverter jembatan-H Sel 2

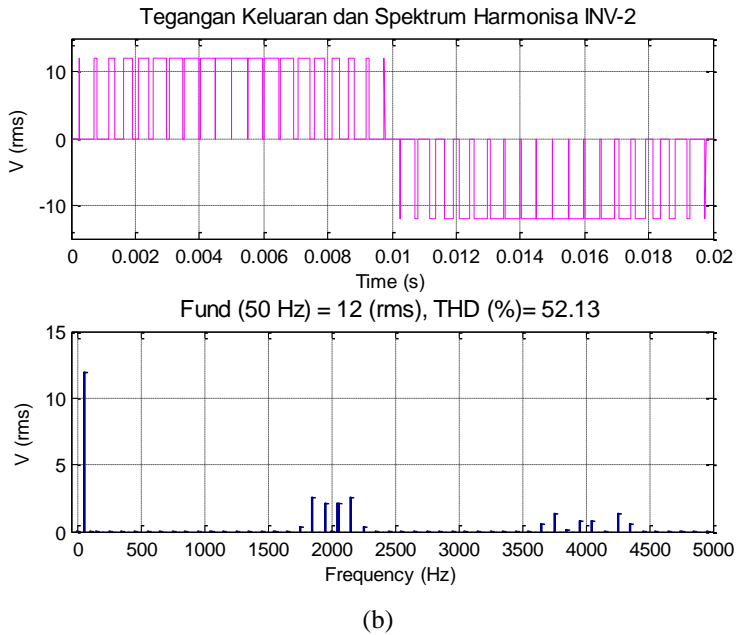
Pulsa PWM Gambar 3.4. dan 3.5 memperlihatkan bahwa masing-masing pulsa mempunyai pola yang berbeda karena perbedaan posisi antara sinyal carrier terhadap sinyal referensi. Seperti halnya dengan metode modulasi yang lain antara saklar pada lengan bagian atas dan saklar pada lengan bawah juga selalu berlawanan (S_{11} komplementer dengan S_{12} , S_{13}

berlawanan dengan S_{14} , S_{21} berlawanan dengan S_{22} dan juga S_{23} berlawanan dengan S_{24}).

Jika inverter Jembatan-H 2-sel dimodulasikan dengan pulsa PWM seperti Gambar 3.4 untuk sel 1 dan pulsa PWM Gambar 3.5 untuk Sel 2 maka tegangan keluaran inverter Jembatan-H sel 1 dan sel 2 seperti terlihat pada Gambar 3.6 dan tegangan keluar inverter jembatan dilihatkan pada Gambar 3.7.

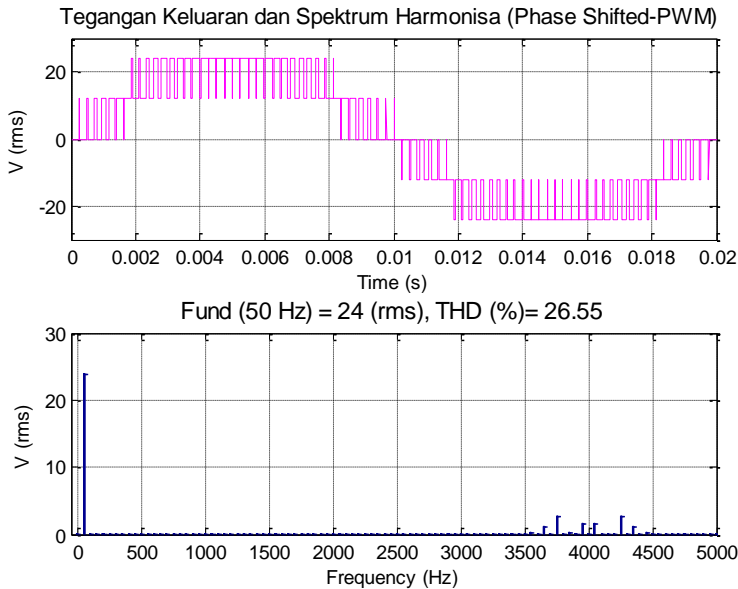


(a)



Gambar 3.6. Tegangan keluaran inverter jembatan-H dan spektrum harmonisa Sel-1 dan (b) Sel-2

Gambar 3.6 memperlihatkan tegangan keluar 3 level tercacah dengan frekwensi 2 kHz atau 2 kali frekwensi switching signal carrier yang digunakan. Spektrum Harmonisa memperlihatkan tegangan fundamental tanpa harmonisa tingkat rendah. Harmonisa rendah berhasil digeser ke frekwensi 2 kHz dan kelipatannya. Tegangan keluar inverter diperlihatkan pada Gambar 3.7.



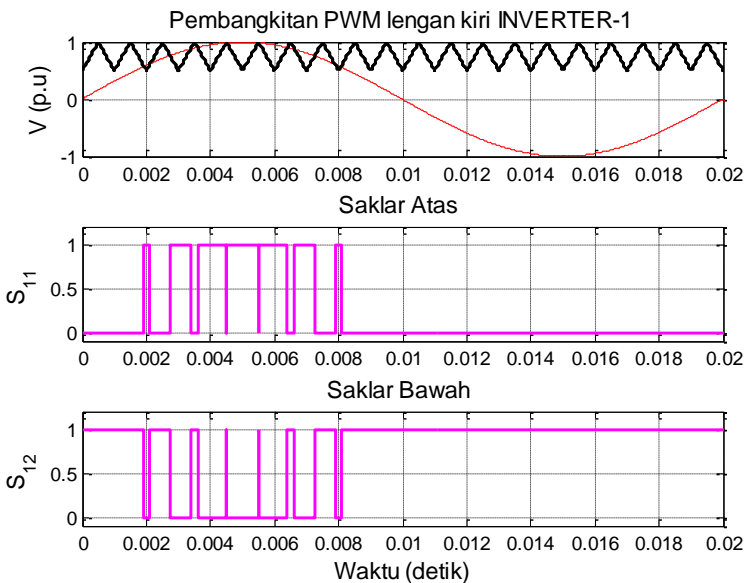
Gambar 3.7. Tegangan keluaran inverter jembatan-H dan spektrum harmonisa menggunakan PS-SPWM

Dari Gambar 3.7 terlihat gelombang tegangan keluaran 5 level dengan kerapatan yang relatif tinggi dan dari spektrum harmonisa terlihat bahwa harmonisa rendah digeser ke sekitar frekwensi 4000 Hz yakni 4 kali dari frekwensi switching atau frekwensi sinyal cariernya. Dengan menggunakan tegangan DC-link masing-masing sebesar 12 V, nilai fundamental tegangan keluaran adalah 24 V (rms) dan nilai THD (*Total Harmonics Distortion*) adalah 26,55%.

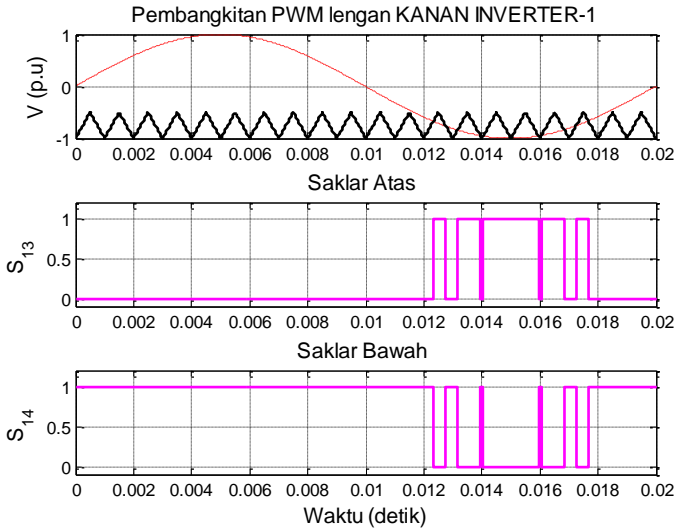
3.3.2 Metoda SPWM dengan level digeser (LS-SPWM)

Metoda LS-SPWM juga diverifikasi menggunakan program Simulink/Matlab dan digunakan untuk mengontrol inverter jembatan 2 sel. Teknik LS-SPWM pertama yang disimulasikan adalah metode PD SPWM. Pada metode LS-SPWM ini digunakan 4 set sinyal carier dimana ke-4 sinyal carrier yang digunakan mempunyai fasa yang sama tetapi memiliki level yang berbeda seperti terlihat pada Gambar 3.2 (a). Perbandingan masing-

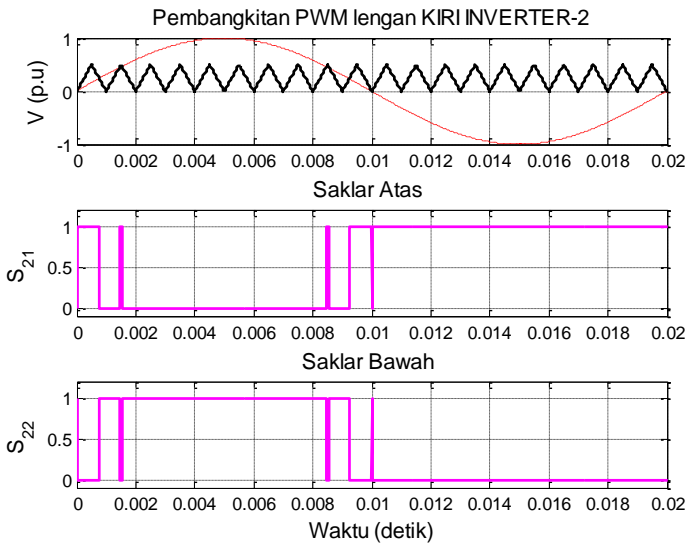
masing sinyal carrier dengan sinyal referensi (sinusoidal) untuk metode Phase Distribution (PD) LS-SPWM diperlihatkan pada Gambar 3.8 – 3.11. Dari sinyal PWM Gambar 3.8 – 3.11 terlihat masing-masing saklar dimodulasikan pada waktu yang berbeda-beda pada satu siklus operasi inverter. Dibandingkan dengan teknik PS-SPWM, PWM pada teknik LS-SPWM hanya aktif seperempat bagian saja. Seperti halnya metode-metode yang sudah dijelaskan pulsa dari saklar-saklar yang berada pada lengan yang sama selalu dioperasikan secara komplementer untuk menghindari kondisi hubung singkat.



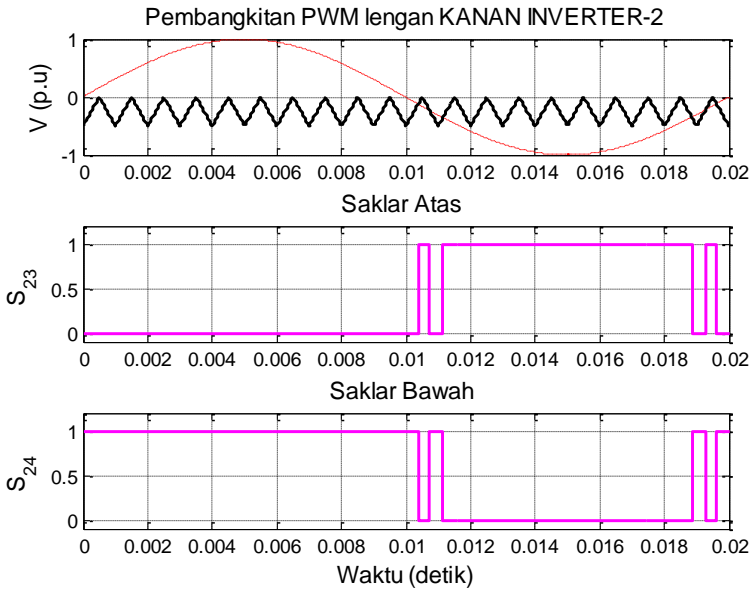
Gambar 3.8 Pulsa PWM lengan kiri sel -1 inverter jembatan bertingkat dengan PD LS-SPWM



Gambar 3.9 Pulsa PWM lengan kanan sel -1 inverter jembatan bertingkat dengan PD LS-SPWM

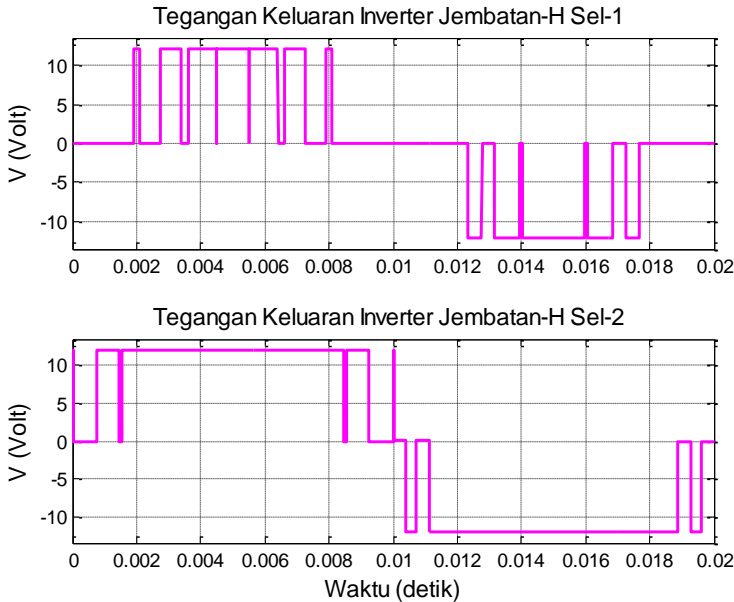


Gambar 3.10. Pulsa PWM lengan kiri sel -2 inverter jembatan bertingkat dengan PD LS-SPWM



Gambar 3.11. Pulsa PWM lengan kanan sel -2 inverter jembatan bertingkat dengan PD LS-SPWM

Jika inverter Jembatan-H dimodulasikan dengan pulsa seperti Gambar 3.8, 3.9 untuk sel 1 dan Gambar 3.10, 3.11 untuk Sel 2 maka tegangan keluaran inverter Jembatan-H Sel 1 dan Sel 2 seperti terlihat pada Gambar 3.12.



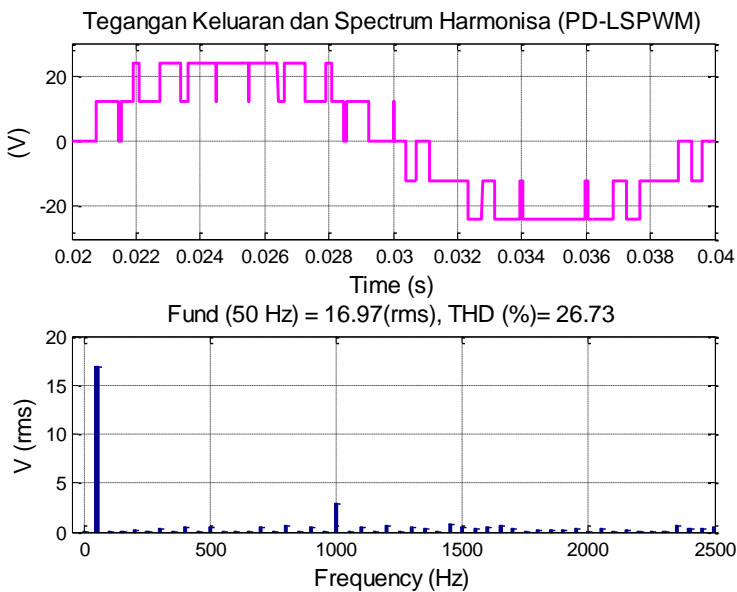
Gambar 3.12 Tegangan keluar masing-masing sel inverter jembatan bertingkat dengan PD LS-SPWM

Tegangan keluaran total inverter diperlihatkan pada Gambar 3.13. Terlihat pada Gambar 3.13 bahwa inverter menghasilkan gelombang tegangan 5-level dengan kerapatan yang relatif lebih renggang dibandingkan dengan tegangan keluaran dari inverter yang dikontrol dengan metode PS SPWM (Gambar 3.7). Dari spektrum harmonisa terlihat bahwa harmonisa rendah berhasil digeser ke sekitar switching frekwensi 1 kHz dan kelipatannya dengan THD sebesar 26.73%.

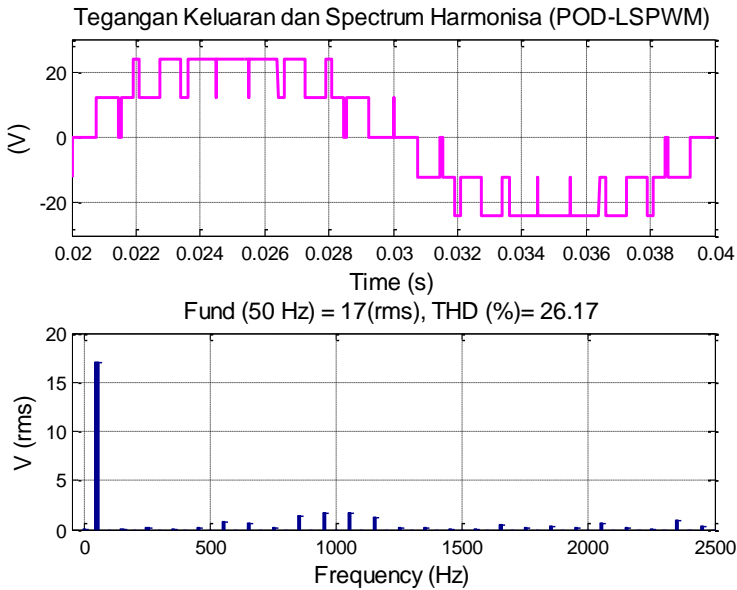
Selanjutnya dengan cara yang hampir sama dengan metode PD SPWM, metode POD dan APOD SPWM diverifikasi menggunakan Simulink/Matlab. Bentuk pulsa masing-masing saklar tidak banyak berbeda dengan metoda PD SPWM, perbedaan kecil disebabkan oleh perbedaan phase dari sinyal yang digunakan untuk masing-masing levelnya. Hasil tegangan keluar inverter

yang dimodulasikan dengan metode POD dan APOD SPWM diperlihatkan pada Gambar 3.14 dan 3.15.

Secara umum bentuk gelombang tegangan yang dihasilkan oleh masing masing metode PD, POD dan APOD PWM sangat mirip yakni dibentuk oleh 5 level tegangan DC, namun demikian secara lebih mendetail lebar dari tegangan DC yang membentuk gelombang tegangan keluaran tidak sama sehingga kualitas tegangannya juga tidak sama. Hal itu terlihat dari spektrum harmonisa yang memperlihatkan kandungan harmonisa yang berbeda walaupun semuanya digeser ke sekitar frekwensi switching 1 kHz. Hal itu terlihat dari nilai THD yang berbeda dimana untuk metode POD SPWM itu sebesar 26.17% dan metode APOD SPWM sebesar 28%.

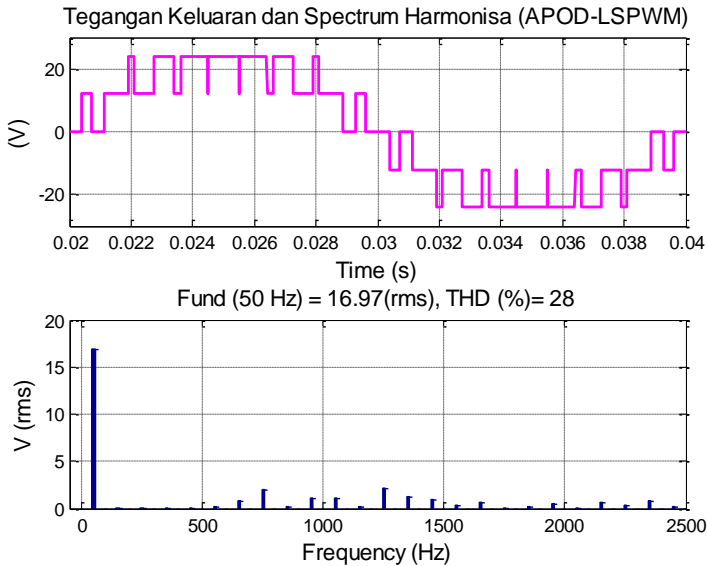


Gambar 3.13 Tegangan keluaran inverter jembatan bertingkat dan spektrum harmonisa menggunakan metode PD LS-SPWM



Gambar 3.14 Tegangan keluaran inverter jembatan bertingkat dan spektrum harmonisa menggunakan metode POD LS-SPWM

Untuk melihat lebih jauh performasi dari masing-masing teknik PWM yang dibahas, kualitas tegangan keluaran dibandingkan dan ditampilkan pada Tabel 3.1. Terlihat dari Tabel 3.1 bahwa perbandingan ke empat metode tersebut memperlihatkan THD dan besar nilai fundamental tegangan keluaran yang berbeda-beda. Dari perbandingan ke-empat metode SPWM, metoda PS SPWM memberikan hasil dengan THD yang paling kecil, sedangkan metode yang lain memperlihatkan perbedaan THD yang tidak terlalu signifikan. Metode PS SPWM memberikan nilai yang lebih baik karena mampu menggeser harmonisa rendah lebih jauh yakni 4 kali dari frekwensi switching yang digunakan.



Gambar 3.15. Tegangan keluaran inverter jembatan bertingkat dan spektrum harmonisa menggunakan metode APOD LS-SPWM

Tabel 3.1 Resume performa tegangan keluar menggunakan metode SPWM

No	Metoda PWM	THD (%)	Fundamental (V)
1	PS SPWM	26.55	24
2	PD SPWM	26.73	16.97
3	POD SPWM	26.17	17
4	APOD SPWM	28	16.97

3.4 Penutup

Bab 3 ini membahas metode multi-carrier SPWM. Berdasarkan posisi sinyal carrier, metode SPWM dapat dibedakan menjadi metode SPWM dengan pergeseran phase (Phase Shifted) dan metode SPWM dengan pergeseran level (Level Shifted). Level Shifted PWM juga dapat dibedakan berdasarkan posisi sinyal carrier yang satu dengan sinyal carrier yang lain yakni yang diberi nama Phase Distribution, Phase Opposition Distribution dan Alternative Phase Opposition Distribution. Metode PWM diverifikasi menggunakan Simulink/Matlab dan digunakan untuk mengontrol inverter bertingkat dengan 2 sel inverter jembatan-H. Hasil simulasi memperlihatkan bahwa metode POD SPWM memberikan tegangan keluar dengan THD yang paling kecil sedangkan metode PS SPWM memberikan tegangan keluaran dengan nilai fundamental yang paling besar.

Pustaka

I.B.F. Citarsa, I.N.W. Satiawan, I.K. Wiryajati, Comparison Analysis of Phase-Shifted and Level-Shifted Carrier-Based PWM on the Five-Level Single-Phase Cascaded H-Bridge (CHB) Multilevel Inverter, International Conference on EECCIS 2016 Proceeding, 2016

BAB IV

METODE PWM CAMPURAN / MIXED SWITCHING FREQUENCY (MSF) PWM

4.1 Pendahuluan

Teknik Modulasi selanjutnya yang dibahas pada buku ini adalah teknik modulasi campuran yakni teknik modulasi yang beroperasi dengan cara dimana satu sel inverter dimodulasikan dengan kecepatan switching rendah (metode konduksi 180°) dan satu sel inverter dimodulasikan dengan kecepatan switching tinggi. Karena masing-masing sel inverter jembatan-H dimodulasikan dengan frekuensi yang berbeda maka teknik modulasi diberi nama teknik modulasi Campuran / Hybrid. Pada teknik modulasi campuran ini, inverter yang dimodulasikan dengan frekwensi rendah berperan untuk membentuk gelombang keluaran dasar dan inverter yang beroperasi dengan frekuensi tinggi berperan sebagai filter untuk menyaring harmonisa rendah yang dihasilkan oleh inverter yang dimodulasikan dengan metode konduksi 180° sehingga tegangan keluaran bebas dari komponen harmonisa rendah.

Dengan menggunakan teknik campuran ini, tegangan keluaran inverter mengandung komponen fundamental dan komponen harmonisa disekitar frekuensi switching inverter yang dimodulasikan dengan

frekuensi tinggi dan kelipatannya. Kelebihan dari teknik ini adalah kedua sel inverter dapat dioperasikan dengan rasio tegangan DC-link yang sama atau berbeda. Perbandingan DC-link 1:1 menghasilkan tegangan keluaran dengan 5 level tegangan sedangkan perbandingan DC-link 1:2 dapat menghasilkan 7 level tegangan pada tegangan keluaran. Tegangan keluaran dengan jumlah level yang lebih banyak dapat memperbaiki kualitas tegangan inverter.

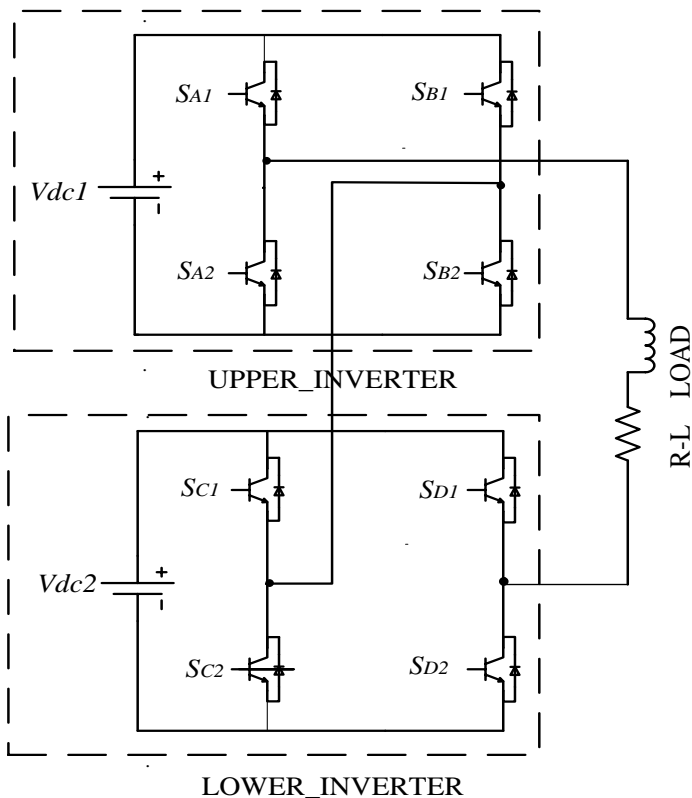
Namun demikian, salah satu kekurangan metode ini adalah kedua sel inverter yang beroperasi pada kecepatan frekuensi berbeda akan mengakibatkan ketidak seimbangan jumlah komutasi switching sehingga salah satu inverter mungkin akan rusak lebih cepat. Masalah tersebut dapat diatasi dengan menggunakan komponen yang berbeda pada masing-masing sel inverter. Misalnya, inverter 1 yang dioperasikan dengan kecepatan rendah dapat menggunakan IGBT sedangkan inveter dengan switching cepat dapat menggunakan MOSFET.

4.2 Prinsip operasi Metode Campuran / MSF PWM

Struktur inverter jembatan-H bertingkat (*cascaded H-Bridge inverter / CHB*) dapat terdiri dari dua atau lebih inverter jembatan-H. Inverter CHB dapat dicatu oleh sumber DC-link terpisah atau sumber DC-link tunggal. Struktur inverter CHB dengan sumber DC-link terpisah ditunjukkan pada Gambar 4.1. Inverter tipe ini terdiri dari dua sel *inverter H-bridge* yang menggunakan 8 saklar semikonduktor daya (*Power Semiconductor*). Teknik modulasi yang berlaku untuk setiap sel inverter mungkin sama atau berbeda. Jika kedua inverter beroperasi dengan teknik PWM berbeda dimana satu inverter beroperasi dengan kecepatan rendah (metode konduksi 180°) seperti yang telah dijelaskan pada Bab 2 dan satu inverter beroperasi dengan frekwensi switching yang cepat seperti metode Sinusoidal PWM (dijelaskan

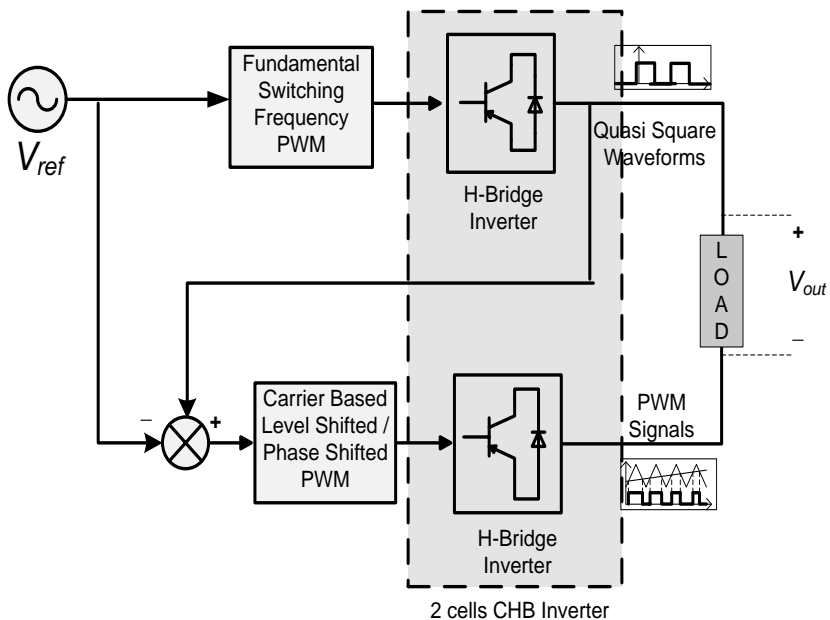
pada Bab 3) maka metode PWM gabungan atau kombinasi dari dua metode PWM yang berbeda (dikenal sebagai metode PWM campuran / *mixed switching frequency* (MSF).

Pada metode MSF, pulsa PWM untuk inverter dengan switching yang lebih cepat dibangkitkan membandingkan sinyal pembawa (carrier) dengan sinyal modulasi. Sinyal modulasi diperoleh dengan mengurangi tegangan sinusoidal referensi dengan tegangan



Gambar 4.1. Skema inverter jembatan bertingkat (lima-tingkat)

keluaran inverter yang beroperasi dengan metode konduksi 180° yang berupa gelombang kotak (square waveform). Prinsip operasi MSF PWM diilustrasikan dengan diagram blok seperti diperlihatkan pada Gambar 4.2. Bentuk sinyal modulasi dan sinyal-sinyal yang membentuknya (sinyal sinus dan sinyal gelombang kotak) diperlihatkan pada Gambar 4.3 untuk perbandingan tegangan DC-link 1:1. Sinyal modulasi berupa gelombang sinusoidal termodifikasi. Sinyal tersebut kemudian dibandingkan dengan gelombang pembawa (carrier) frekwensi tinggi untuk menghasilkan pulsa PWM.



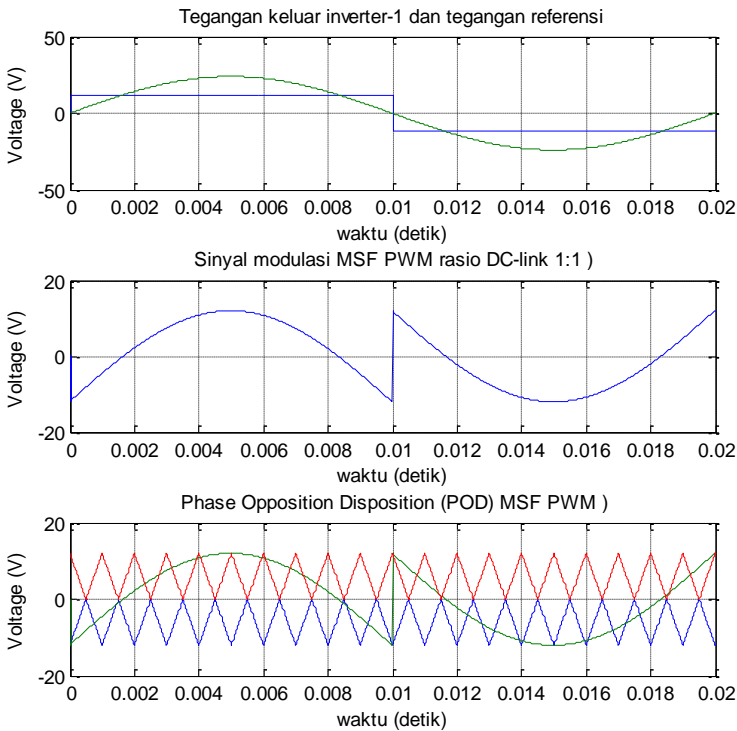
Gambar 4.2. Diagram skematik metode PWM campuran / MSF dari inverter CHB

Sinyal PWM inverter yang beroperasi pada frekwensi tinggi dihasilkan dengan logika yang sederhana seperti halnya pada metode Sinusoidal PWM yakni jika sinyal modulasi (V_{mod}) lebih besar dari sinyal

carrier (V_{cr}) maka pulsa bernilai satu (high) dan sebaliknya jika V_{mod} kecil dari V_{cr} , pulsa bernilai nol (low). Logika tersebut sesuai dengan persamaan (4-1)

$$\begin{aligned} &\text{if } v_{ref} > 0 \text{ then } S_{x(x=A,B,C,D)} = 1 \text{ (High)} \\ &\text{else } S_{x(x=A,B,C,D)} = 0 \text{ (Low)} \end{aligned} \dots\dots\dots(4.1)$$

dimana S_{x1} adalah fungsi switching dari saklar bagian atas.



Gambar 4.3. Pembentukan sinyal modulasi untuk metode MSF PWM (rasio tegangan DC-link 1:1)

4.3 Simulasi Metoda Campuran / MSF PWM

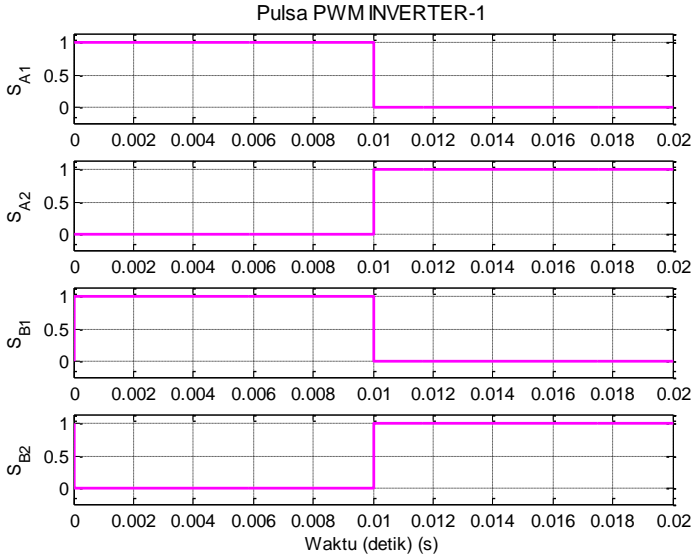
Metode MSF PWM diverifikasi menggunakan simulasi komputer. Inverter dimodelkan menggunakan *Sim-Power Blockset* dan pulsa PWM dibangkitkan menggunakan Simulink. Dalam simulasi, efek inverter *dead-time* waktu diabaikan. Frekuensi switching inverter yang beroperasi dalam mode PWM adalah 1 kHz. THD dihitung menggunakan (4.2) di mana harmonisa orde rendah termasuk dalam perhitungan hingga 100.000 Hz (atau hingga harmonik ke-2000). Inverter CHB menggunakan tegangan DC-link terpisah. Kedua inverter menggunakan total tegangan DC-link adalah 24 V dengan rasio tegangan DC-link baik 12 V: 12 V atau 16 V: 8 V.

$$THD_v = \frac{\sqrt{\sum (V_n^2 - V_1^2)}}{V_1} \dots\dots\dots(4.2)$$

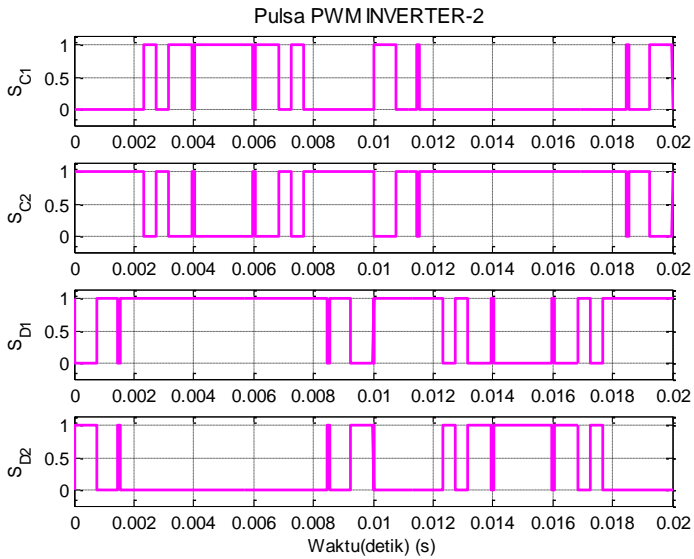
dengan V_n adalah nilai rms dari harmonik ke- n , V_1 adalah nilai komponen fundamental, n adalah harmonik orde rendah dan r adalah harmonik maksimum yang dimasukkan dalam perhitungan THD.

4.3.1 Tegangan keluar untuk rasio DC-link 1:1 (12 V: 12 V)

Pada perbandingan tegangan DC-link 1 : 1, pulsa PWM dibangkitkan dengan menggunakan sinyal modulasi seperti diperlihatkan pada Gambar 4.3. Dengan menggunakan prinsip yang dijelaskan pada Sub Bab 4.2 diperoleh sinyal PWM seperti pada Gambar 4.4 dan Gambar 4.5 untuk masing-masing inverter sel-1 dan inverter sel-2.



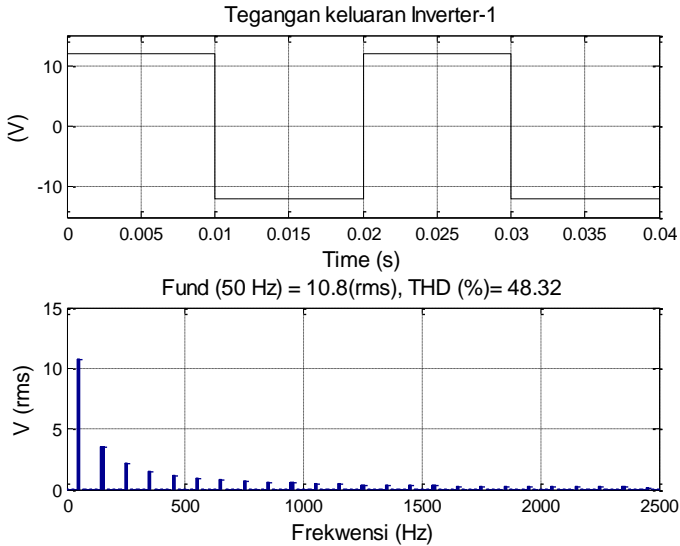
Gambar 4.4. Pulsa PWM sel-1 inverter CHB dengan MSF PWM (rasio DC-link 1:1)



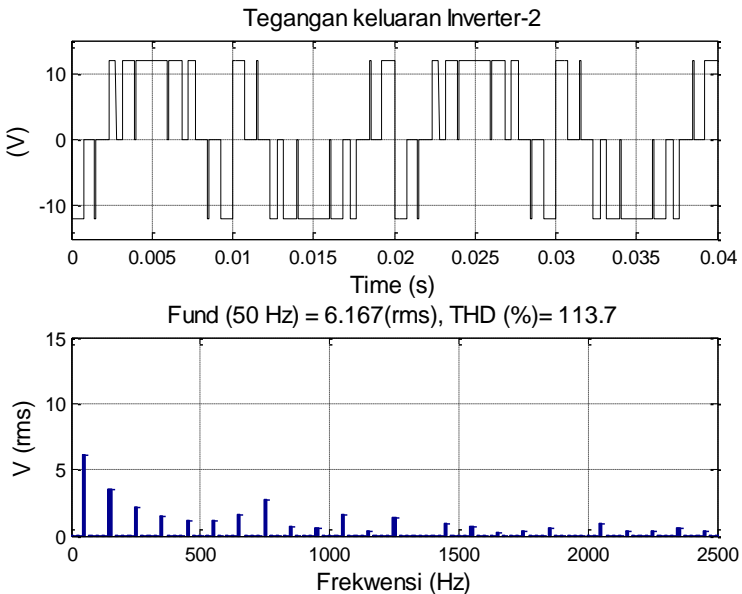
Gambar 4.5. Pulsa PWM sel-2 inverter CHB dengan MSF PWM (rasio DC-link 1:1)

Dari pulsa Gambar 4.4 terlihat bahwa inverter sel-1 beroperasi dengan frekwensi fundamental 50 Hz sedangkan inverter sel-2 beroperasi dengan frekwensi switching 1000 Hz (20 kali lebih cepat dari inverter sel-1). Dengan menggunakan pulsa Gambar 4.4 dan 4.5 dihasilkan tegangan keluaran masing-masing inverter seperti diperlihatkan pada Gambar 4.6 dan 4.7 dan tegangan keluaran total seperti Gambar 4.8.

Gambar 4.6 dan 4.7 menunjukkan tegangan keluar dari inverter individu yang dimodulasi menggunakan MSF PWM dan spektrum harmonisa masing-masing. Hal ini menunjukkan bahwa inverter sel-1 menghasilkan bentuk gelombang tangga tiga tingkat yang mengandung beberapa komponen harmonisa orde rendah tertentu dan komponen fundamental. Sementara itu, inverter sel-2 menghasilkan tegangan keluaran tiga level yang tercacah dengan nilai harmonisa yang kurang lebih sama dengan harmonisa yang dihasilkan oleh inverter sel-1. Akibatnya, tegangan keluar inverter hanya mengandung komponen fundamental dan tidak lagi mengandung harmonisa orde rendah. Dalam hal ini, inverter sel-2 berfungsi sebagai filter yang beroperasi dalam mode switching tinggi untuk mencegah harmonisa tingkat rendah pada tegangan keluar.

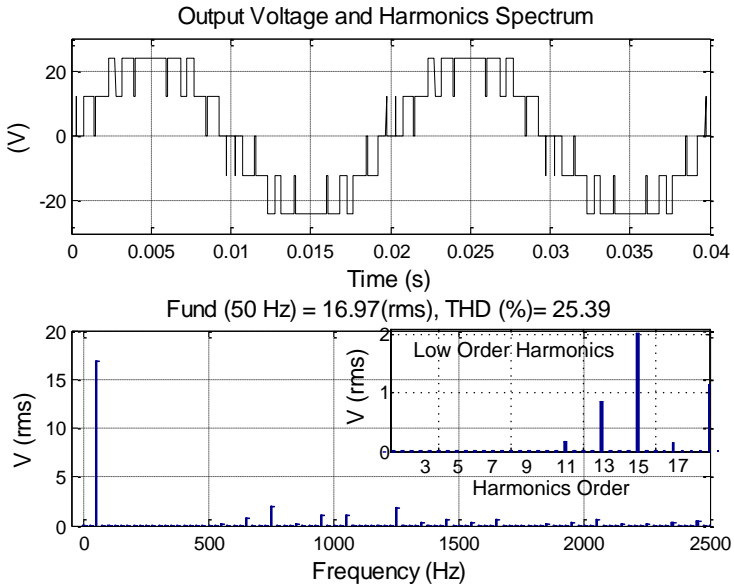


Gambar 4.6. Tegangan keluaran sel-1 inverter dengan MSF PWM dan spektrum harmonisa (rasio DC-link 1:1)



Gambar 4.7. Tegangan keluaran sel-2 inverter dengan MSF PWM dan spektrum harmonisa (rasio DC-link 1:1)

Gambar 4.8 menunjukkan tegangan keluaran total inverter bertingkat dengan teknik MSF PWM pada rasio DC-link 1: 1 dan spektrum harmonisa. Terlihat bahwa bahwa tegangan keluaran terdiri dari 5 level tegangan DC yakni $\{+24 \text{ V}, +12 \text{ V}, 0, -12 \text{ V}, -24 \text{ V}\}$. Semua kombinasi Switching yang menghasilkan 5 level tegangan pada tegangan keluaran inverter dirangkum dalam Tabel 4.1. Komponen fundamental dari tegangan keluar adalah 16,97 V (rms) dan nilai THD adalah 25,39%. Spektrum harmonisa menunjukkan bahwa tegangan keluar tidak mengandung harmonisa rendah karena metode MSF PWM yang digunakan mampu menggeser harmonisa rendah ke sekitar frekwensi switching dan kelipatannya. Hal ini sangat menguntungkan dimana jika tegangan di saring dengan filter maka tegangan keluar menjadi sudah mendekati sinusoidal. Pembesaran spektrum harmonisa menunjukkan kualitas tegangan keluar yang sangat baik. Ini menunjukkan bahwa harmonik orde rendah tertinggi adalah harmonik ke-15 (750 Hz) yang memiliki nilai 2 V (rms) atau 12% terhadap komponen fundamental, sedangkan harmonik lebih rendah dari 15 harmonik berhasil dihilangkan dengan metode MSF PWM.



Gambar 4.8. Tegangan keluar inverter bertingkat dengan metode MSF PWM dan spektrum harmonisa (rasio DC-link 1:1)

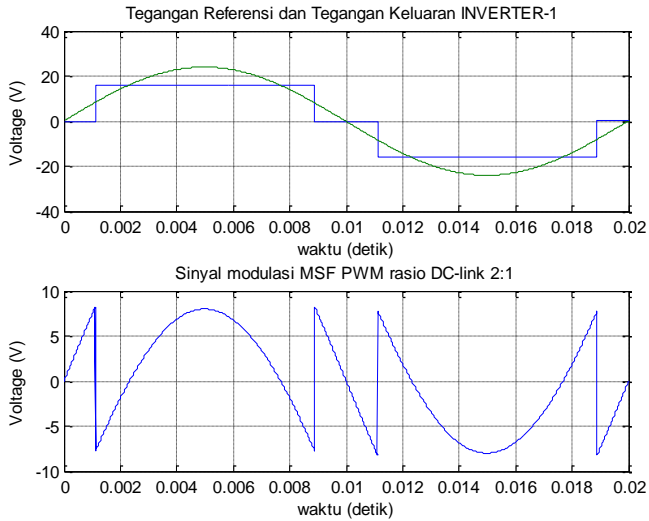
Tabel 4.1. Sakelar operasi dengan tingkat tegangan yang berbeda untuk DC-link yang sama

SWITCHES ACTIVATED								VOLTAGE LEVEL
S _{A1}	S _B	S _C	S _{D1}	S _{A2}	S _{B2}	S _{C2}	S _{D2}	
1	0	1	0	0	1	0	1	24 V ($V_{dc1} + V_{dc2}$)
1	1	1	0	0	0	0	1	12 V (V_{dc2})
1	0	0	0	0	1	1	1	12 V (V_{dc1})
1	0	1	1	0	1	0	0	12 V (V_{dc1})
0	0	1	0	1	1	0	1	12 V (V_{dc2})
1	1	1	1	0	0	0	0	0
1	1	0	0	0	0	1	1	0
1	0	0	1	0	1	1	0	0
0	1	1	0	1	0	0	1	0

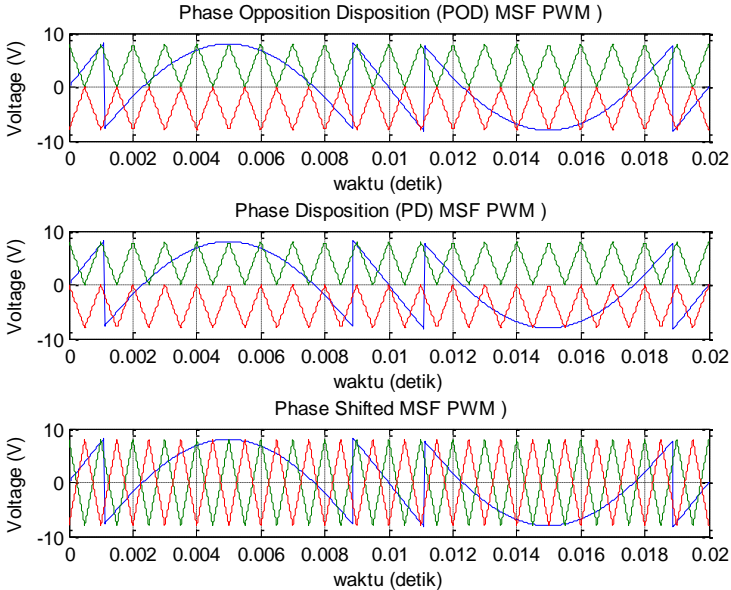
0	0	1	1	1	1	0	0	0
0	0	0	0	1	1	1	1	0
0	1	1	1	1	0	0	0	$-12 V (V_{dc1})$
0	0	0	1	1	1	1	0	$-12 V (V_{dc2})$
0	1	0	0	1	0	1	1	$-12 V (V_{dc1})$
1	1	0	1	0	0	1	0	$-12 V (V_{dc2})$
0	1	0	1	1	0	1	0	$-24 V (-V_{dc1}-V_{dc2})$

4.3.2 Tegangan keluar untuk rasio DC-link 2:1 (16 V: 8 V)

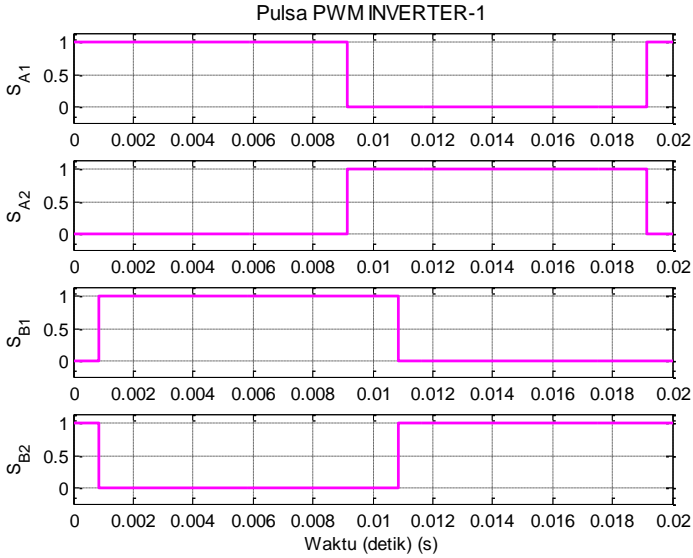
Penerapan metode MSF PWM pada inverter bertingkat 2 sel dengan perbandingan tegangan DC-link 2 : 1 menggunakan prinsip yang sama dengan yang diterapkan pada perbandingan tegangan DC-link 1 : 1. Perbedaannya adalah inverter sel-1 diset untuk menghasilkan tegangan keluaran 3 level yang mengandung nilai $+V_{dc}$, 0 dan $-V_{dc}$. Sinyal modulasi dihasilkan dengan cara yang sama yakni mengurangi gelombang sinusoidal referensi dengan gelombang quasi tegangan keluaran inverter sel -1 seperti diperlihatkan pada Gambar 4.9. Pulsa PWM dibangkitkan dengan membandingkan sinyal modulasi Gambar 4.9 (bawah) dengan gelombang segitiga. Berdasarkan posisi gelombang segitiga, teknik carrier based PWM seperti level shifted dan phase shifted bisa juga diimplementasikan pada metode MSF PWM ini. Gambar 4.10 memperlihatkan posisi sinyal modulasi terhadap sinyal carrier. Pulsa PWM menggunakan metode POD PWM diperlihatkan pada Gambar 4.11 dan 4.12 untuk saklar-saklar pada sel-1 dan sel 2 inverter jembatan bertingkat. Tegangan keluaran masing-masing inverter berikut spektrum harmonisnya diperlihatkan pada gambar 4.13 dan 4.14 sedangkan tegangan keluaran total inverter diperlihatkan pada Gambar 4.15



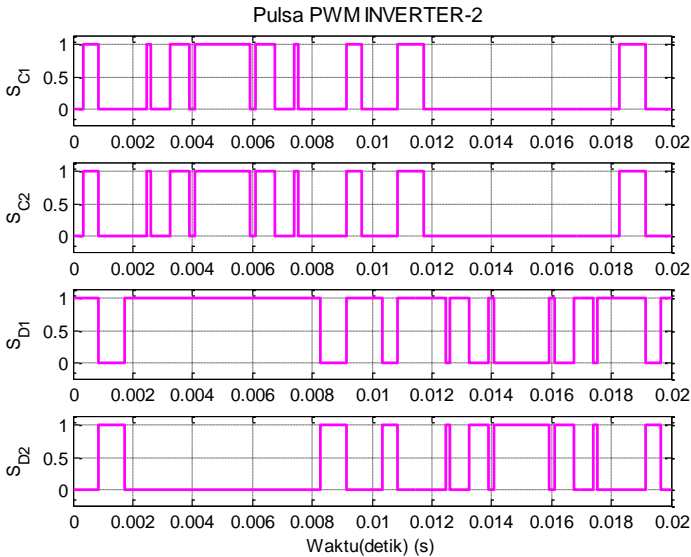
Gambar 4.9. Pembentukan sinyal modulasi untuk metode MSF PWM (rasio tegangan DC-link 2:1)



Gambar 4.10. Variasi sinyal carrier untuk pembangkitan pulsa pada metode MSF PWM



Gambar 4.11. Pulsa PWM sel-1 inverter CHB dengan MSF PWM (rasio DC-link 2:1)

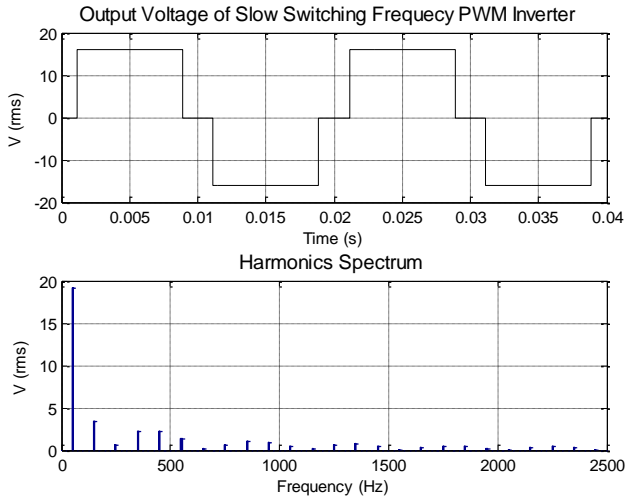


Gambar 4.12. Pulsa PWM sel-2 inverter CHB dengan MSF PWM (rasio DC-link 2:1)

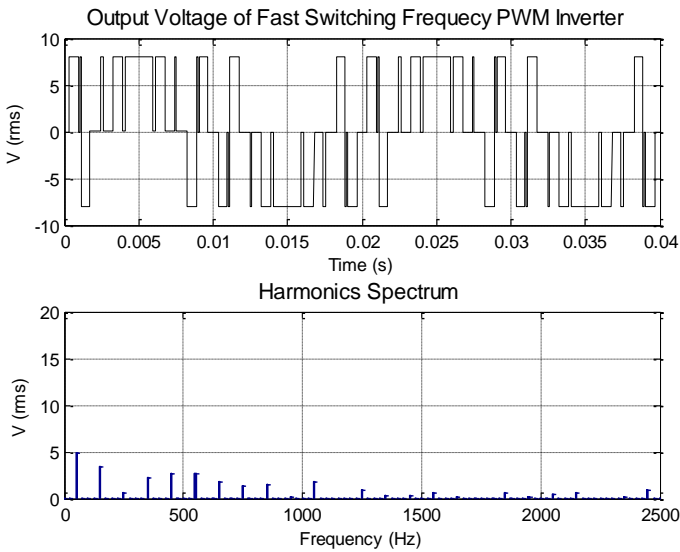
Tabel 4. 2. Sakelar Operasi dengan level tegangan yang berbeda untuk dc-link yang tidak sama

SWITCHES ACTIVATED								VOLTAGE LEVEL
S _{A1}	S _B 1	S _C 1	S _D 1	S _A 2	S _B 2	S _C 2	S _{D2}	
1	0	1	0	0	1	0	1	$24V(V_{dc1}+V_{dc2})$
1	1	1	0	0	0	0	1	$8V(V_{dc2})$
1	0	0	0	0	1	1	1	$16V(V_{dc1})$
1	0	1	1	0	1	0	0	$16V(V_{dc1})$
0	0	1	0	1	1	0	1	$8V(V_{dc2})$
1	1	1	1	0	0	0	0	0
1	1	0	0	0	0	1	1	0
1	0	0	1	0	1	1	0	0
0	1	1	0	1	0	0	1	0
0	0	1	1	1	1	0	0	0
0	0	0	0	1	1	1	1	0
0	1	1	1	1	0	0	0	$-16V(V_{dc1})$
0	0	0	1	1	1	1	0	$-8V(V_{dc2})$
0	1	0	0	1	0	1	1	$-16V(V_{dc1})$
1	1	0	1	0	0	1	0	$-8V(V_{dc2})$
0	1	0	1	1	0	1	0	$-24V(-V_{dc1}-V_{dc2})$

Terlihat pada Gambar 4.13 bahwa tegangan keluaran inverter sel-1 jembatan mengandung 3 kondisi dengan yakni +18 V, 0 dan -18 V. Spektrum harmonisa mengandung



Gambar 4.13. Tegangan keluar sel-1 inverter dengan MSF PWM dan spektrum harmonisa (rasio DC-link 2 : 1)



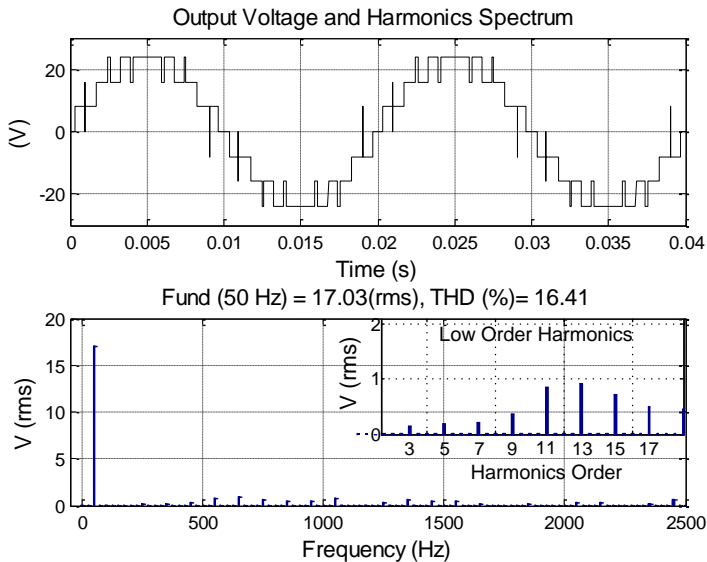
Gambar 4.14. Tegangan keluar sel-2 inverter dengan MSF PWM dan spektrum harmonisa (rasio DC-link 2 : 1)

komponen fundamental dan harmonisa tingkat rendah ke-3, ke-5, ke-7 dan seterusnya. Sedangkan inverter sel-2 menghasilkan tegangan tercacah dengan nilai puncak +6 V, 0, dan -6 V. Spektrum harmonisa mengandung komponen harmonisa yang lebih kecil dari inverter sel-1 dan komponen harmonisa tingkat rendah yang besarnya hampir sama dengan gelombang quasi yang dihasilkan inverter jembatan sel-1. Jadi pada rasio tegangan DC-link 2: 1, inverter sel-1 menghasilkan nilai fundamental yang lebih tinggi dibanding inverter sel-2. Ini berarti bahwa inverter sel-1 mensuplay lebih banyak daya ke beban daripada inverter sel-2. Seperti halnya pada perbandingan tegangan DC-link 1:1, inverter sel-2 berfungsi sebagai penyaring komponen harmonisa rendah dari inverter. Tegangan keluaran inverter diperlihatkan pada Gambar 4.15.

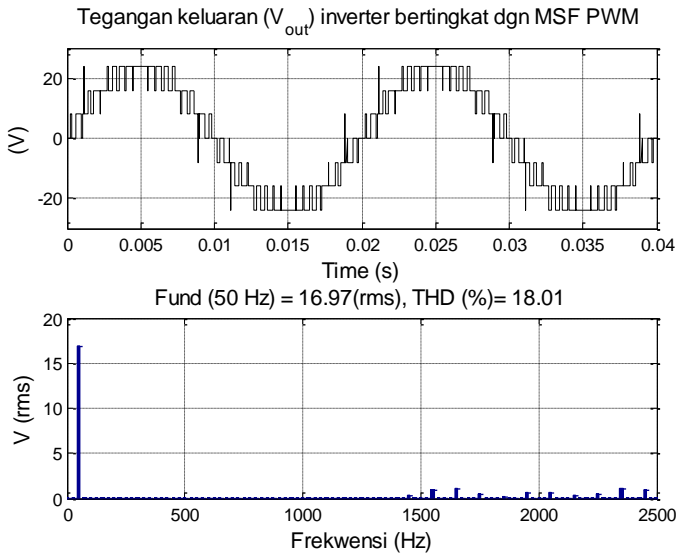
Gambar 4.15 menunjukkan tegangan keluaran total inverter CHB multi-level menggunakan teknik MSF PWM dengan rasio DC-link 2:1, Terlihat pada Gambar 4.15 bahwa tegangan keluaran terdiri dari 7 level tegangan DC yakni bernilai {+ 24V, +16 V, +8 V, 0, -8 V, -16 V, -24 V}. Semua kombinasi switching yang menghasilkan 7 level tegangan dalam tegangan keluar dirangkum dalam Tabel 4.2. Dari spektrum harmonisa terlihat tegangan keluar mengandung komponen fundamental sebesar 16,97 V (rms) dan nilai THD sebesar 16,41%. Dibandingkan dengan MSF PWM pada inverter dengan perbandingan tegangan DC-link 1:1, THD berkurang dari 25.39 menjadi 16.41. Ini berarti bertambahnya level tegangan pada tegangan keluar dapat mempengaruhi kualitas tegangan keluar menjadi lebih baik. Potongan spektrum yang diperbesar memperlihatkan harmonisa orde rendah berhasil ditekan menjadi kurang dari 5% terhadap nilai komponen fundamental. Hal ini berarti kualitas tegangan keluar meningkat pada perbandingan tegangan DC 2 : 1. Dibandingkan dengan inverter CHB konvensional, untuk menghasilkan tegangan 7 level diperlukan 12 saklar, sedangkan pada metode MSF PWM hanya membutuhkan 8 saklar untuk menghasilkan tegangan 7 level. Penghematan jumlah saklar yang digunakan untuk

membangkitkan tegangan keluaran 7 level merupakan salah satu keuntungan dari penerapan metode MSF PWM.

Gambar 4.15 adalah tegangan keluar yang diperoleh dengan menerapkan metode level shifted (LS) PWM khususnya metode Phase Opposition Distribution (POD) LS PWM, Gambar 4.16 adalah tegangan keluar yang dihasilkan dengan menggunakan metode Phase shifted PWM. Dari spectrum harmonisa terlihat harmonisa rendah tergeser 2 kali lebih jauh yakni ke sekitar 2 kHz dan kelipatannya. Walaupun harmonisa tergeser lebih jauh tetapi THD tegangan keluar tidak menjadi lebih baik hanya saja secara visual terlihat bahwa nilai komponen harmonisa rendah menjadi lebih kecil dibandingkan dengan tegangan yang diperoleh dengan metode Level Shifted pada Gambar 4.15.



Gambar 4. 15. Tegangan keluar dan spectrum harmonisa metode MSF PWM dengan metode Level Shifted PWM (rasio DC-link 2: 1)



Gambar 4.16. Tegangan keluar dan spektrum harmonisa metode MSF dengan metode Phase Shifted PWM (rasio DC-link 2 : 1)

4.4 Penutup

Bab 4 ini membahas metode PWM campuran atau MSF PWM pada inverter bertingkat dengan dua sel inverter jembatan-H. Inverter CHB menggunakan tegangan DC-link terpisah. Kedua inverter menerapkan rasio tegangan *DC-link* baik 12 V : 12 V atau 16 V : 8 V sehingga total tegangan DC-link adalah sebesar 24 V. Metoda MSF PWM diverifikasi menggunakan Simulink/Matlab. Pada perbandingan DC-link 1: 1 dihasilkan tegangan keluaran 5 level dan pada perbandingan tegangan DC-link 2: 1 dihasilkan tegangan keluar 7 level sehingga kualitas tegangan keluar menjadi lebih baik.

Pustaka

- I. B. F. Citarsa, I. N. W. Satiawan, I. K. Wiryajati, Supriono, Performance Analysis Of Cascaded H-Bridge Multilevel Inverter Using Mixed Switching Frequency With Various Dc-Link Voltages, *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* 105 012003, 2016

BAB V

METODE

SELECTIVE HARMONICS

ELIMINATION (SHE)

5.1 Pendahuluan

Teknik penghilangan harmonik harmonik selektif diperkenalkan pada tahun 1973. Ide dari metode ini adalah dengan mencacah tegangan keluar gelombang persegi (*square waveform*) beberapa kali. Waktu memotong gelombang keluar terkait dengan satu set sudut penyalan (*switching*) inverter, yang diperoleh dengan perhitungan *off-line* yang tepat. Dengan distribusi yang tepat dari sudut penyalan untuk mengubah saklar inverter on dan off, bentuk gelombang keluar dari inverter dikendalikan dan mencapai tujuan untuk menghilangkan komponen harmonisa order yang lebih rendah.

Berbeda dengan metode *carrier based* PWM, di mana waktu penyalan saklar/*switching time* ditentukan oleh perbandingan langsung dari sinyal referensi dan sinyal pembawa/*carrier*, dalam metode *selective harmonics elimination/SHE* waktu yang tepat dari sudut penyalan dihitung sesuai dengan komponen fundamental yang diinginkan dan komponen harmonisa yang akan dihilangkan. Karena kompleksitas persamaan yang harus dipecahkan untuk menemukan sudut

penyalaan, maka jumlah persamaan yang dipecahkan atau jumlah sudut penyalan sebaiknya tidak terlalu banyak supaya perhitungan tetap menjadi sederhana terutama apabila perhitungan dilakukan secara *online*.

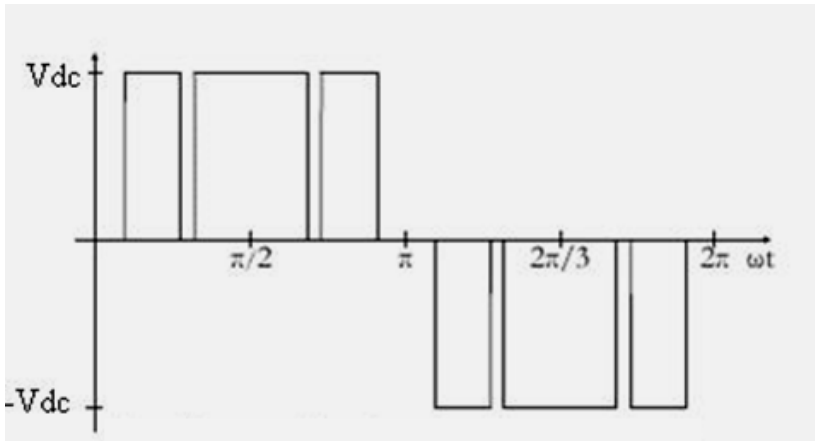
Metode SHE adalah salah satu teknik PWM yang optimal. Secara efektif mengurangi kandungan harmonisa dari gelombang keluaran inverter dan menghasilkan spektrum kualitas tegangan yang lebih tinggi melalui penghapusan harmonisa orde lebih rendah tertentu. Oleh karena itu, telah diterapkan dalam pengendali elektronik daya secara luas dan banyak teknik terkait telah diusulkan dalam beberapa tahun terakhir. Ide dasarnya adalah untuk mengatur strategi penempatan bentuk gelombang PWM melalui pengaturan pada saklar-saklar inverter dengan cara membuat perubahan arah berkali-kali persetengah siklus untuk mengontrol gelombang keluaran inverter dengan tepat.

5.2 Prinsip operasi Metoda SHE

Prinsip operasi SHE dapat dikelompokkan menjadi penghapusan harmonik sepenuhnya (Unipolar SHE) dan penghapusan harmonik sebagian (Bipolar SHE). Penjelasan kedua metode SHE beserta masing-masing kerugian dan keuntungannya dijelaskan pada SubBab berikut.

5.2.1 Penghapusan harmonisa sepenuhnya (Unipolar SHE)

Dalam unipolar SHE-PWM, tegangan keluar dapat bernilai $+V_{dc}$, $-V_{dc}$ atau 0. Gambar 5.1 mengilustrasikan skema switching SHE-PWM unipolar menggunakan tiga sudut switching. Unipolar SHE-PWM menggunakan sudut penyalan / switching yang telah ditentukan untuk menghasilkan tegangan keluaran yang terdiri dari beberapa pulsa dengan berbagai lebar.



Gambar 5.1 Skema switching Unipolar PWM

Model matematis skema PWM terprogram unipolar termasuk aplikasi fase tunggal dan aplikasi tiga fase telah dibahas sebelumnya. Output gelombang SHE-PWM dari aplikasi tiga fase secara matematis diperoleh oleh deret Fourier.

Unipolar SHE-PWM memberikan banyak keuntungan dibandingkan bipolar SHE-PWM. Unipolar SHE-PWM digunakan dengan indeks modulasi rendah. Seperti bipolar SHE-PWM, satu kelemahan SHE-PWM unipolar terletak pada distorsi harmonisnya. Untuk indeks modulasi rendah, SHE-PWM unipolar cenderung menghasilkan tegangan keluaran dengan Total Harmonics Distortion (THD) yang lebih tinggi. Namun, SHE-PWM unipolar cenderung menghasilkan THD yang lebih rendah daripada bipolar SHE-PWM. Ini memberikan pendekatan yang lebih alami ke bentuk gelombang sinusoidal.

SHE-PWM unipolar juga cenderung menghasilkan lebih sedikit EMI daripada bipolar SHE-PWM. Bipolar SHE-PWM menghasilkan perubahan tegangan sama dengan $2 V_{dc}$. Namun, SHE-PWM unipolar menghasilkan perubahan tegangan sama dengan V_{dc} . Selanjutnya, SHE-PWM unipolar meningkatkan frekuensi switching

efektif dengan faktor yang lebih kecil daripada bipolar SHE-PWM.

5.2.2 Penghapusan Harmonik sebagian (Bipolar SHE)

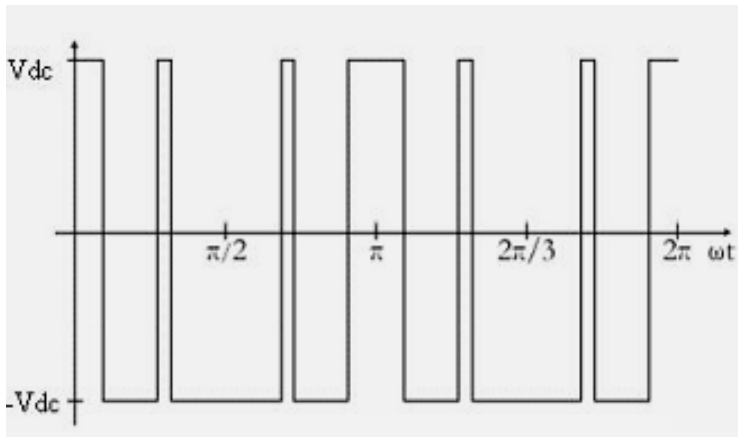
Bipolar SHE-PWM adalah skema switching lain, yang melibatkan eliminasi harmonik. Satu skema switching yang melibatkan eliminasi harmonik yang telah digunakan secara luas selama bertahun-tahun adalah bipolar SHE-PWM. Dalam bipolar SHE-PWM, garis ke tegangan keluar neural adalah $+V_{dc}$ atau $-V_{dc}$.

Model matematis dari skema PWM terprogram bipolar termasuk aplikasi fase tunggal (SLN1: PWM *symmetric quarter quarter*, switching angle spread 0° hingga 90° dan SLN2: sama dengan SLN1 dengan pergeseran fasa, untuk menekan aplikasi harmonik pertama yang signifikan) dan tiga fase (TLN1 : PWM *symmetric quarter wave*, switching angle spread 0° hingga 90° dan TLN2: PWM *symmetric quarter wave*, switching angle spread 0° hingga 60°).

Gambar 5.2 mengilustrasikan skema switching SHE-PWM bipolar menggunakan tiga sudut switching untuk TLN2. Alasan utama untuk memilih jenis SHE-PWM adalah bahwa, TLN1 SHE-PWM menghasilkan kerugian harmonik yang lebih rendah dan karena itu memberikan kontribusi untuk menurunkan pemanasan harmonik dan akibatnya dapat mengurangi penurunan kinerja dari penggerak motor AC.

Keuntungan yang paling penting dari bipolar SHE-PWM adalah bahwa kontrol inverter tidak serumit skema switching lainnya. Salah satu kerugian utama menggunakan bipolar SHE-PWM menyangkut penerapannya ketika indeks modulasi rendah digunakan. Ketika indeks modulasi rendah digunakan, seseorang mungkin tidak dapat menggunakan skema switching fundamental untuk melakukan proses eliminasi harmonik yang diinginkan. Kedua metode ini dirancang berdasarkan pada domain frekuensi, berbeda dengan modulasi bipolar yang didasarkan pada domain

waktu. Jadi, kedua metode ini sangat mengurangi konten harmonik dan sangat direkomendasikan dari daerah modulasi menengah ke tinggi. Inverter tiga level biasanya menggunakan tegangan tinggi dan dibuat menggunakan switch *Gate Turn Off* (GTO) yang memerlukan frekuensi switching rendah. Fakta ini sangat mendukung kebutuhan untuk menggunakan strategi yang efisien dari daerah modulasi menengah ke tinggi.



Gambar 5.2 Skema switching Bipolar PWM

5.2.3 Metodologi solusi untuk penghapusan komponen Harmonisa

Banyak metode yang tersedia saat ini untuk solusi optimal persamaan non-linear didasarkan pada teknik pemrograman matematis. melibatkan pencarian gradien dan pencarian langsung dengan asumsi bahwa, variabel desain kontinu. Tantangan utama yang terkait dengan teknik SHE-PWM adalah untuk mendapatkan solusi analitis untuk sistem resultan persamaan transendental non-linear yang mengandung istilah trigonometri yang pada gilirannya memberikan beberapa set solusi. Beberapa algoritma telah dilaporkan dalam literatur teknis mengenai metode penyelesaian persamaan transendental non-linear yang dihasilkan, yang menggambarkan masalah SHE-PWM. Untuk SHE-PWM,

waktu switching ditentukan dengan menyelesaikan satu set persamaan non-linear. Karena karakteristik non-linear dan *transcendental*, persamaan tersebut hanya dapat diselesaikan secara numerik.

Untuk mendapatkan konvergensi cepat, nilai awal harus dipilih dekat dengan solusi yang tepat. Ini adalah salah satu tugas yang paling sulit yang terkait dengan teknik PWM yang terkait dengan metode SHE. Namun, sulit untuk mendapatkan solusi untuk persamaan *transcendental* secara bersamaan untuk menghilangkan harmonik yang dipilih dalam aplikasi secara nyata. Sangat menarik untuk mengamati bahwa teknik optimasi terapan, yang menemukan solusi untuk nilai indeks modulasi yang lebih tinggi tanpa kegagalan dalam konvergensi.

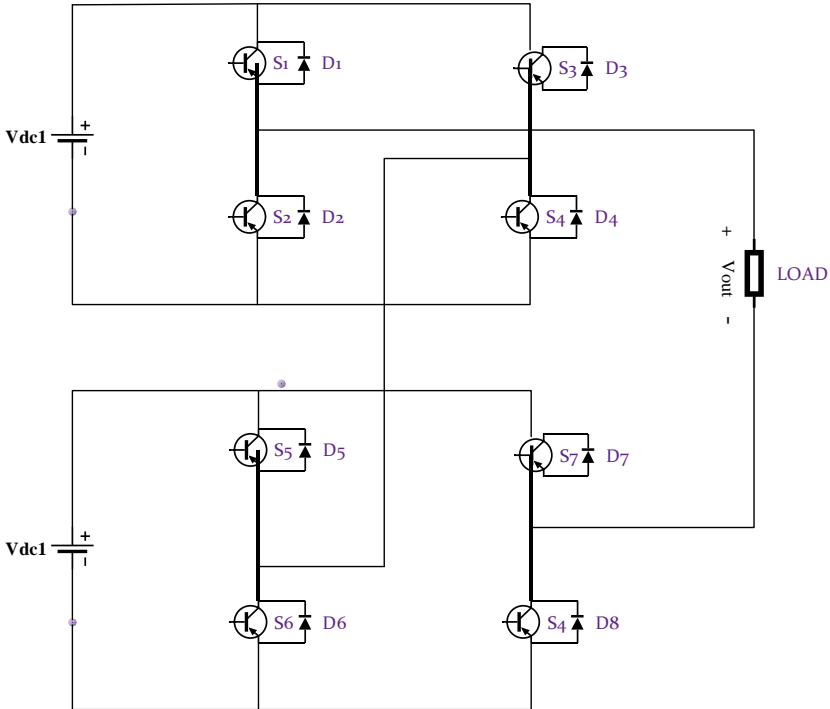
5.2.4 Inverter Multilevel.

Inverter multilevel adalah konverter yang mengubah besaran DC menjadi besaran AC dimana keluaran (output) yang dihasilkan mempunyai beberapa (lebih dari dua) level tegangan. Tegangan output inverter multilevel kualitasnya lebih baik dan inverter multilevel dapat mengurangi kandungan harmonik. Inverter multilevel digunakan pada aplikasi seperti *adjustable-speed* AC motor drives, *uninterruptible power supplies* (UPS), dan menghubungkan sumber *renewableenergy photovoltaics* ke power grid.

Secara umum terdapat tiga tipe inverter multilevel, antara lain: Inverter multilevel tipe *Diode-clamped*, Inverter multilevel tipe *Flying capacitor*, Inverter multilevel tipe *cascaded H-bridge*. Inverter satu fasa jembatan-H disusun oleh 4 buah saklar seperti Gambar 5.3. Jika inverter satu phase jembatan - H disusun dengan inverter lainnya maka akan terbentuk susunan inverter bertingkat yang disebut *cascaded H- bridge*. Pada dasarnya konsep *switching* inverter jembatan-H dapat dikembangkan dengan menambah rangkaian inverter jembatan yang lainnya agar dapat menghasilkan tegangan keluaran yang lebih tinggi. Jumlah level

tegangan dari inverter multilevel tergantung dari banyaknya sel (H) yang digunakan sesuai dengan persamaan (5.1).

$$m = 2H + 1 \dots\dots\dots(5-1)$$



Gambar 5.3 Inverter dengan dua sel dan sumber DC terpisah

Dimana H adalah jumlah inverter jembatan- H pada setiap sel. Tegangan keluaran dari setiap inverter jembatan- H adalah $+V_{dc}$, $-V_{dc}$, dan 0 . Untuk tegangan keluar inverter multilevel adalah kombinasi dari masing-masing tegangan keluar inverter jembatan- H . Jika inverter dua sumber inverter maka akan memiliki lima level output yaitu $+2V_{dc}$, $+V_{dc}$, $-V_{dc}$, $-2V_{dc}$, dan 0 .

Setiap sel inverter jembatan- H dapat yang digunakan untuk menambah ampiltudo tegangan keluaran atau mengontrol harmonik. Setiap inverter

jembatan-H beroperasi pada sudut fase yang berbeda (α), maka penjumlahan gelombang keluaran dari dua inverter dengan sumber terpisah dapat dilihat pada Gambar 5.4. Dengan menambah sumber DC dan menambah inverter jembatan-H, maka total tegangan keluar akan lebih besar, dan dapat menghasilkan gelombang tangga yang lebih tinggi lagi sehingga lebih mendekati bentuk sinusoidal.

Metode SHE PWM merupakan metode persamaan matematika untuk mengeliminasi harmonik orde rendah ke 3, 5, 7, dan 9 dan seterusnya. Metode *Selective Harmonics Elimination* disebut juga metoda dengan *switching* frekuensi fundamental berdasarkan teori harmonik eliminasi. Persamaan yang harus diselesaikan pada metode SHE adalah persamaan simultan seperti terlihat pada persamaan (5.2)

$$\cos \alpha_1 + \cos \alpha_2 + \cos \alpha_3 + \cos \alpha_4 + \cos \alpha_5 + \dots +$$

$$\cos n \alpha_m = m_a$$

$$\cos 3\alpha_1 + \cos 3\alpha_2 + \cos 3\alpha_3 + \cos 3\alpha_4 + \cos 3\alpha_5 + \dots +$$

$$\cos n \alpha_m = 0$$

$$\cos 5\alpha_1 + \cos 5\alpha_2 + \cos 5\alpha_3 + \cos 5\alpha_4 + \cos 5\alpha_5$$

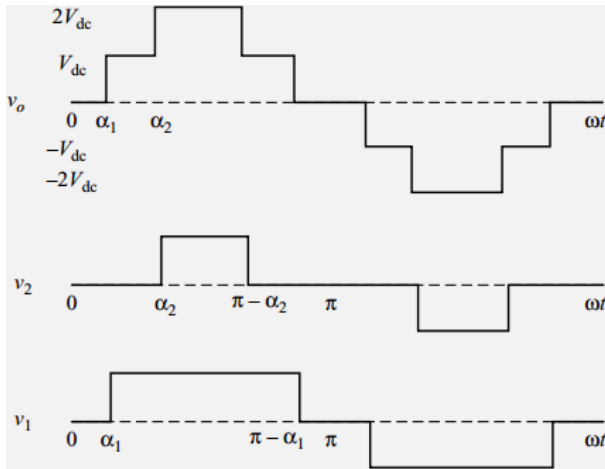
$$+ \dots + \cos n \alpha_m = 0 \dots (5.2)$$

.

.

$$\cos n \alpha_1 + \cos n \alpha_2 + \cos n \alpha_3 + \cos n \alpha_4 + \cos n \alpha_5$$

$$+ \dots + \cos n \alpha_m = 0$$



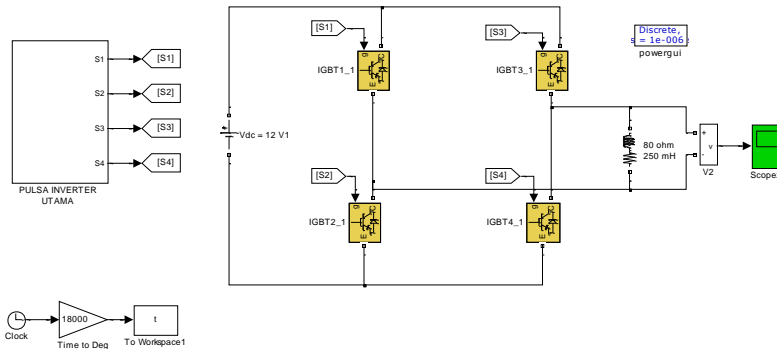
Gambar 5.4. Tegangan keluar dari masing-masing inverter jembatan-H dengan 2 sumber terpisah

Persamaan (5.2) adalah persamaan umum metode SHE. Dengan menggunakan persamaan (5.2) dapat dieliminasi harmonisa ke- n pada tegangan keluaran inverter. Untuk mendapatkan nilai α_1 α_2 α_3 ... sampai α_m maka persamaan (5,2) harus dioptimasi dan diselesaikan secara bersamaan (simultan) dengan menggunakan teknik iterasi seperti Newton Raphson, Gaus Siedel atau yang lain.

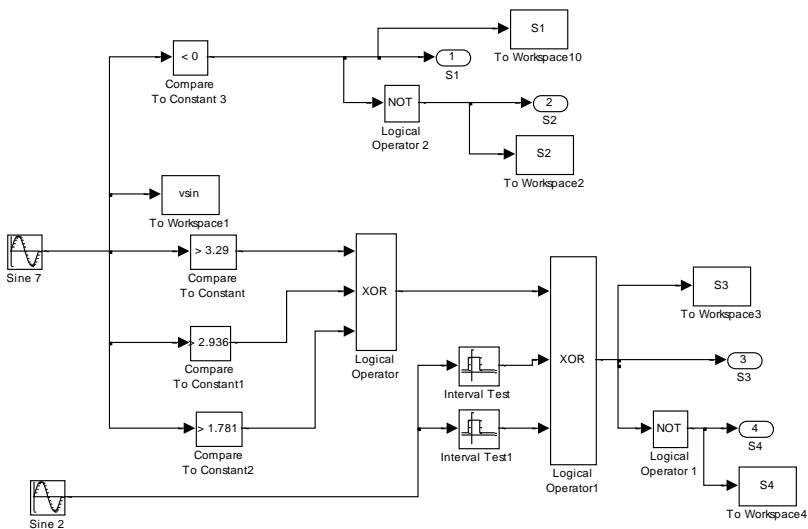
5.3 Simulasi metode SHE

Untuk menverifikasi konsep yang telah dijelaskan pada Sub-bab 5.1 - 5.2 maka dilakukan simulasi menggunakan program komputer MATLAB/ *Simulink*. Saklar elektronika daya dimodelkan menggunakan *SimPower Blokset*. rangkaian pengendali (*drive electronics*) pembangkit sinyal saklar-saklar inverter dimodelkan menggunakan *Simulink*. Gambar 5.5 memperlihatkan model inverter jembatan-H sedangkan *Simulink* blok untuk pembangkit pulsa untuk mengeliminasi harmonisa ke-3 dan ke-5 diperlihatkan pada Gambar 5.6. Inverter jembatan-H menggunakan

catu daya DC sebesar 12 Volt. Sudut penyalan saklar-saklar inverter untuk menghasilkan tegangan keluaran dengan harmonisa yang tereliminasi di proses menggunakan persamaan (5-2) dan dikerjakan dengan menggunakan metoda iterasi **Newton Raphson**.



Gambar 5.5. Model inverter Jembatan-H menggunakan Simpower Blockset dan Simulink



Gambar 5.6. Model Simulink pembangkit pulsa inverter Jembatan-H bertingkat

5.3.1 Hasil Simulasi metode SHE dengan teknik penghapusan sepenuhnya

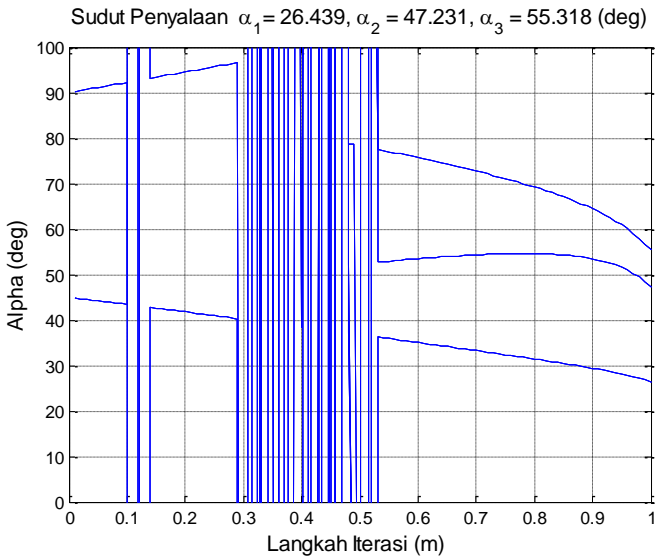
Simulasi metode SHE diawali dengan mencari nilai sudut penyalaaan α_1 , α_2 , dan α_3 , dengan menggunakan metode iterasi Newton Raphson. Untuk menghilangkan komponen harmonisa ke-3 dan ke-5 persamaan (5-1) disesuaikan menjadi:

$$\cos \alpha_1 + \cos \alpha_2 + \cos \alpha_3 = \pi m_i$$

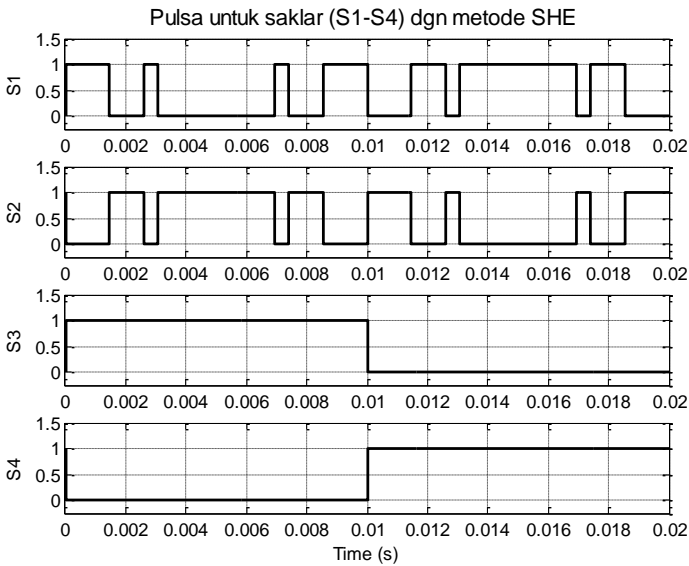
$$\cos 3\alpha_1 + \cos 3\alpha_2 + \cos 3\alpha_3 = 0 \dots\dots\dots(5-4)$$

$$\cos 5\alpha_1 + \cos 5\alpha_2 + \cos 5\alpha_3 = 0$$

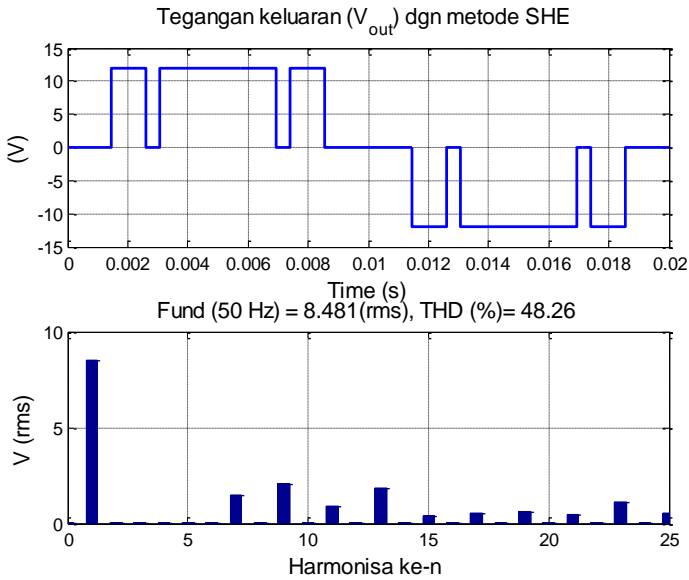
Hasil iterasi diperlihatkan pada Gambar 5.7 dan nilai sudut yang didapat dari hasil iterasi adalah $\alpha_1=26.439^\circ$, $\alpha_2=47.239^\circ$, $\alpha_3=55.318^\circ$, dimana α_1 , α_2 , dan α_3 adalah sudut penyalaaan inverter yang yang mengacu pada Gambar 5.5 . Dengan menggunakan nilai sudut penyalaaan yang didapat kemudian pulsa PWM untuk saklar-saklar inverter. Dengan menggunakan referensi penomoran saklar pada Gambar 5.5 didapat bentuk pulsa seperti diperlihatkan pada Gambar 5.8. Seperti terlihat pada Gambar 5.8 bahwa saklar S_2 dan S_3 selalu berlawanan dengan saklar S_1 dan S_4 , saklar S_1 (dan juga S_2) beroperasi lebih cepat dari saklar S_3 dan S_4 dimana terjadi 7 kali komutasi per periode pada Saklar S_1 dan S_2 , sedangkan pada saklar S_3 dan S_4 beroperasi dengan metode konduksi 180° dimana hanya terjadi satu kali komutasi per perioda. Komutasi adalah perubahan kondisi saklar dari ON menjadi OFF atau sebaliknya. Selanjutnya tegangan keluaran inverter diperlihatkan pada Gambar 5.9. dimana terlihat pada Gambar 5.9 bahwa bentuk gelombang tegangan keluaran mengandung pencacahan tegangan DC yang dibentuk oleh sudut penyalaaan α_1 , α_2 , dan α_3 . Dengan pencacahan yang tepat maka tegangan keluaran tidak lagi mengandung komponen harmonisa ke-3 dan ke-5 seperti terlihat pada spectrum harmonisa pada bagian bawah Gambar 5.9.



Gambar 5. 7. Hasil iterasi sudut penyalan dengan metode Newton Raphson



Gambar 5.8 Bentuk pulsa PWM dari Saklar S1-S4 menggunakan metode SHE



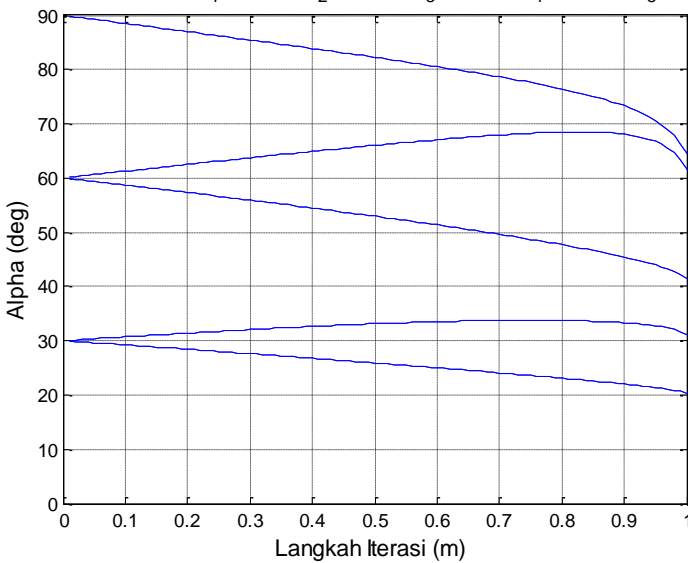
Gambar 5.9 Tegangan keluar inverter dengan metode SHE dan spektrum harmonisa

Metode SHE seperti yang sudah dijelaskan diatas dapat dikembangkan untuk menghilangkan lebih banyak komponen harmonisa pada tegangan keluarannya. Untuk menghilangkan komponen harmonisa sampai dengan harmonisa ke-9 persamaan 5.1 dioptimasi menggunakan metoda Newton Raphson. Hasil iterasi ditunjukkan pada Gambar 5.10 dengan sudut optimal adalah sebesar $\alpha_1=20.35^\circ$, $\alpha_2=31.13^\circ$, $\alpha_3=41.51^\circ$, $\alpha_4=61.52^\circ$, $\alpha_5=64.42^\circ$. Dengan menggunakan sudut tersebut maka bentuk pulsa PWM dibentuk seperti terlihat pada Gambar 5.11 untuk saklar S_1 sampai S_4 . dan tegangan keluaran diperlihatkan pada Gambar 5.12. Pulsa PWM khususnya untuk saklar S_1 (dan juga S_2) beroperasi dengan 11 kali komutasi per periode sedangkan saklar S_3 dan S_4 masih tetap beroperasi dengan metode konduksi 180° (satu komutasi per-periode). Tegangan keluaran pada Gambar 5.12 tercacah lebih banyak dibandingkan dengan Gambar 5.9 dan sebagai akibatnya komponen harmonisa yang tereliminasi juga lebih banyak yakni harmonisa ke-3, 5,

7, dan 9 tidak muncul pada spectrum harmonisa Gambar 5.12..

Lebih lanjut, untuk menghilangkan komponen harmonisa yang lebih banyak sudut penyalaan dioptimasi dengan cara yang sama yakni menggunakan metode iterasi Newton Raphson dan hasilnya seperti terlihat pada Gambar. 5.13. dengan menggunakan sudut penyalaan sebesar $\alpha_1= 16.56^\circ$, $\alpha_2=23.16^\circ$, $\alpha_3=33, 48^\circ$, $\alpha_4=46.1^\circ$, $\alpha_5=51.13^\circ$. $\alpha_6=68.53^\circ$, $\alpha_7=69.88^\circ$, didapat pulsa PWM seperti Gambar 5.14 dan tegangan keluaran seperti terlihat pada Gambar 5.14 Jelas terlihat pada Gambar 5.14 bahwa komponen harmonisa ke-3 sampai ke-13 sepenuhnya tereliminasi dan tegangan keluaran hanya mengandung harmonisa ganjil mulai komponen ke-15 dan seterusnya.

Newton Raphson $\alpha_1= 20.35, \alpha_2= 31.13, \alpha_3= 41.51, \alpha_4= 61.52, \alpha_5= 64.42$



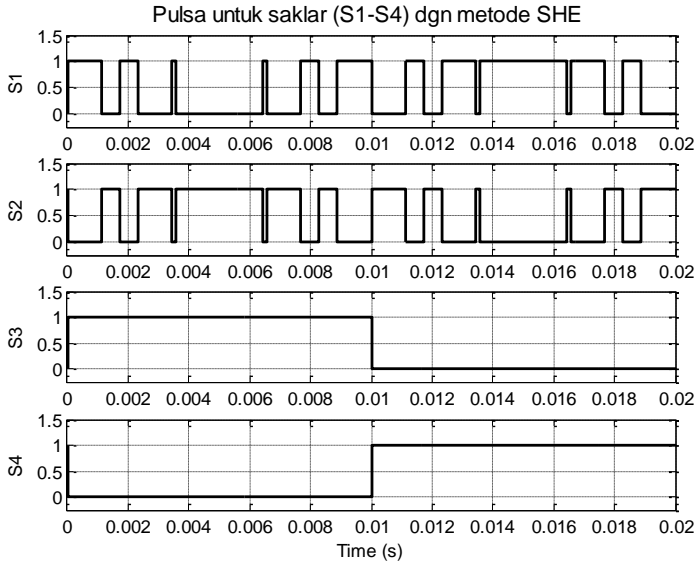
Gambar 5. 10 Hasil iterasi metode Newton Rapshon pada inverter jembatan-H untuk eliminasi harmonisa ke-3 sampai ke-9

5.3.2 Analisa Hasil Simulasi

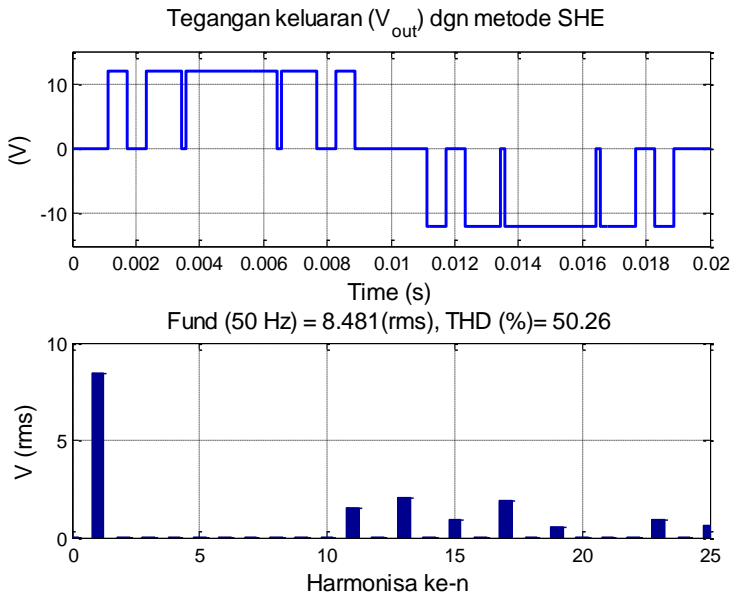
Resume hasil tegangan keluaran yang dihasilkan oleh inverter jembatan-H satu sel dengan metode SHE dirangkum pada Table 5.1. Dari Table 5.1 terlihat bahwa dengan jumlah harmonisa rendah yang tereliminasi semakin banyak, nilai THD tidak menjadi semakin kecil malahan yang terjadi sebaliknya, dimana dalam hal ini THD menjadi semakin besar. Hal ini terjadi karena metode SHE sesungguhnya tidak menghilangkan harmonisa tetapi hanya memindahkan harmonisa ke frekwensi yang lain atau dengan kata lain jika harmonisa orde tertentu ditekan maka bisa saja akan menimbulkan peningkatan harmonisa pada frekwensi yang lain. Namun demikian tegangan keluaran yang tidak mengandung harmonisa orde rendah memudahkan dalam menentukan filter yang digunakan, dimana semakin jauh frekwensi harmonisa dari frekwensi fundamental maka semakin besar tegangan cut off dari filter low pass yang digunakan sehingga losses akibat penggunaan filter akan semakin kecil.

Table 5.1 Resume hasil metode SHE pada tegangan keluaran inverter jembatan-H 1 sel

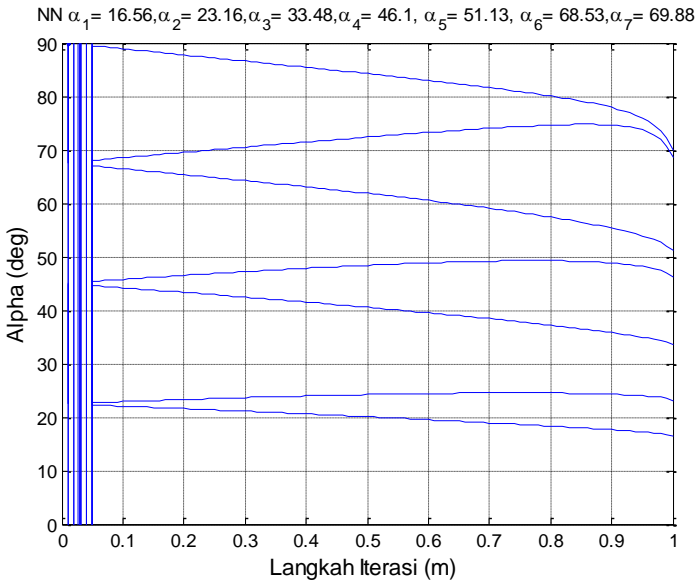
No	α_1	α_2	α_3	α_4	α_5	α_6	α_7	Fun d (Rms)	TH D (%)
1	26. 44	47. 23	55. 32					8.4 8	48. 26
2	20. 35	31. 13	41. 51	61. 52	64. 42			8.4 8	50. 26
3	16. 56	23. 16	33. 48	46. 1	51. 13	68. 53	69. 88	8.5 3	51. 7



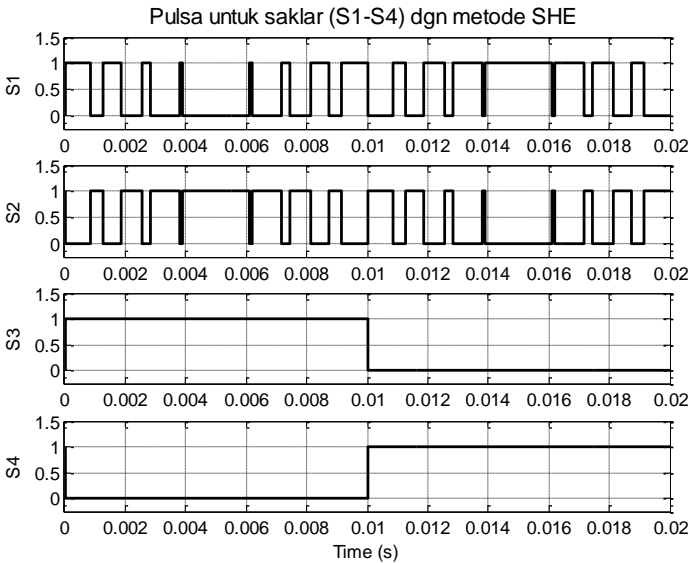
Gambar 5. 11 Pulsa PWM dari Saklar S1-S4 menggunakan metode SHE untuk eliminasi harmonisa ke-3 sampai ke-9



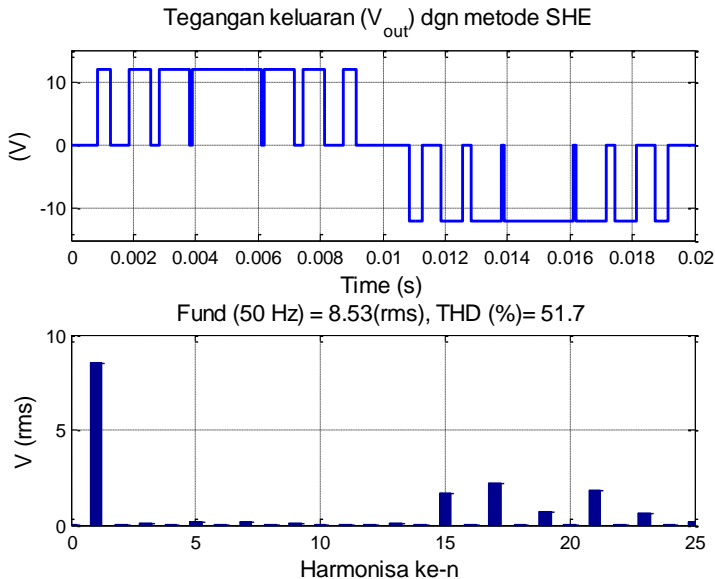
Gambar 5. 12. Tegangan keluaran inverter jembatan-H menggunakan metode SHE dan spektrum harmonisanya



Gambar 5. 13 Hasil iterasi metode Newton Rapshon pada inverter jembatan-H untuk eliminasi harmonisa ke-3 sampai ke-11



Gambar 5. 14 Pulsa PWM dari Saklar S1-S4 menggunakan metode SHE untuk eliminasi harmonisa ke-3 sampai ke-11

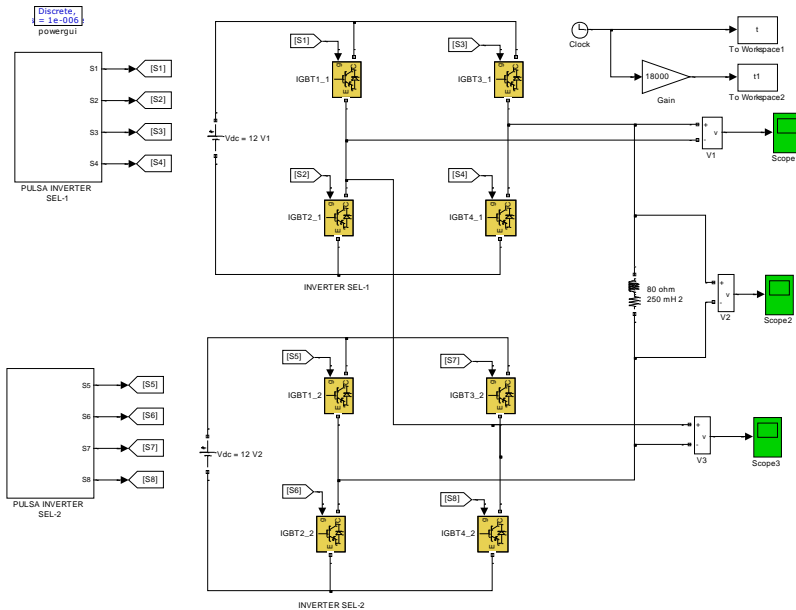


Gambar 5. 15. Tegangan keluaran inverter jembatan-H menggunakan metode SHE dan spektrum harmonisanya

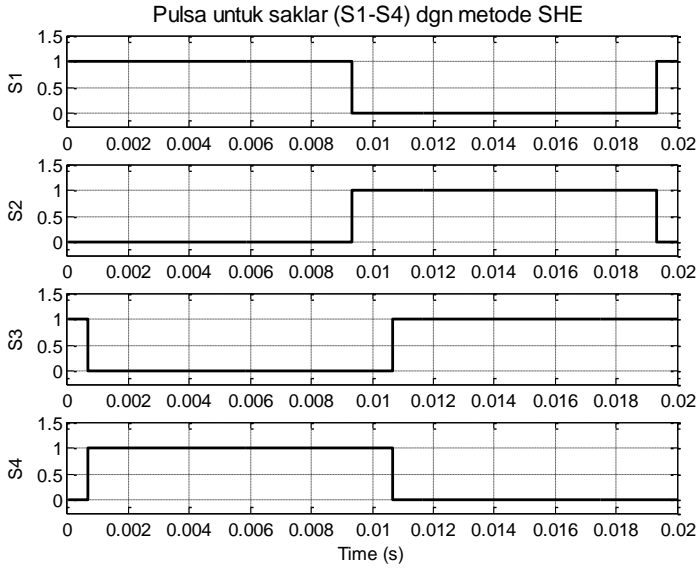
5.4 Penerapan metoda SHE pada inverter jembatan – H bertingkat

Inverter jembatan-H dapat disusun bertingkat untuk menghasilkan keluaran dengan magnitudo yang lebih besar dengan jumlah level tegangan yang lebih banyak. Seperti yang ditunjukkan pada Gambar 5.3 yang memperlihatkan inverter jembatan bertingkat yang dibentuk oleh dua sel inverter jembatan-H yang dapat menghasilkan tegangan keluaran lima tingkat. Gambar 5.16 memperlihatkan model Simulink inverter jembatan-H bertingkat yang terdiri dari dua sel inverter jembatan-H berikut pembangkit pulsanya. Inverter jembatan bertingkat juga dapat beroperasi untuk menghasilkan tegangan yang mengandung komponen harmonisa tertentu saja. Pada kasus ini saklar inverter dikontrol dengan sudut penyalaan $\alpha_1 = 12^\circ$, $\alpha_2 = 47.5^\circ$. Sudut penyalaan ditentukan dengan menggunakan metode

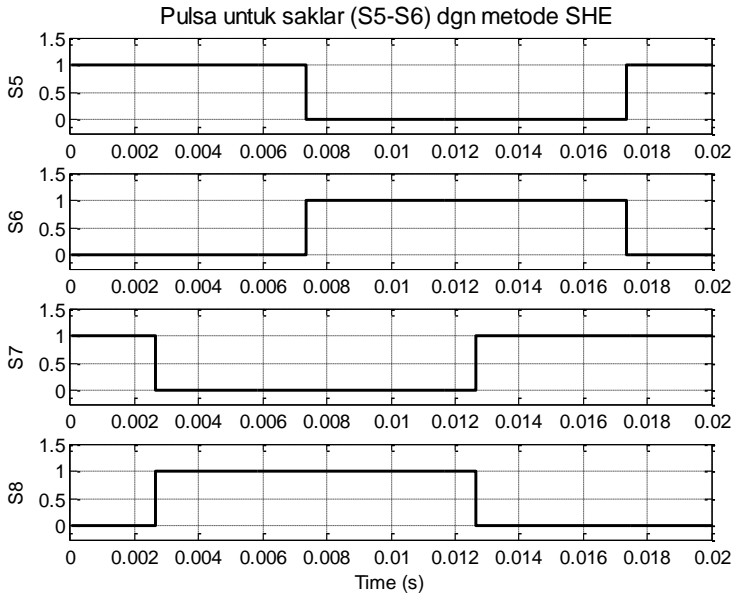
coba-coba (*trial and error*). Pulsa PWM untuk saklar S_1 - S_4 diperlihatkan pada Gambar 5.17 dan pulsa PWM untuk saklar S_4 - S_8 diperlihatkan pada Gambar 5.18. Hasil tegangan keluaran inverter diperlihatkan pada Gambar 5.19 dimana terlihat pada spektrum tegangan Gambar 5.19 bahwa harmonisa ke-3 dan ke-5 berhasil dieliminasi, harmonisa rendah muncul mulai dari harmonisa ke-7 dan seterusnya.



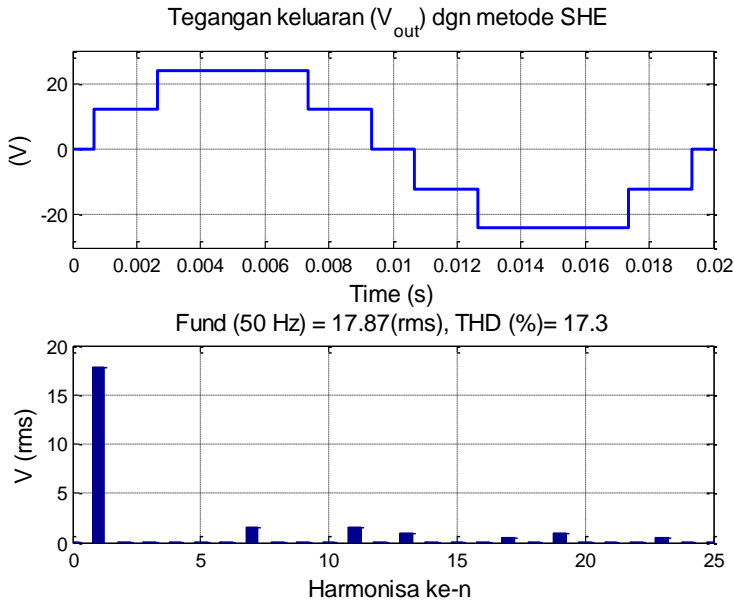
Gambar 5.16. Model Simulink inverter jembatan-H bertingkat dengan 2 sel inverter jembatan-H



Gambar 5. 17 Pulsa PWM dari Saklar S_1 - S_4 inverter jembatan-H bertingkat dengan metode SHE



Gambar 5. 18 Pulsa PWM dari Saklar S_5 - S_8 inverter jembatan-H bertingkat dengan metode SHE

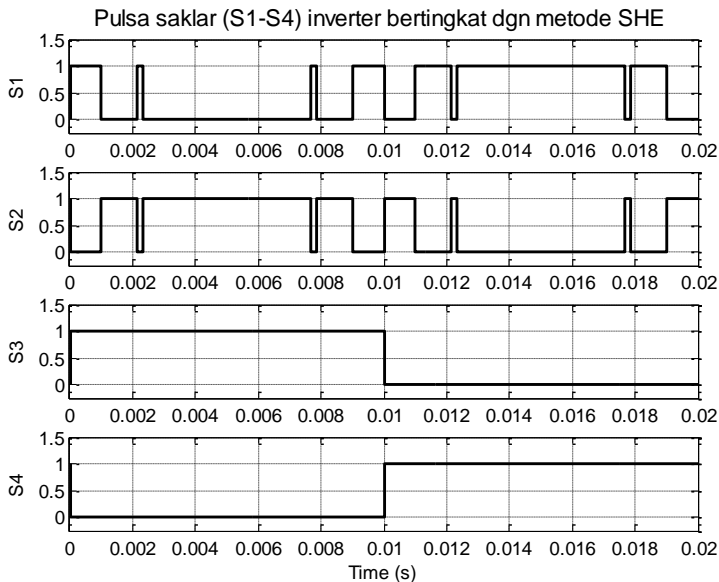


Gambar 5. 19. Tegangan keluaran inverter jembatan 5 tingkat dan spektrum harmonisanya

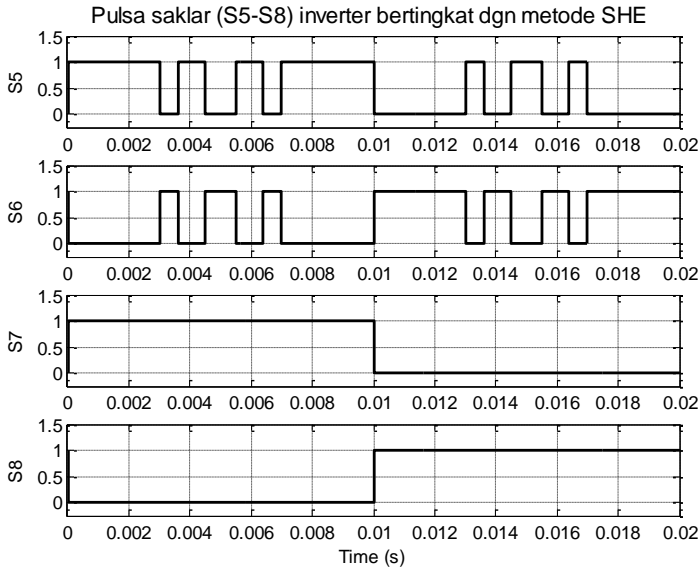
Untuk dapat menghilangkan lebih banyak komponen harmonisa pada tegangan keluaran inverter jembatan 5 tingkat maka masing-masing inverter dapat dikontrol dengan menggunakan metode yang seperti dijelaskan pada Sub-bab 5.2. Namun demikian untuk dapat menghilangkan harmonisa ke-3 dsampai harmonisa ke-9 maka saklar-saklar pada inverter-1 dan inverter-2 harus dikendalikan dengan sudut penyalan yang tepat. Dalam hal ini inverter-1 dikontrol dengan sudut penyalan $\alpha_1=18.22^\circ$, $\alpha_2=38.68^\circ$, $\alpha_3=41.98^\circ$, sedangkan saklar-saklar pada inverter-2 dikontrol dengan sudut penyalan $\alpha_4=54.34^\circ$, $\alpha_5=65.5^\circ$, $\alpha_6=80.91^\circ$. Bentuk pulsa PWM untuk inverter-1 dan inverter-2 diperlihatkan pada Gambar 5.21 dan 5.22. dan tegangan keluar inverter diperlihatkan pada Gambar 5.23 sedangkan tegangan keluaran individual masing-masing sel-1 dan sel-2 diperlihatkan pada Gambar 5.24 dan 5.25. Terlihat pada Gambar 5.23 bahwa spektrum harmonisa mengandung harmonisa ke-3 sampai ke-9 yang relative

sangat kecil. Tegangan individu inverter (sel-1) dan inverter sel-2 menunjukkan komponen fundamental tegangan keluaran merupakan hasil penjumlahan tegangan keluaran dari kedua sel inverter. Sebaliknya kandungan harmonisa tegangan keluar inverter 2 sel merupakan selisih dari harmonisa dari masing-masing inverter. Hal ini berarti sudut penyalaan saklar-saklar pada inverter sel-1 saling terkait dengan sudut penyalaan saklar-saklar inverter sel-2.

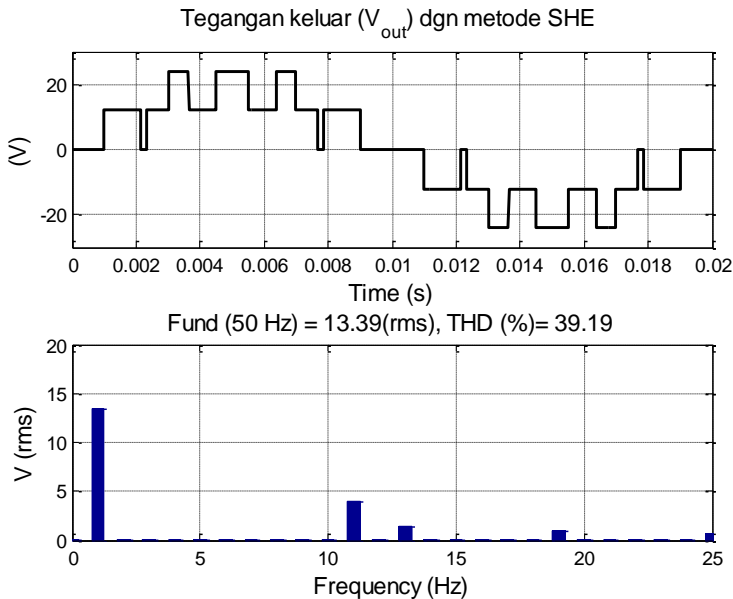
Membandingkan hasil tegangan keluaran Gambar 5.16 dan 5.23 terlihat bahwa meskipun lebih banyak komponen harmonisa yang mampu dieliminasi pada Gambar 5.23 tetapi nilai komponen fundamental tegangan keluaran menjadi menurun drastis (17.64 V berbanding 13.39 V) dan THD menjadi semakin besar lebih dari dua kali lipat (17.74 % berbanding 39.19%). Hal ini menunjukkan bahwa penerapan metode THD pada inverter jembatan bertingkat berdampak besar terhadap kualitas tegangan keluaran inverter.



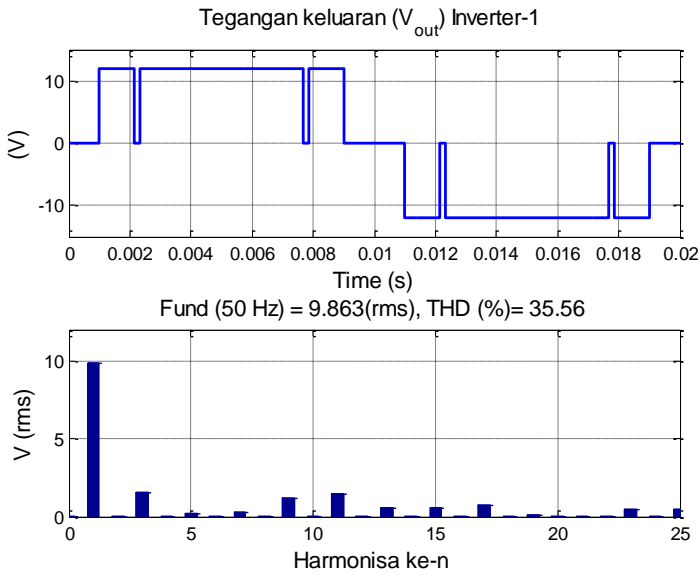
Gambar 5. 20 Pulsa PWM dari Saklar S1-S4 inverter-1 untuk eliminasi harmonisa ke-3 sampai ke-9



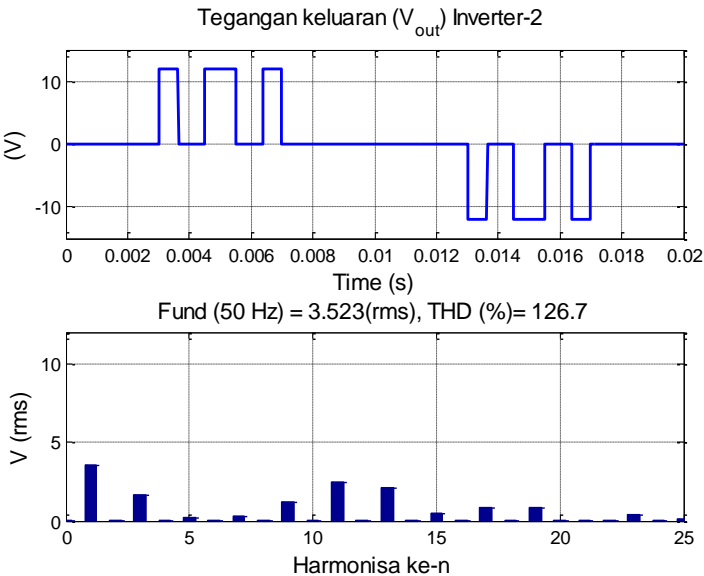
Gambar 5. 21. Bentuk pulsa PWM dari Saklar S5-S8 inverter-2 untuk eliminasi harmonisa ke-3 sampai ke-9



Gambar 5. 22. Bentuk tegangan keluaran inverter 5-tingkat dengan metode SHE dan spektrum harmonisnya



Gambar 5. 23. Bentuk tegangan keluaran sel-1 inverter 5-tingkat dengan metode SHE dan spektrum harmonisnya



Gambar 5. 24. Bentuk tegangan keluaran sel-2 inverter 5-tingkat dengan metode SHE dan spektrum harmonisnya

5.5 Penutup

Bab in metode *Selective Harmonics Elimination* (SHE) pada inverter jembatan-H baik untuk inverter jembatan-H tunggal (satu sel) maupun untuk inverter jembatan-H bertingkat (*Cascaded H-Bridge*). Untuk inverter jembatan-H, sudut penyalaan inverter ditentukan dengan metode iterasi Newton Raphson sedangkan untuk inverter bertingkat digunakan metode trial and error. Buku ini juga membahas simulasi metode SHE menggunakan program MATLAB/Simulink dimana ditunjukkan dengan mendetail bentuk pulsa untuk masing-masing tegangan keluaran dari inverter jembatan tunggal maupun inverter bertingkat. Hasil simulasi dan pembahasan memperlihatkan bahwa metode SHE sangat berguna untuk mengeliminasi komponen harmonisa rendah tertentu tetapi tidak bisa memperbaiki kualitas tegangan keluaran (tidak dapat memperbaiki THD dari tegangan keluaran). Pada inverter bertingkat, teknik ini sangat berpengaruh terhadap kandungan fundamental dari tegangan keluaran dan akibatnya juga mempengaruhi THD. Dengan semakin banyaknya cacahan dari tegangan keluaran maka rugi switching juga menjadi lebih tinggi sehingga dapat mengurangi komponen fundamental tegangan keluaran inverter. Salah satu keuntungan dari metode ini adalah mempermudah dalam desain filter dimana filter tidak perlu dirancang untuk menyaring komponen harmonisa dengan frekwensi yang terlalu dekat frekwensi komponen fundamentalnya.

Pustaka

Armi, F., Manai, L., Besbes, M., 2016, Newton Raphson algorithm for Selective Harmonic Elimination in Asymmetrical CHB Multilevel Inverter using FPGA, Procs. Of Engineering and Technology (PET), pp. 887 - 894

BAB VI

METODE PWM INVERTER JEMBATAN BERTINGKAT DENGAN DC-LINK TIDAK SAMA (UN-EQUAL DC-Link)

6.1 Pendahuluan

Teknik Modulasi selanjutnya yang dibahas pada buku ini adalah teknik modulasi untuk inverter jembatan bertingkat dengan DC-link tidak sama (*Unequal DC-link*) yakni teknik modulasi yang beroperasi dengan cara dimana sel inverter dapat dioperasikan dengan rasio tegangan DC-link yang sama atau berbeda. Untuk mendapatkan tegangan keluaran yang diharapkan berupa tegangan berbentuk tangga (*staircase waveform*), kecepatan switching dari masing-masing saklar pada inverter bisa saja menjadi tidak sama.

Inverter bertingkat yang dibahas menggunakan tiga sel inverter jembatan-H. Masing-masing sel bisa menerapkan tegangan DC-link dengan rasio 1 : 1: 1 atau 1 : 2 : 4. Tegangan keluaran inverter masing-masing berupa gelombang tangga dengan 7 level atau 15 level. Dengan jumlah level yang lebih banyak, tegangan keluar mengandung komponen fundamental dan harmonisa orde rendah yang sangat kecil. Tegangan keluaran dengan jumlah level yang lebih banyak memperbaiki kualitas tegangan inverter. Pada tegangan keluar inverter

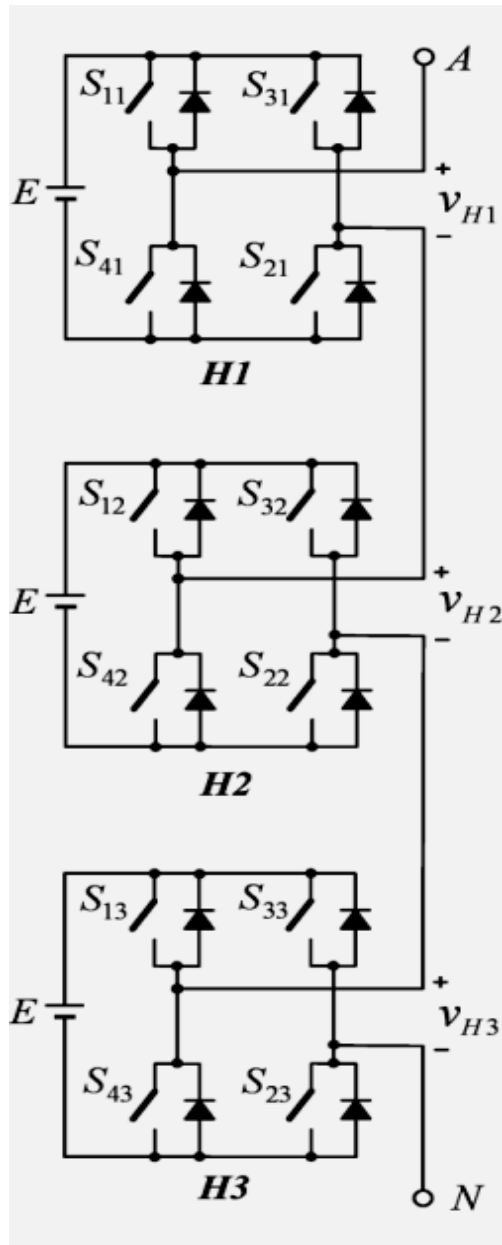
dengan 15 level, kualitas tegangan sudah sangat baik dimana THD mencapai 5 % .

Namun demikian, salah satu kekurangan metode ini adalah setiap saklar pada sel inverter dapat beroperasi pada kecepatan yang berbeda mengakibatkan ketidakseimbangan jumlah switching komutasi sehingga salah satu inverter mungkin akan rusak lebih cepat. Disamping itu perbedaan tegangan DC-link dapat menyebabkan realisasi menjadi lebih rumit karena rangkaian driver untuk masing-masing saklar dicatu dengan tegangan yang berbeda sehingga arus yang mengalir pada rangkaian driver juga berbeda.

6.2 Prinsip Operasi

6.2.1 Struktur multilevel inverter

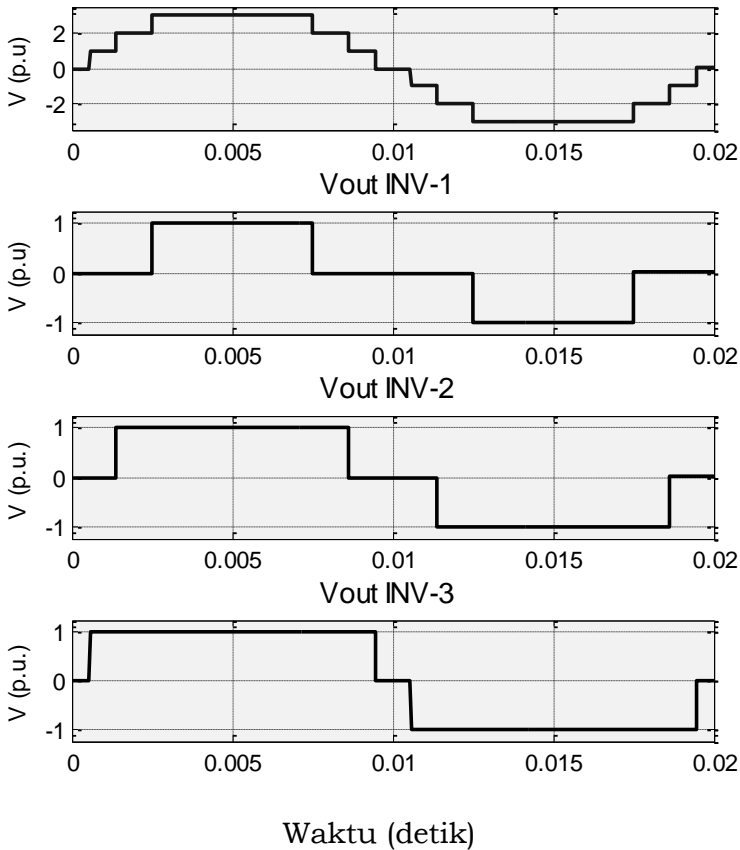
Struktur inverter multilevel yang digunakan diperlihatkan pada Gambar 6.1. Inverter menggunakan tiga sel inverter jembatan-H dengan tegangan DC-link terpisah yang sama atau tidak sama. Seperti terlihat pada Gambar 6.1 pada setiap saklar selalu dipasang sebuah diode secara anti parallel sebagai jalan arus terutama ketika terjadi keterlambatan arus terhadap tegangan inverter. Arus terlambat terhadap tegangan bila beban bersifat induktif. Dengan menggunakan perbandingan tegangan DC-link didapat tegangan keluaran dengan jumlah level yang lebih banyak dari yang bisa dibangkitkan oleh inverter bertingkat konvensional dengan tegangan DC-link yang sama. Atau dengan kata lain, dibutuhkan jumlah saklar yang jauh lebih banyak jika menggunakan inverter jembatan-H konvensional untuk mendapatkan jumlah level yang sama. Hubungan antara jumlah level tegangan yang dihasilkan dengan jumlah sel inverter yang dibutuhkan pada inverter jembatan-H konvensional telah dibahas pada Bab sebelumnya dalam buku ini.



Gambar 6.1. Inverter bertingkat 3 sel jembatan-H dengan sumber DC terpisah

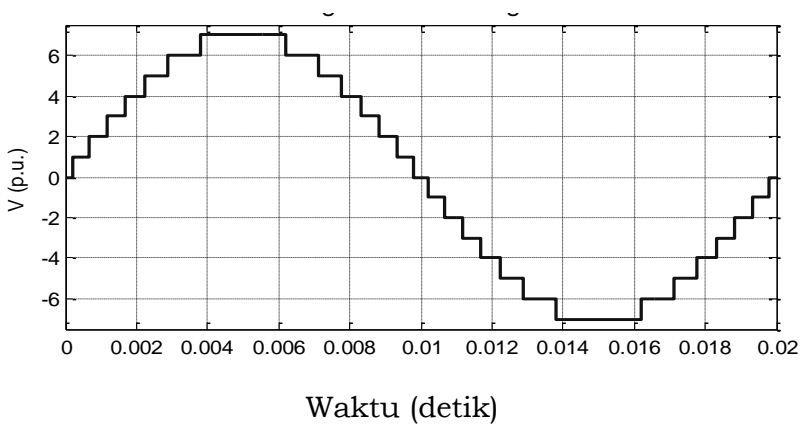
6.2.2 Teknik Modulasi Inverter tiga sel rasio 1 : 2: 4

Teknik modulasi yang paling sederhana untuk inverter jembatan bertingkat adalah metode konduksi 180° di mana setiap saklar dioperasikan untuk aktif (ON) pada setengah siklus positif dan tidak aktif (OFF) dalam setengah siklus berikutnya. Metode konduksi 180° untuk inverter jembatan bertingkat dengan 2 sel inverter sudah dibahas pada Bab 2. Pada inverter bertingkat dengan 3 sel inverter jembatan-H, pulsa untuk masing-masing saklar diperoleh dengan prinsip yang hampir sama yakni dengan menggeser sudut fase penyalaan dari lengan inverter "a" dan lengan inverter "b" pada setiap sel inverter untuk menghasilkan bentuk tegangan keluar yang berbeda pada setiap sel seperti yang ditunjukkan pada baris 2 hingga 4 Gambar 6.2. Bentuk gelombang tegangan keluar dari inverter ditunjukkan pada baris pertama Gambar 6.2. Ini terdiri dari 7 tingkat tegangan DC yaitu $\{-1, -2, -3, 0, +3, +2, +1\} V_{dc}$ karena setiap sel inverter menggunakan tegangan DC terpisah seragam sebesar 1 p.u atau dengan rasio sama dengan 1: 1: 1.



Gambar 6.2. Tegangan keluar setiap masing sel invrter dan tegangan keluar total (atas) pada rasio tegangan DC-link 1: 1: 1.

Jumlah level pada tegangan keluar inverter bertingkat dapat ditingkatkan dengan memberikan rasio tegangan DC-link inverter dari 1: 1: 1 menjadi 1: 2: 4. Pada rasio tegangan DC-link 1: 2: 4, setiap sel inverter dapat menghasilkan tiga tingkat tegangan yaitu $\{+1, 0, -1\} V_{dc}$, $\{+2, 0, -2\} V_{dc}$, $\{+4, 0, -4\} V_{dc}$. Dari kombinasi tegangan yang tersedia dapat dihasilkan tegangan keluar pada inverter sebanyak 15 tingkat yakni $\{\pm 7, \pm 6, \pm 5, \pm 4, \pm 3, \pm 2, \pm 1, 0\} V_{dc}$ sebagai kombinasi tegangan yang dihasilkan oleh tiga sel sebagai ditunjukkan pada Gambar 6.3.

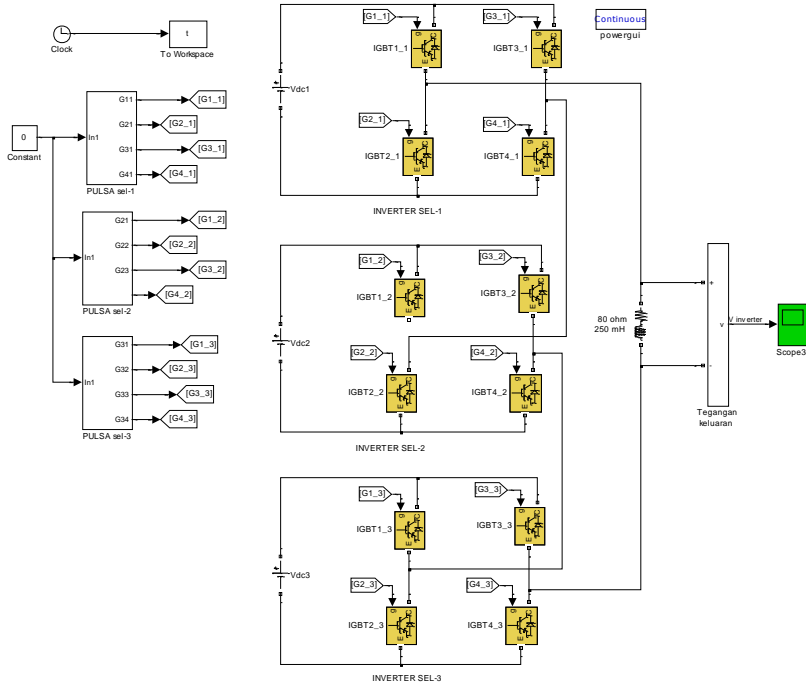


Gambar 6.3. Tegangan keluar inverter menggunakan rasio tegangan DC-link 1: 2: 4

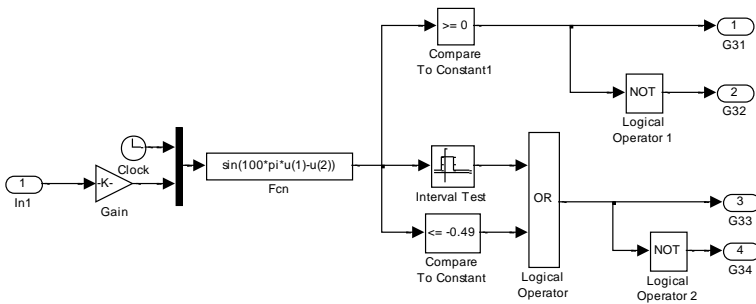
6.3 Simulasi Matlab / Simulink

6.3.1 Rangkaian Simulasi

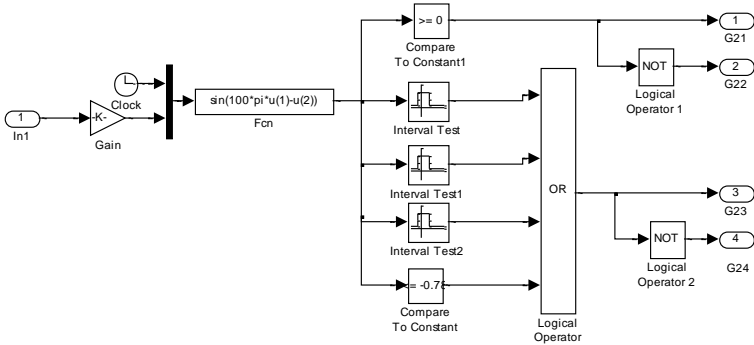
Gambar 6.4. menunjukkan rangkaian simulasi inverter jembatan bertingkat 3 sel menggunakan software MATLAB / Simulink. Inverter dimodelkan dengan *SimPower BlockSet* dan pulsa PWM untuk setiap saklar dibangkitkan dengan Simulink. Inverter menggunakan tegangan DC-link 12 V untuk perbandingan 1:1:1 dan menggunakan tegangan DC-link 6 V : 12 V : 24 V untuk perbandingan 1 : 2 : 4. Simulink blok pembangkitan pulsa untuk masing-masing inverter sel-1, sel-2 dan sel-3 diperlihatkan pada Gambar 6.5, Gambar 6.6 dan Gambar 6.7. seperti terlihat pada Gambar 6.5 – Gambar 6.7, Simulink blok berisi perbandingan sinyal sinusoidal dengan blok *Compare To Constant* bernilai 0 atau dengan blok *Interval Test* dengan nilai konstanta dengan batas-batas tertentu. Semakin banyak blok yang dipergunakan, semakin rumit pulsa yang dibangkitkan.



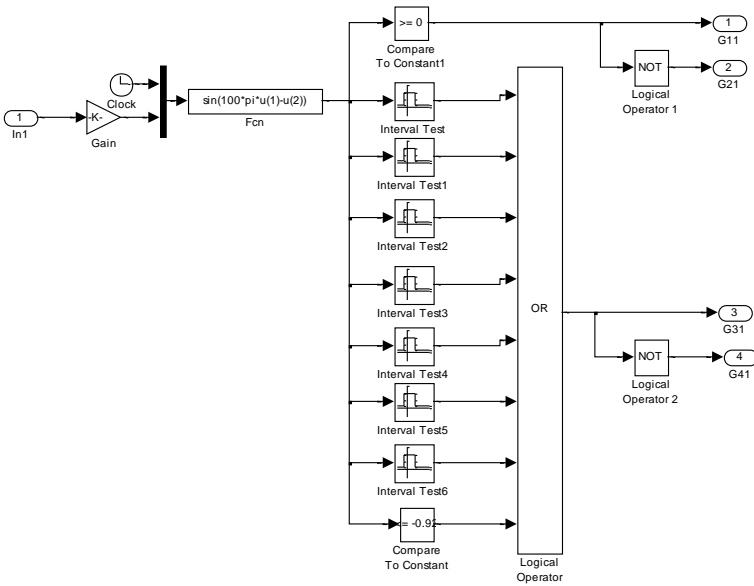
Gambar 6.4. Simulink model inverter bertingkat tiga sel dan pembangkit pulsa PWM



Gambar 6.5 Simulink blok pembangkitan inverter sel ke-3 (tegangan DC-link 24 Volt)



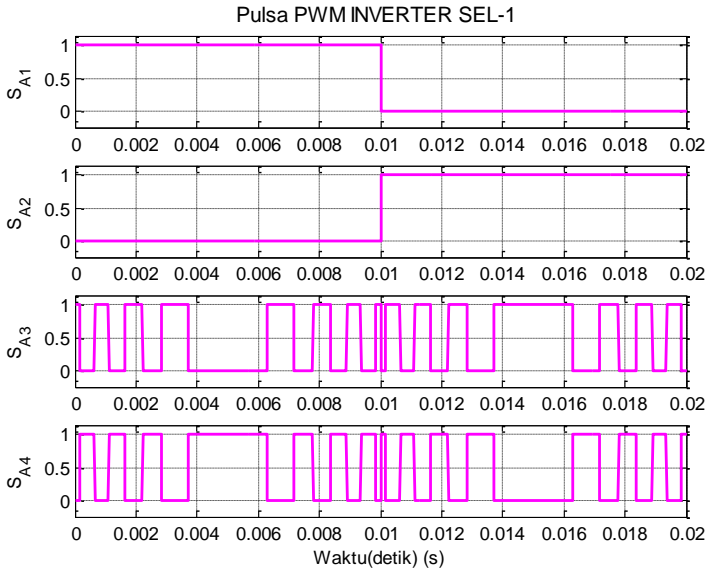
Gambar 6.6 Simulink blok pembangkitan inverter sel ke-2 (tegangan DC-link sebesar 12 V)



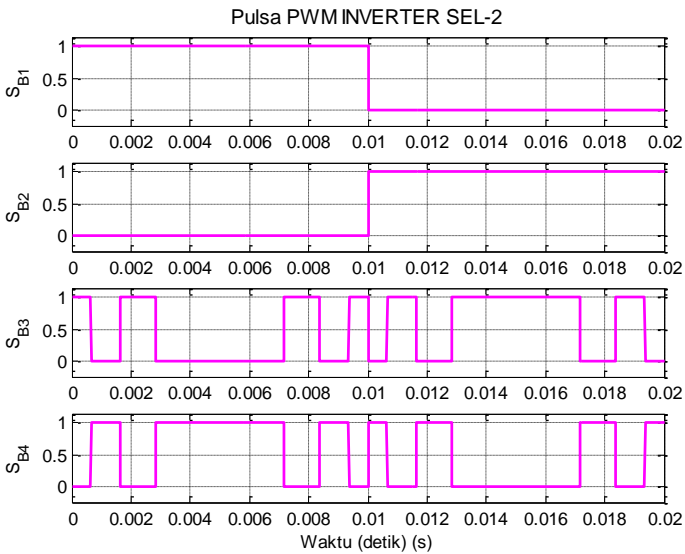
Gambar 6.7 Simulink blok pembangkitan inverter sel ke-1 (tegangan DC-link sebesar 6 V).

6.3.2 Hasil Simulasi

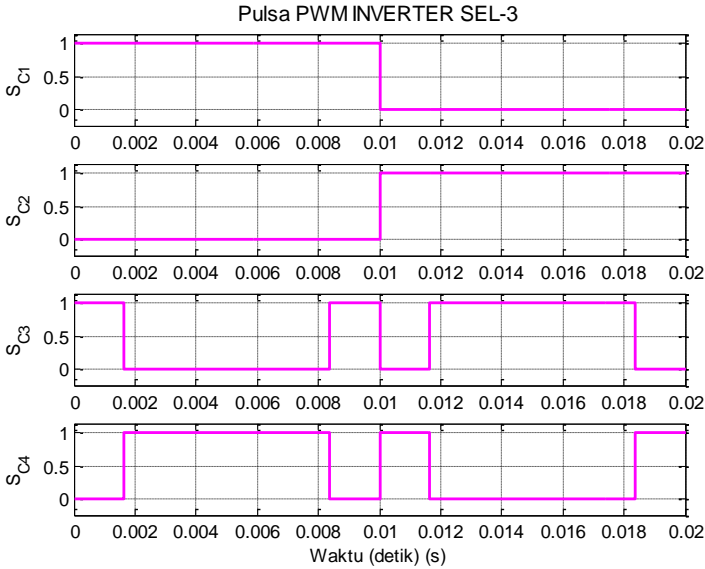
Gambar. 6.8 – Gambar 6.10 menunjukkan sinyal PWM untuk masing-masing saklar-saklar pada inverter bertingkat 3 sel untuk masing-masing inverter sel-1, inverter sel-2 dan inverter sel-3. Dapat dilihat bahwa pulsa untuk ketiga sel inverter mempunyai pola yang sama yakni saklar untuk lengan sebelah kiri (S_{x1} dan S_{x2} , $x = A,B,C$) dikontrol dengan kecepatan setara frekwensi fundamental (metode konduksi 180°) sedangkan saklar pada lengan sebelah kanan (S_{x3} dan S_{x4} , $x = A,B,C$) dikontrol dengan frekwensi beberapa kali lebih cepat dibandingkan dengan saklar pada lengan kiri. Dapat dilihat juga bahwa terjadi 15 kali komutasi pada saklar inverter sel-1 (lengan kanan), 7 kali komutasi pada saklar inverter sel-2 (lengan kanan), dan tiga kali komutasi saklar pada inverter sel-3 (lengan kanan). Jadi saklar pada inverter sel-1 (lengan kanan) dikontrol paling cepat dibandingkan saklar-saklar yang lain. Ini berarti inverter sel-1 dengan tegangan DC-link 6 V diaktivasi paling sering, untuk memberikan nilai level pada tegangan keluar, sedangkan inverter sel-3 diaktivasi paling jarang.



Gambar 6. 8. Sinyal PWM untuk sakelar inveter sel-1 (rasio DC-link 1 : 2: 4)

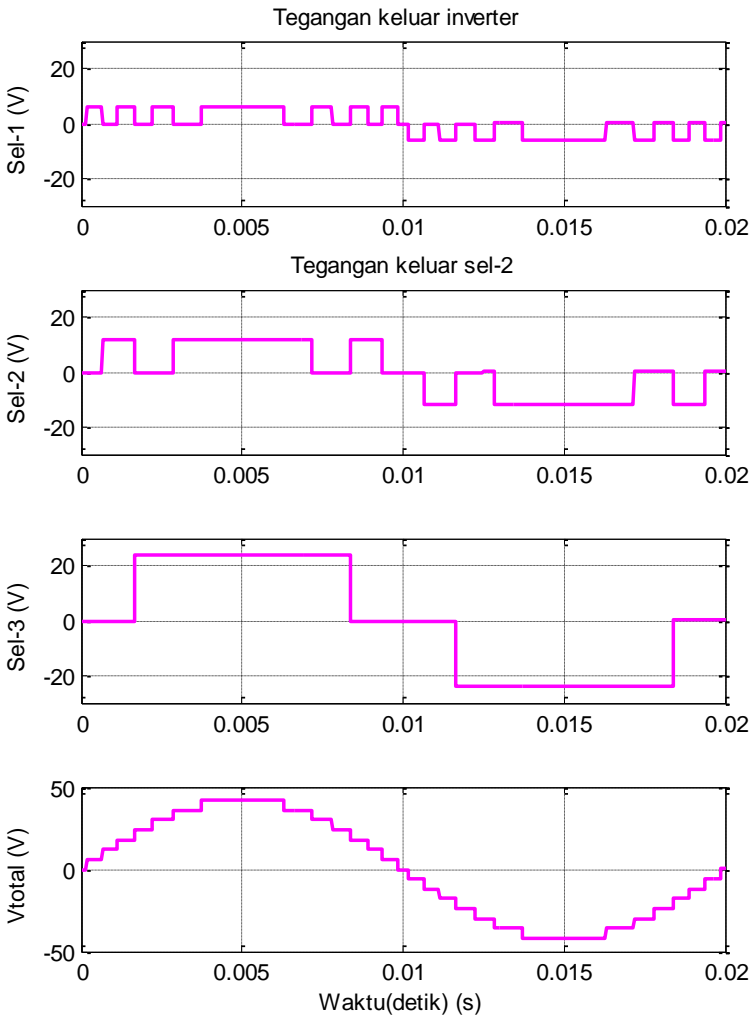


Gambar 6. 9 Sinyal PWM untuk sakelar inveter sel-2 (rasio DC-link 1 : 2: 4)



Gambar 6. 10. Sinyal PWM untuk sakelar inveter sel-3 (rasio DC-link 1 : 2: 4)

Gambar 6.11 menunjukkan tegangan keluar dari inverter bertingkat / CHB dengan rasio tegangan DC-link 1: 2: 4 beserta dengan tegangan keluar individual dari masing-masing sel inverter. Gambar 6.11 menunjukkan bahwa tegangan keluar inverter adalah jumlah dari tegangan keluar individual sel-1, sel-2 dan sel-3. Tegangan inverter sel-1 tercacah 7 kali dalam $\frac{1}{2}$ periode dengan magnitudo ± 6 V, tegangan inverter sel-2 tercacah 3 kali dalam $\frac{1}{2}$ periode dengan magnitudo ± 12 V dan tegangan sel-3 merupakan tegangan quasi tak tercacah dengan magnitudo ± 24 V. Tegangan keluar terdiri dari 15 tingkat tegangan DC dengan nilai 0 V, ± 6 V, ± 12 V, ± 18 V, ± 24 V, ± 30 V, ± 36 V, ± 42 V.



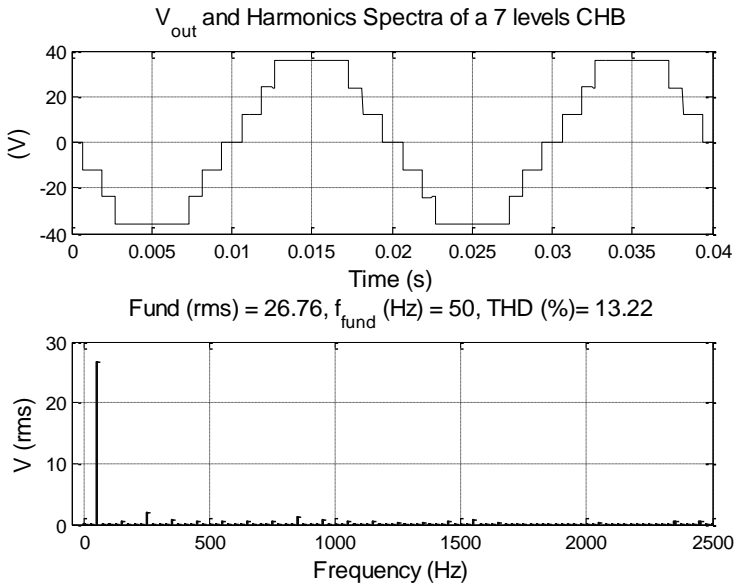
Gambar. 6.11. Tegangan keluar inverter bertingkat tiga sel (rasio DC-link 1 : 2: 4)

Ketika jumlah level dalam tegangan keluar meningkat, kualitas tegangan juga menjadi semakin baik. Peningkatan kualitas tegangan ditunjukkan dengan penurunan persentase THD dari 13,22% menjadi 5,265% yang dapat dilihat dari spektrum harmonik dari inverter CHB tiga sel dengan rasio tegangan DC-link 1 : 1 : 1 dan rasio 1 : 2 : 4 seperti yang ditunjukkan pada Gambar 6.12 dan Gambar 6.13. Spektrum harmonisa dari masing-masing tegangan juga menunjukkan bahwa inverter bertingkat dengan rasio 1 : 2 : 4 dengan sudut penyalaan yang tepat dapat menghilangkan komponen harmonisa dengan sangat baik sedangkan pada inverter dengan tegangan keluaran 7 level masih terlihat komponen harmonisa rendah ke-3, ke-5, ke-7 dan seterusnya.

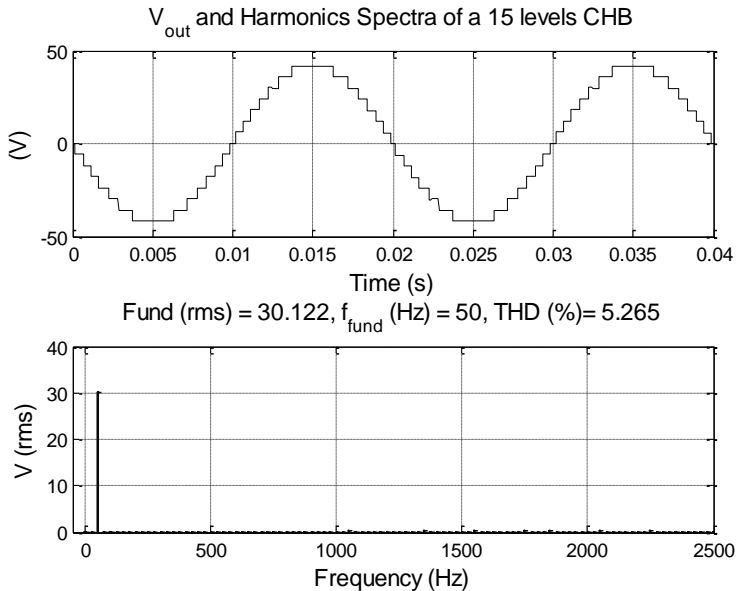
Indikator lain untuk memperlihatkan peningkatan kualitas tegangan inverter bertingkat dengan rasio tegangan DC-link adalah membandingkan persentase dari kandungan harmonisa orde rendah dari tegangan keluaran seperti yang ditunjukkan pada Tabel 6.1 dan Gambar 6.14. Jelas terlihat pada Tabel 6.1 membandingkan nilai harmonisa orde rendah dari 150 Hz (orde ke-3) sampai 950 Hz (orde ke-19). Dapat dilihat pada table bahwa inverter bertingkat dengan rasio tegangan DC-link 1 : 2 : 4 mampu menekan komponen harmonisa rendah menjadi lebih kecil dibandingkan dengan inverter bertingkat konvensional dengan tegangan DC-link yang seragam. Nilai rata-rata dari harmonisa orde rendah adalah 0.518% untuk inverter dengan rasio tegangan DC-link 1 : 2 :4 dan rata-rata harmonisa rendah adalah lebih dari 3% untuk inverter bertingkat konvensional. Hasil yang sama juga diperlihatkan secara visual pada Gambar 6.14

Tabel 6.1 Kandungan harmonik rendah tegangan output inverter CHB

Frequency (Hz)	Struktur inverter bertingkat	
	Rasio DC-Link 1:1:1	Rasio DC link 1:2:4
150	2.42	0.11
250	7.32	0.76
350	2.87	0.73
450	2.20	0.19
550	2.25	0.84
650	1.83	0.76
750	2.10	0.88
850	4.97	0.31
950	3.43	0.60
Average	3.25	0.518



Gambar. 6.12. Spektrum harmonisa tegangan keluar inverter bertingkat tiga sel (rasio DC-link 1 : 1 : 1)

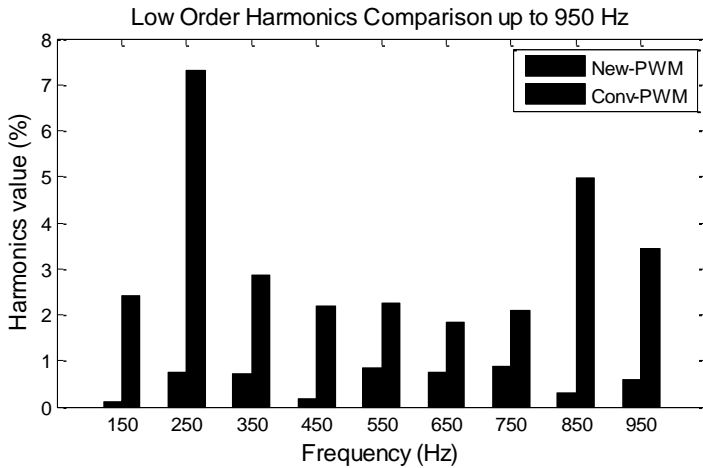


Gambar. 6.13. Spektrum harmonisa tegangan keluar inverter bertingkat tiga sel (rasio DC-link 1:2:4)

6.4 Penutup

Bab 6 ini membahas teknik modulasi inverter bertingkat dengan 3 sel inverter jembatan-H untuk perbandingan tegangan DC-link 1 : 2 : 4 (6 V : 12 V : 24V). Tegangan keluar inverter inverter sel-1, sel-2 dan sel-3 berbentuk gelombang tiga nilai dengan besar yang berbeda-beda. Konfigurasi tegangan keluar individu membentuk gelombang terdiri dari 15 tingkat tegangan DC yaitu 0 V, ± 6 V, ± 12 V, ± 18 V, ± 24 V, ± 30 V, ± 36 V, ± 42 V sedangkan inverter jembatan 3 sel konvensional menghasilkan tegangan yang terdiri dari 7 tingkat tegangan DC yaitu 0 V, ± 12 V, ± 24 V, ± 36 V. Seiring dengan penambahan jumlah level pada tegangan keluaran, kualitas tegangan keluar inverter bertingkat dengan rasion tegangan DC-link 1 : 2 : 4 juga menjadi semakin baik yang dibuktikan dengan spectrum

harmonisa dimana nilai THD yang menurun dan rata-rata kandungan harmonisa rendah yang lebih kecil. Ketika jumlah level dalam tegangan output meningkat, kualitas tegangan meningkat secara signifikan.



Gambar 6.14. Perbandingan kandungan harmonisa ke-3 sampai ke-9 tegangan keluar inverter bertingkat tiga sel dengan variasi rasio tegangan DC-link

Pustaka

- I. B. F. Citarsa, I. N. W. Satiawan, Supriono, A New Modulation Technique for A Three-Cell Single-Phase CHB Inverter with Un-Equal DC-Link Voltage for Improving Output Voltage Quality, International Conference on The 2nd Applied Electromagnetic Technology Proceeding, 2018.

BAB VII

PERBAIKAN STRUKTUR INVERTER JEMBATAN-H

7.1 Pendahuluan

Seperti sudah dibahas pada Bab 2 bahwa untuk menghasilkan tegangan keluaran dengan jumlah level yang banyak akan diperlukan jumlah sel inverter jembatan atau jumlah saklar yang semakin banyak pula. Pada inverter jembatan beringkat, jumlah saklar yang diperlukan untuk menghasilkan n - level tegangan keluaran diatur dengan persamaan:

$$n = 2(l - 1) \dots \dots \dots (7-1)$$

dimana, n adalah jumlah saklar yang dibutuhkan dan l adalah jumlah level (tingkat) pada tegangan keluaran

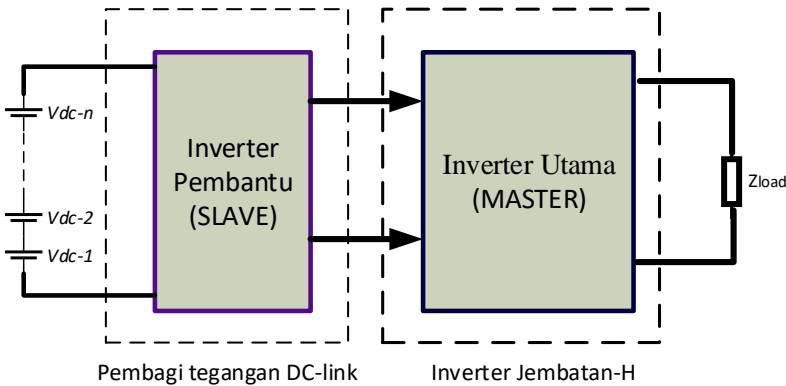
Persamaan (7-1) menyatakan hubungan jumlah level pada tegangan keluaran dengan jumlah saklar yang diperlukan pada inverter jembatan-H konvensional. Semakin banyak level tegangan yang diinginkan pada keluaran inverter semakin banyak saklar yang diperlukan. Hal ini berpotensi sangat menyulitkan dalam realisasinya. Misalnya untuk menghasilkan tegangan keluaran 15 level, maka dibutuhkan sebanyak 28 saklar. Banyaknya jumlah saklar yang digunakan tidak saja berpengaruh pada peningkatan biaya pembuatan inverter tetapi juga berpengaruh pada kompleksitas dan keandalan system. Jumlah saklar yang banyak

memerlukan pulsa PWM yang banyak sehingga kerja pembangkit pulsa menjadi lebih berat. Disamping itu, pada inverter yang melibatkan saklar yang banyak, potensi gangguan menjadi lebih besar karena jika ada salah satu saklar yang tidak berfungsi maka seluruh kinerja inverter akan terganggu buruk bahkan dapat menyebabkan terdistorsi yang besar pada tegangan keluaran (tegangan mengandung komponen harmonisa yang tinggi).

Berbagai upaya untuk menghasilkan tegangan keluaran dengan jumlah level yang banyak tapi menggunakan saklar yang lebih sedikit sudah banyak dilakukan baik oleh para peneliti maupun praktisi di bidang konversi daya. Salah satunya adalah dengan memperbaiki struktur dari inverter jembatan itu sendiri dengan melakukan modifikasi tertentu. Belakangan banyak modifikasi struktur inverter jembatan sudah berhasil diusulkan dan dipublikasikan pada berbagai literatur.

Secara umum perbaikan struktur inverter jembatan dilakukan dengan menambah saklar-saklar yang berfungsi untuk memvariasikan tegangan DC masukan kepada inverter jembatan-H. Topologi umum dari perbaikan inverter jembatan diperlihatkan pada diagram blok Gambar 7.1. Struktur inveter dapat dikelompokkan menjadi dua bagian yakni bagian inverter utama (*MASTER*) dan bagian inverter pembantu / pendukung (*SLAVE*). Inverter utama yang berupa inverter jembatan-H berfungsi untuk membangkitkan tegangan positif atau negatif atau nol dan pulsa PWM yang diperlukan juga sangat sederhana seperti sudah dijelaskan denngan sangat lengkap pada Bab 2, sedangkan pulsa untuk saklar-saklar inverter pembantu bisa menjadi lebih rumit karena hanya perlu dinyalakan pada kurun waktu tertentu saja untuk menjalankan fungsinya sebagai pengatur tegangan DC masukan kepada inverter utama. Berikut ini dibahas beberapa modifkasi struktur inverter jembatan untuk meningkatkan jumlah level tegangan

keluaran dengan menggunakan jumlah saklar yang lebih sedikit.



Gambar 7.1 Struktur umum perbaikan inverter jembatan-H

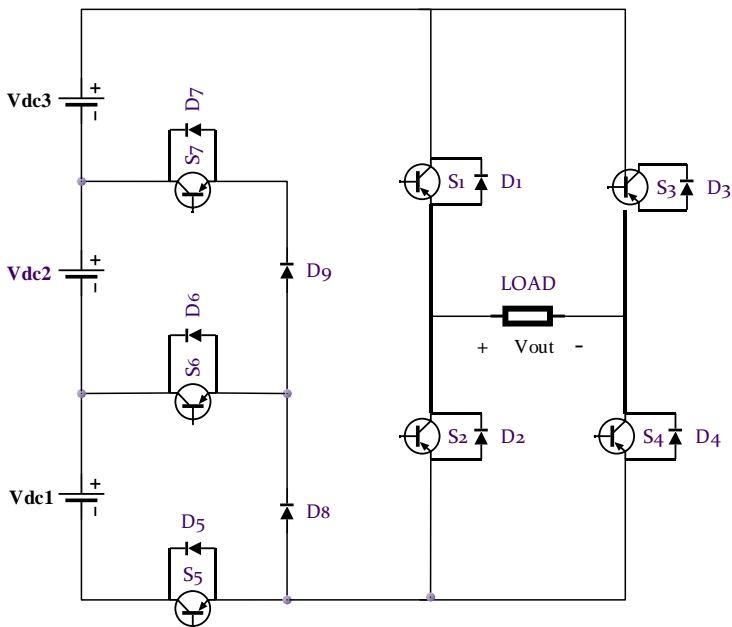
7.2 Struktur Inverter Tujuh Level Tujuh Saklar (7L-7S)

7.2.1 Topologi inverter inverter 7L-7S

Struktur inverter pertama yang dibahas pada buku ini diperlihatkan pada Gambar 7.2. Inverter utama seperti biasa tetap menggunakan 4 saklar membentuk struktur jembatan-H (S_1 - S_4) sedangkan inverter pembantu menggunakan 3 saklar (S_5 , S_6 , S_7) dan tambahan 2 diode (D_8 dan D_9) dan tiga sumber tegangan DC-link yang terpisah (V_{dc1} , V_{dc2} , V_{dc3}). Dengan menggunakan struktur ini maka inverter dapat menghasilkan 7 level tegangan keluaran (V_{out}). Karena menggunakan 7 saklar dan dapat menghasilkan 7 level tegangan maka struktur inverter ini diberikan nama Struktur Inverter Tujuh Level Tujuh Saklar (7L-7S)

7.2.2 Prinsip operasi inverter 7L-7S

Tegangan keluaran inverter tergantung dari kombinasi saklar yang diaktifkan. Untuk menghasilkan tegangan positif maka saklar S_1 dan S_4 yang harus konduksi, sedangkan untuk

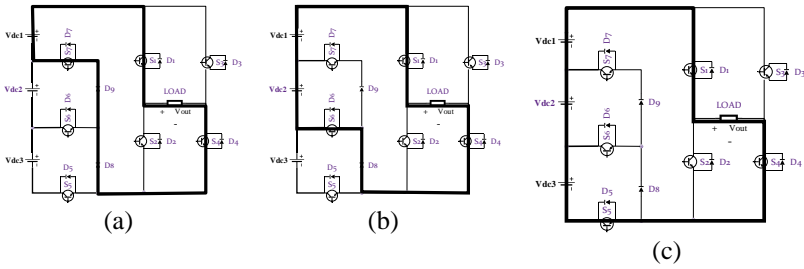


Gambar 7.2. Perbaikan inverter jembatan-H menggunakan 7 saklar dengan 7 level tegangan keluaran

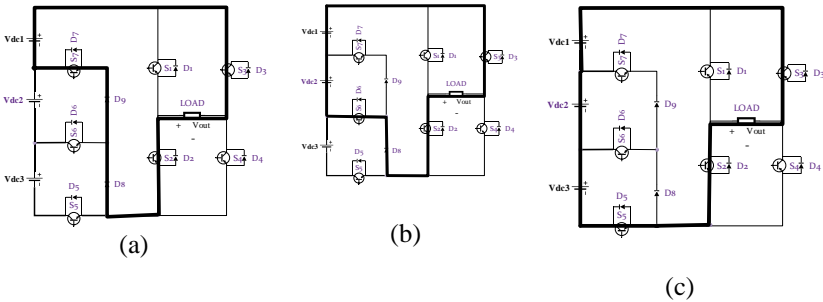
menghasilkan tegangan negatif maka saklar S_3 dan S_2 yang diaktifkan. Sedangkan saklar S_7 , S_6 dan S_5 diaktifkan secara bergantian untuk menghasilkan tegangan sebesar $\pm (V_{dc3})$, $\pm (V_{dc2} + V_{dc3})$ dan $\pm (V_{dc1} + V_{dc2} + V_{dc3})$ pada beban. Untuk menghasilkan tegangan nol, ada dua cara yakni mengaktifkan saklar S_1 dan S_3 atau mengaktifkan saklar S_2 dan S_4 . Operasi inverter untuk menghasilkan 7 tegangan keluaran dapat dijelaskan pada Gambar 7.3 sampai Gambar 7.5 dan dirangkum pada Tabel 7.1.

7.2.3 Proses pembangkitan pulsa inverter 7L-7S

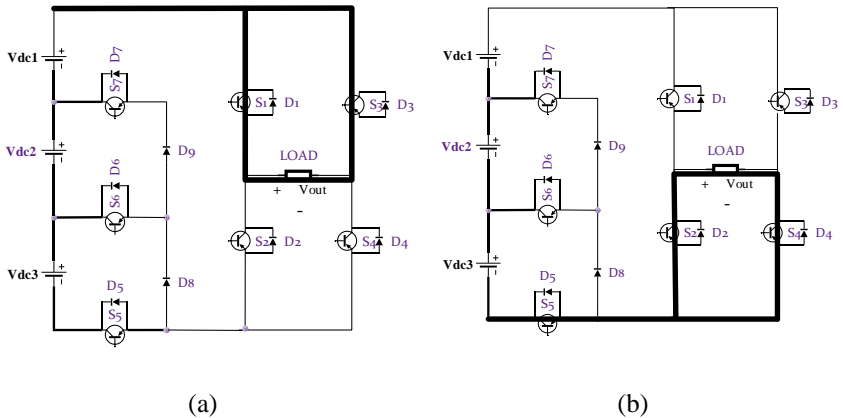
Sesuai dengan prinsip kerja inverter 7L-7S seperti yang dijelaskan pada Sub-bab 7.2.2, maka bentuk pulsa PWM masing-masing saklar direkonstruksi dengan menggunakan matrik biner



Gambar 7.3. Kombinasi saklar untuk menghasilkan tegangan positif; (a) V_{dc1} , (b) $V_{dc1}+V_{dc2}$, (c) $V_{dc1}+V_{dc2}+V_{dc3}$



Gambar 7.4. Kombinasi saklar untuk menghasilkan tegangan negative; (a) $-V_{dc1}$, (b) $-(V_{dc1}+V_{dc2})$, (c) $-(V_{dc1}+V_{dc2}+V_{dc3})$



Gambar 7.5. Kombinasi saklar untuk menghasilkan tegangan Nol; (a) S_1 dan S_3 ON, (b) S_2 dan S_4 ON

Tabel 7.1. Hubungan saklar konduksi dengan tegangan keluaran inverter

Level	Saklar yang konduksi	Tegangan keluaran (V_{out})
1	S_1, S_4, S_7 dan D_8, D_9	V_{dc1}
2	S_1, S_4, S_6 dan $D_8,$	$V_{dc1}+V_{dc2}$
3	S_1, S_4, S_5	$V_{dc1}+V_{dc2} +V_{dc1}$
0	S_1, S_3 atau S_2, S_4	0
-3	S_2, S_3, S_5	$-(V_{dc1}+V_{dc2} +V_{dc1})$
-2	S_2, S_3, S_6 dan $D_8,$	$-(V_{dc1}+V_{dc2})$
-1	S_2, S_3, S_7 dan D_8, D_9	$-V_{dc1}$

seperti Gambar 7.6. Dari Gambar 7.6 terlihat bahwa saklar S_1 sampai S_4 dioperasikan seperti halnya inverter jembatan – H pada umumnya, sedangkan saklar S_5 sampai S_7 dioperasikan secara bergantian sehingga tegangan DC masukan inverter utama bervariasi sebesar V_{dc1} , $V_{dc1}+V_{dc2}$, dan $V_{dc1}+V_{dc2}+V_{dc3}$

	Leve	0	1	2	3	2	1	0	0	-	-	-	-	-	0
	1									1	2	3	2	1	0
S A K L A R	S_1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	1
	S_2	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	0
	S_3	1	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1
	$S_4,$	0	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0
	S_5	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
	S_6	0	0	1	0	1	0	0	0	0	1	0	1	0	0
	S_7	0	1	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	1	0

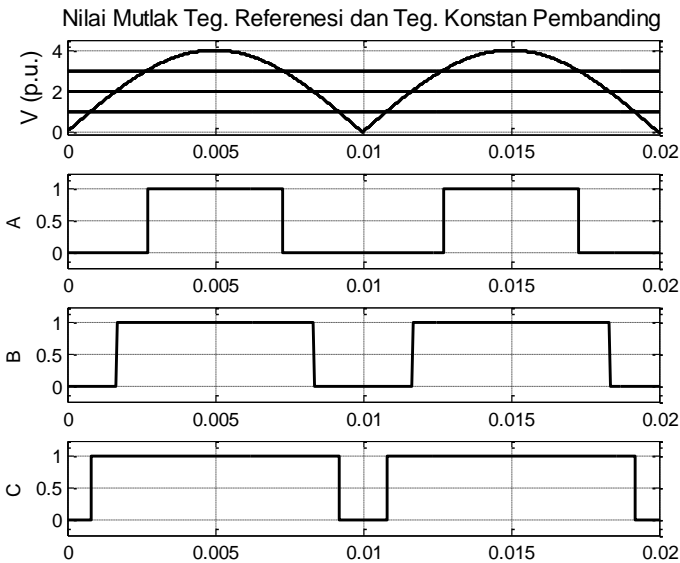
Gambar 7.6. Matrik biner untuk pembentukan pulsa PWM inverter 7L-7S

7.2.4 Pembangkitan Pulsa PWM

Pembangkitan Pulsa PWM menggunakan Simulink / Matlab dilakukan dengan tahapan seperti digambarkan pada Gambar 7.7. Pulsa saklar $S_1 - S_4$ untuk inverter jembatan-H dibangkitkan dengan cara membandingkan gelombang sinusoidal yang tergeser (sebesar $\alpha = \pm 10^\circ$) dengan konstanta Nol sedangkan pulsa untuk saklar S_5

sampai S_7 diperoleh dengan menggunakan cara sebagai berikut:

Pertama membentuk tiga sinyal dasar yang diberi label sinyal A , B dan C . Sinyal tersebut diperoleh dengan cara membandingkan nilai mutlak sinyal sinusoidal bermagnitude 4 p.u (V_{sinus}) dengan 3 sinyal bernilai tetap (V_{DC}) dengan magnitude masing-masing 1, 2 dan 3 seperti terlihat pada Gambar 7.7. Jika $V_{sinus} > V_{DC}$, pulsa bernilai *high* (ON) sebaliknya jika $V_{sinus} < V_{DC}$ sinyal bernilai *low* (OFF). Selanjutnya pulsa untuk saklar S_5 , S_6 dan S_7 dibentuk menggunakan pulsa dasar tersebut dengan cara sebagai berikut;



Gambar 7.7 Proses pembangkitan pulsa PWM untuk saklar S_5 , S_6 dan S_7 inverter 7L-7S

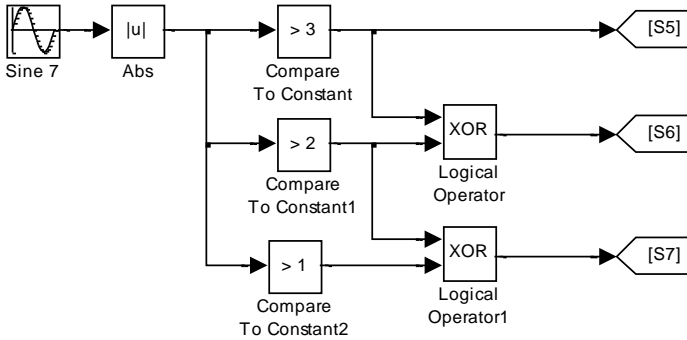
$$S_5 = A$$

$$S_6 = \text{XOR}\{A,B\}$$

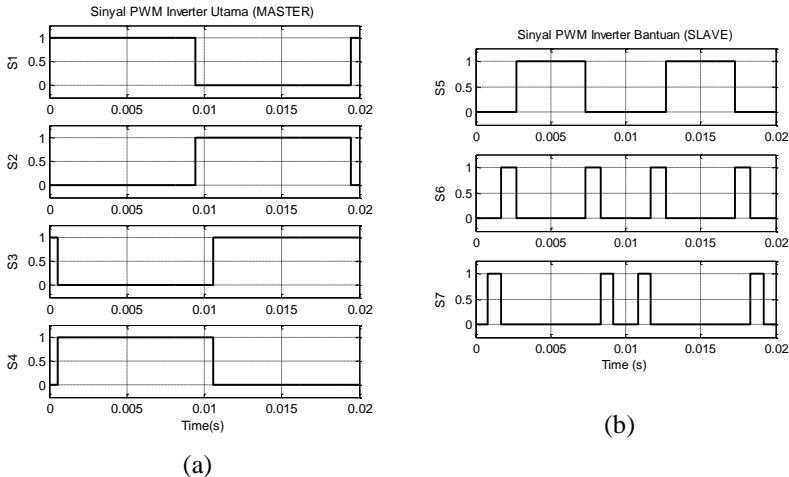
$$S_7 = \text{XOR}\{B,C\}$$

Proses pembangkitan pulsa menggunakan Simulink dapat dilihat pada Gambar 7.8 sedangkan pulsa

dimaksud untuk masing-masing saklar S_1 , S_2 , S_3 , dan S_4 diperlihatkan pada Gambar 7.9 (a) dan pulsa untuk saklar S_5 , S_6 dan S_7 diperlihatkan pada Gambar 7.9 (b).



Gambar 7.8. Blok Simulink pembangkitan pulsa PWM Saklar S_5 , S_6 , S_7 inverter 7L-7S

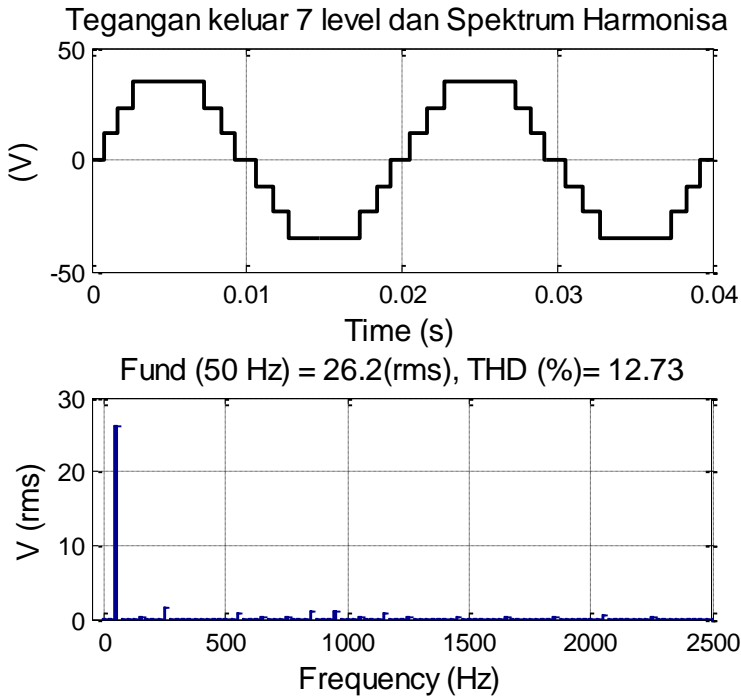


Gambar 7.9. Pulsa PWM inverter 7L-7S : (a) untuk saklar pada inverter utama ($S_1 - S_4$), (b) untuk inverter bantuan (S_5-S_7)

Dengan mengoperasikan saklar-saklar pada inverter rangkaian Gambar 7.1 dengan menggunakan pulsa seperti pada Gambar 7.9, dan tegangan DC link seragam sebesar 12 Volt, maka tegangan keluaran hasil simulasi Matlab/Simulonk berupa gelombang tangga 7 level seperti terlihat pada Gambar 7.10. Dengan penambahan tingkat / level pada tegangan keluaran maka kualitas tegangan akan semakin bagus dimana nilai harmonisa rendah menjadi semakin kecil seperti terlihat pada spectrum harmonisa pada Gambar 7.10. THD tegangan keluaran sebesar 12.73 lebih baik dari inverter 3 tingkat atau 5 tingkat seperti dibahas pada Bab II.

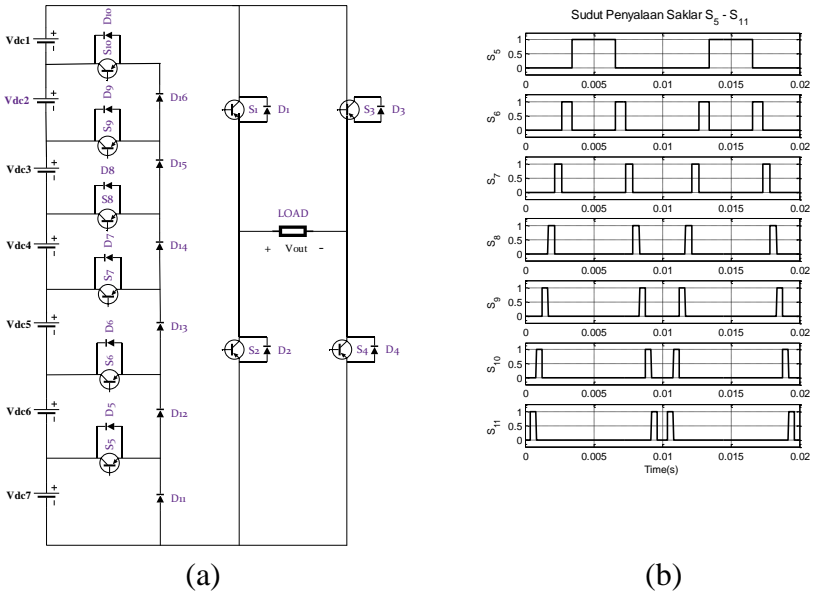
7.2.5 Pengembangan struktur inverter 7L-7S

Struktur inverter 7L-7S yang dijelaskan diatas dapat dikembangkan untuk menghasilkan tegangan keluaran dengan jumlah level yang lebih banyak. Untuk menghasilkan tegangan keluaran 7 level diperlukan total 7 saklar dan untuk menjadikan tegangan keluaran menjadi 9 level diperlukan satu tambahan saklar dan satu Diode demikian seterusnya. Demikian untuk menambah level tegangan keluaran menjadi 15 maka diperlukan 11 saklar yakni 7 saklar pada inverter pembantu (*slave*) dan 4 saklar pada inverter utama (*master*) seperti terlihat pada rangkaian Gambar 7.11 (a). Dengan menggunakan pulsa PWM yang sama dengan Gambar 7.9 (a) pada saklar S_1 - S_4 dan pulsa PWM untuk saklar S_5 - S_{11} seperti diperlihatkan pada Gambar 7.11 (b), tegangan 7 tegangan DC, dapat dihasilkan tegangan keluaran 15 level. Terlihat pada Gambar 7.11 (b) bahwa semua saklar pada inverter pembantu dioperasikan secara bergantian satu dengan yang lain karena memang fungsinya untuk mengatur besar tegangan masukan pada

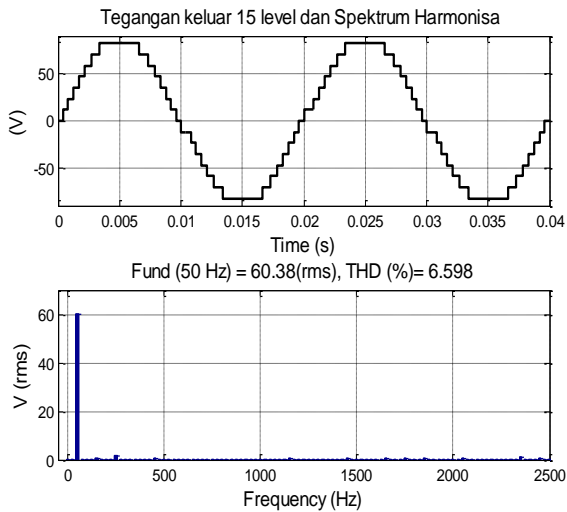


Gambar 7.10. Bentuk tegangan keluaran modifikasi inverter jembatan dengan struktur 7L-7S

inverter utama. Bentuk gelombang tegangan keluar inverter 15 level diperlihatkan pada Gambar 7.12. Jelas terlihat bahwa tegangan keluaran mengandung 7 level tegangan positif, 7 level tegangan negatif dan tegangan nol. Dengan penambahan level pada kualitas tegangan keluaran semakin baik dimana kandungan harmonisa rendah juga semakin kecil sehingga menjadikan THD tegangan menurun menjadi sebesar 6.6%.



Gambar 7.11. (a) Pengembangan struktur inverter 7L-7S untuk tegnagan keluar 15 level, (b) Bentuk pulsa PWM saklar-saklar pada inverter pembantu



Gambar 7.12. Tegangan keluar pengebangn inverter 7L-7S dan spektrum harmonisanya

7.2.6 Pengembangan inverter level ke- n

Dengan kesederhanaan struktur dan proses pembentukan pulsa PWM yang tidak rumit maka struktur ini dapat dikembangkan dengan mudah untuk menghasilkan jumlah level yang lebih banyak lagi. Perbandingan jumlah level tegangan keluaran dan jumlah saklar yang dipakai untuk struktur ini dibandingkan dengan inverter jembatan-H konvensional dirangkum pada Tabel 7.2. Dari Tabel 7.2 dapat diketahui bahwa struktur seperti yang dijelaskan diatas dapat menghemat pemakaian saklar. Semakin tinggi level tegangan keluaran inverter semakin banyak saklar yang bisa dihemat jika dibandingkan dengan inverter jembatan konvensional. Hubungan jumlah saklar yang diperlukan dengan jumlah level yang dihasilkan untuk rangkaian yang baru ini diatur dengan fungsi sesuai dengan persamaan (7.2).

$$n = (7+l)/2 \dots \dots \dots (7-2)$$

dimana, n adalah jumlah saklar yang dibutuhkan dan l adalah jumlah level (tingkat) pada tegangan keluaran

Table 7.2 Perbandingan jumlah saklar inverter modifikasi dan inverter jembatan-H konvensional

level (l)	Jumlah saklar (n)		Penghematan Saklar	THD (%)
	Jembatan- H Modifikasi	Jembatan-H Konvensional		
3	4	4	0%	
5	6	8	25%	17.48
7	7	12	41.67%	12.73
9	8	16	50%	10.3
11	9	20	55%	8.88
13	10	24	58%	8.13
15	11	28	61%	6.598
21	14	40	65%	4.8

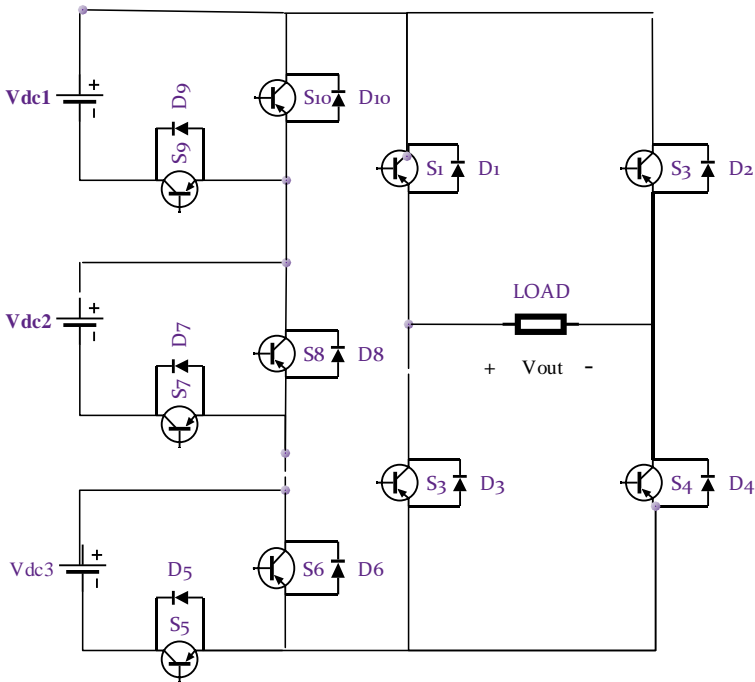
$$n = (7+l)/2 \quad n = 2(l-1)$$

7.3 Struktur inverter 7 keluaran 10 Saklar (7L-10S)

Struktur Inverter selanjutnya yang dibahas pada buku ini diperlihatkan pada Gambar 7.13. Struktur ini menggunakan 10 saklar, yakni 4 saklar pada inverter utama (*Master*) dan 6 saklar pada inverter pembantu (*Slave*). Hasil dari inverter dengan struktur 7L-10S ini tergantung dari rasio tegangan DC yang dipergunakan. Dibandingkan struktur yang dibahas pada Sub-Bab 7.2, struktur ini menggunakan saklar yang lebih banyak dimana struktur sebelumnya menggunakan dua saklar dan tiga diode pada inverter pembantu. Namun demikian, struktur ini memiliki keunggulan dimana tegangan keluaran bisa bervariasi tergantung dari rasio tegangan DC yang diberikan. Pada rasio tegangan DC link 1 : 1 : 1 maka jumlah level pada tegangan keluaran yang bisa dihasilkan adalah 7 level, sedangkan untuk rasio tegangan DC link 1:2:4 maka jumlah level tegangan keluaran yang bisa dihasilkan adalah sebanyak 15 level.

7.3.1 Prinsip operasi inverter 7L-10S dengan rasio tegangan DC 1 : 1 : 1

Dengan menggunakan referensi saklar seperti terlihat pada Gambar 7.13 dimana $V_{dc1} =$



Gambar 7.13. Struktur inverter 7L-10S

$V_{dc2} = V_{dc3}$, maka seperti halnya pada struktur inverter 10S-7L yang dijelaskan pada Sub-Bab sebelumnya, kombinasi saklar S_5 sampai S_{10} berfungsi untuk memberikan variasi tegangan DC ke inverter utama, sedangkan, kombinasi saklar S_1 , S_3 , S_2 dan S_4 berfungsi untuk memberikan tegangan positif, negatif dan nol. Kombinasi saklar untuk menghasilkan tegangan 7 level diperlihatkan pada Table 7.3.

Table 7.3. Hubungan kombinasi saklar dengan tegangan keluaran inverter

Level	Saklar yang konduksi	Tegangan keluaran (V_{out})
1	S_1, S_4, S_6, S_8, S_9	V_{dc1}
2	S_1, S_4, S_6, S_7, S_9	$V_{dc1} + V_{dc2}$
3	S_1, S_4, S_5, S_7, S_9	$V_{dc1} + V_{dc2} + V_{dc1}$
0	S_1, S_3 atau S_2, S_4	0
-3	S_2, S_3, S_5, S_7, S_9	$-(V_{dc1} + V_{dc2} + V_{dc1})$
-2	S_2, S_3, S_6, S_7, S_9	$-(V_{dc1} + V_{dc2})$
-1	S_2, S_3, S_6, S_8, S_9	$-V_{dc1}$

Dengan menggunakan Tabel 7.3 maka dapat dibuat matrik biner seperti terlihat pada Gambar 7.14.

	Leve	0	1	2	3	2	1	0	0	-	-	-	-	-	0
	1	0	1	2	3	2	1	0	0	1	2	3	2	1	0
S A K L A R	S_1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	1
	S_2	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	0
	S_3	1	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1
	S_4	0	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0
	S_5	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
	S_6	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1
	S_7	0	0	1	1	1	0	0	0	0	1	1	1	0	0
	S_8	1	1	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0	1	1
	S_9	0	1	1	1	1	1	0	0	1	1	1	1	1	0
	S_{10}	1	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	1

Gambar 7.14. Matrik biner untuk pembentukan pulsa PWM inverter 7L-10S

7.3.2 Pembentukan pulsa PWM untuk inverter 7L-10S

Realisasi pulsa PWM struktur inverter 7L-10S dilakukan dengan cara yang hampir sama dengan pembentukan pulsa untuk struktur inverter 7L-7S dimana tegangan referensi dengan magnitude 4 p.u dibandingkan dengan 3 tegangan konstan dengan magnitude 1, 2, dan 3 p.u untuk menghasilkan 3 pulsa yang diberi label A, B dan C seperti terlihat pada Gambar 7.7 Dengan menggunakan pulsa A, B, C maka pulsa

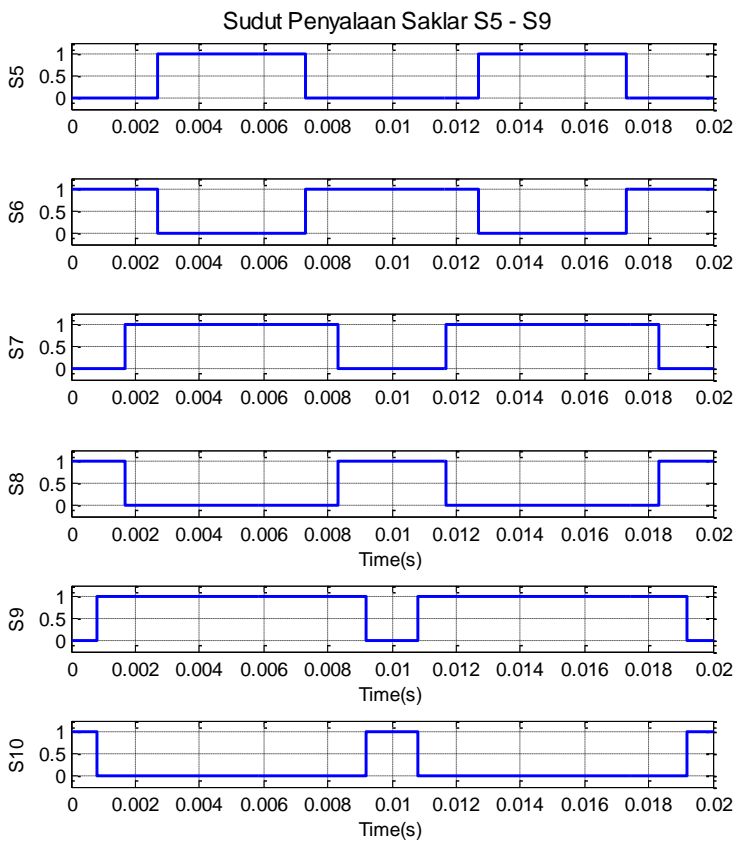
PWM untuk saklar S_5 - S_{10} dapat dibentuk dengan cara yang sangat sederhana yakni ;

$$S_5 = A . S_6 = \text{NOT} (A)$$

$$S_7 = B, S_7 = \text{NOT} (B)$$

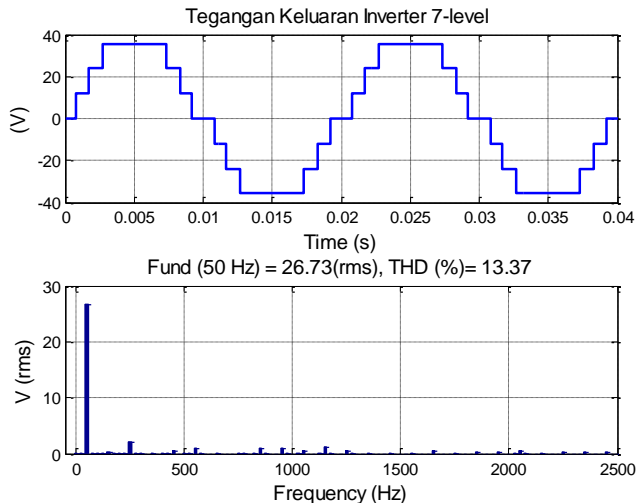
$$S_9 = C, S_{10} = \text{NOT} (C)$$

Pulsa PWM untuk saklar inverter pembantu (S_5 - S_{10}) diperlihatkan pada Gambar 7.15



Gambar 7.15 Pulsa PWM untuk saklar S_5 - S_{10} inverter 7L-10S

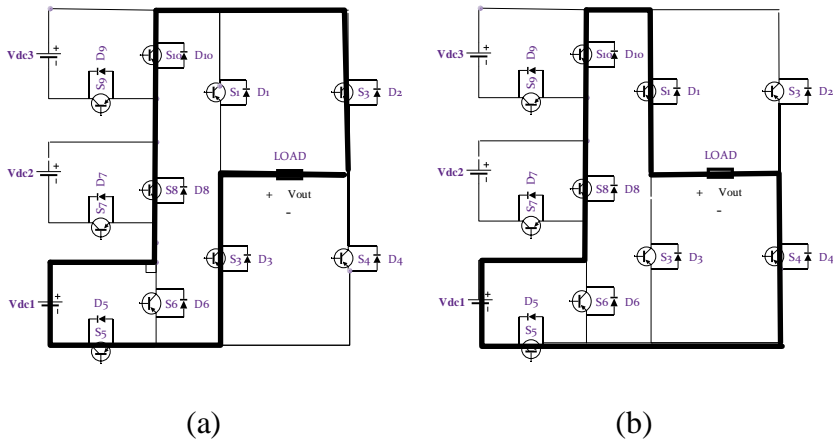
Dari Gambar 7.15 terlihat bahwa saklar S_6 , S_8 dan S_{10} merupakan kebalikan (komplementer) dari masing-masing saklar S_5 , S_7 dan S_9 . Karena nilai nol pada tegangan keluaran diperoleh dari kombinasi saklar genap pada inverter utama maka Saklar S_9 bisa dibuat konduksi terus dan sebaliknya saklar S_{10} bisa dibuat diskonduksi terus, atau dengan kata lain, Saklar S_9 bisa diganti dengan Dioda dan Saklar S_{10} bisa dihilangkan. Saklar S_9 dan S_{10} akan berperan jika perbandingan tegangan DC link adalah 1:2:4 diberlakukan. Dengan menggunakan tegangan DC masukan yang seragam yakni $V_{dc1} = V_{dc2} = V_{dc3} = 12$ Volt dan pulsa Gambar 7.9 (a) untuk saklar S_1 - S_4 serta pulsa Gambar 7.15 untuk saklar S_5 - S_{10} maka didapat tegangan keluaran 7 level seperti Gambar 7.16 yang hampir sama dengan gelombang tegangan Gambar 7.10. Jika dibandingkan dengan tegangan keluaran pada Gambar 7.10, tegangan keluaran pada Gambar 7.16 memiliki magnitude tegangan keluaran rms yang lebih besar (berbeda 0.5 Volt yakni 26.2 V berbanding 26.7 V). Hal ini disebabkan oleh drop tegangan pada diode lebih besar dari pada pada saklar (MOSFET).



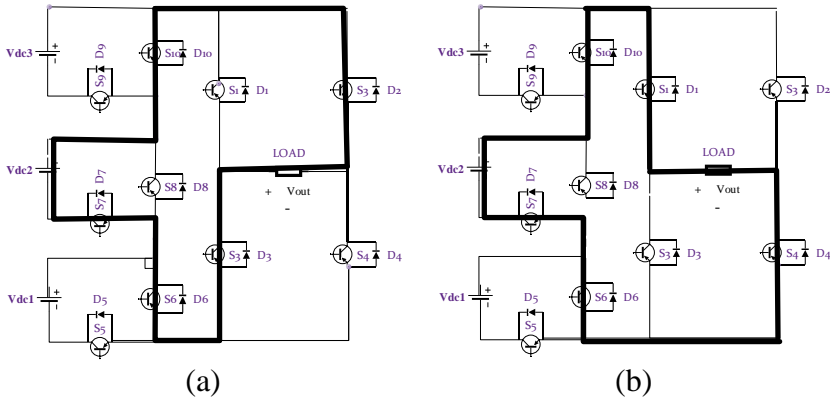
Gambar 7.16. Tegangan keluaran struktur inverter 7L-10S

7.3.3 Prinsip operasi inverter 7L-10S untuk rasio 1:2:4

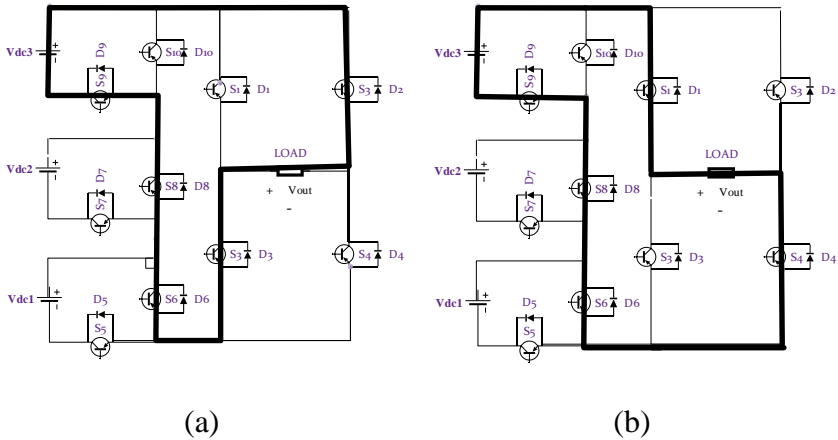
Prinsip operasi inverter dengan perbandingan tegangan DC masukan 1:2:4 sedikit lebih rumit dibandingkan dengan perbandingan 1:1:1 karena kombinasi saklar menjadi lebih banyak sehingga diantara V_{dc1} , V_{dc2} dan V_{dc3} dapat bekerja secara sendiri-sendiri atau secara bersamaan untuk menghasilkan variasi tegangan keluaran $\{\pm 7, \pm 6, \pm 5, \pm 4, \pm 3, \pm 2, \pm 1, 0\}$. Kombinasi saklar-saklar yang aktif (konduksi) dan tegangan yang dihasilkan diperlihatkan pada Gambar 7.17-7.24. Kondisi saklar seperti Gambar 7.17 sampai 7.24 dapat dirangkum pada Tabel 7.4 dan pulsa PWM yang diperlukan dapat dibentuk dengan menggunakan matrik biner seperti terlihat pada Gambar 7.25.



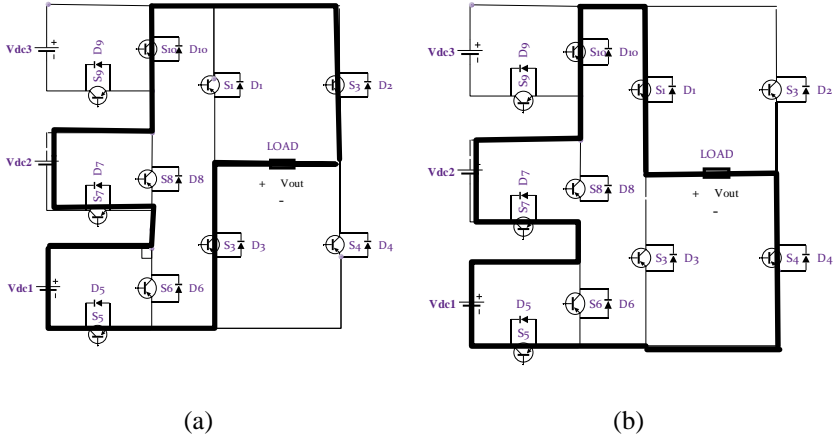
Gambar 7.17 . Kombinasi saklar untuk menghasilkan tegangan; (a) $+ V_{dc1}$, (b) $- V_{dc1}$



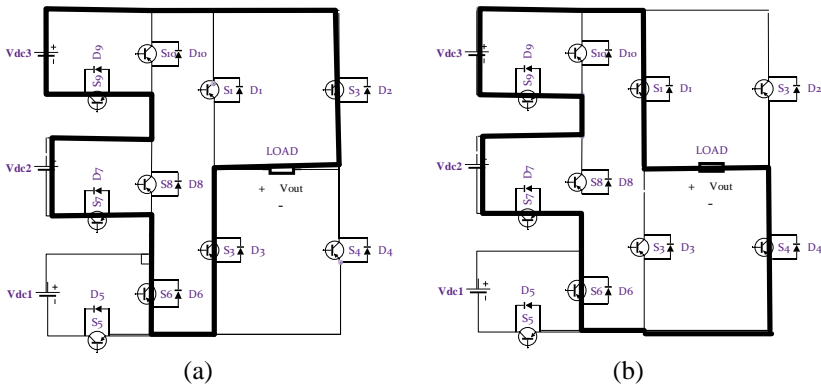
Gambar 7.18 . Kombinasi saklar untuk menghasilkan tegangan; (a) $+V_{dc2}$, (b) $-V_{dc2}$



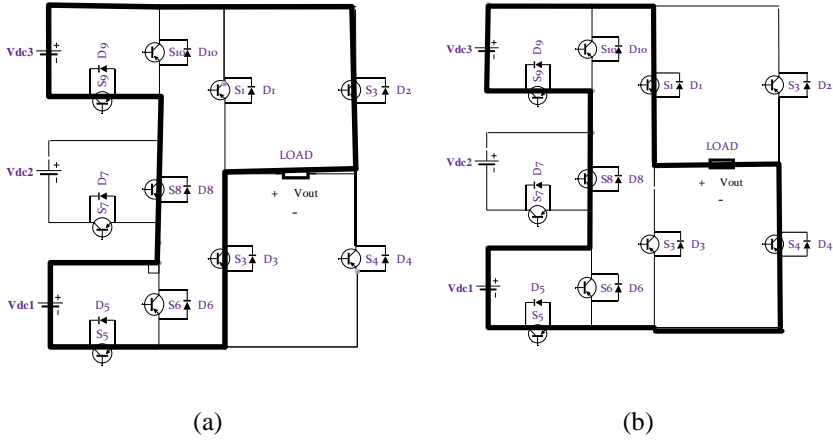
Gambar 7.19 . Kombinasi saklar untuk menghasilkan tegangan; (a) $+V_{dc3}$, (b) $-V_{dc3}$



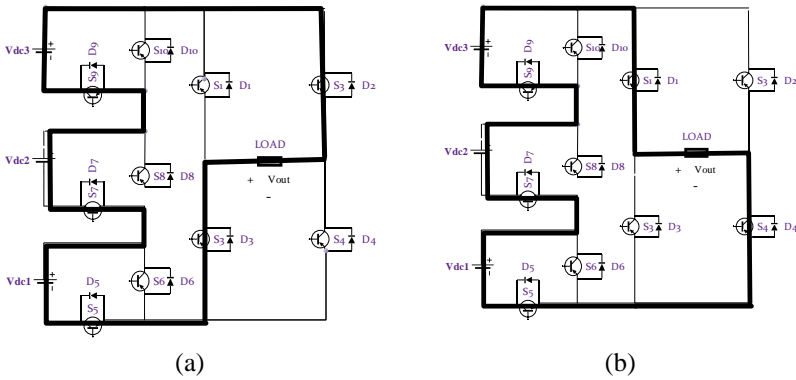
Gambar 7.20. Kombinasi saklar untuk menghasilkan tegangan; (a) $+(V_{dc1} + V_{dc2})$, (b) $-(V_{dc1} + V_{dc2})$



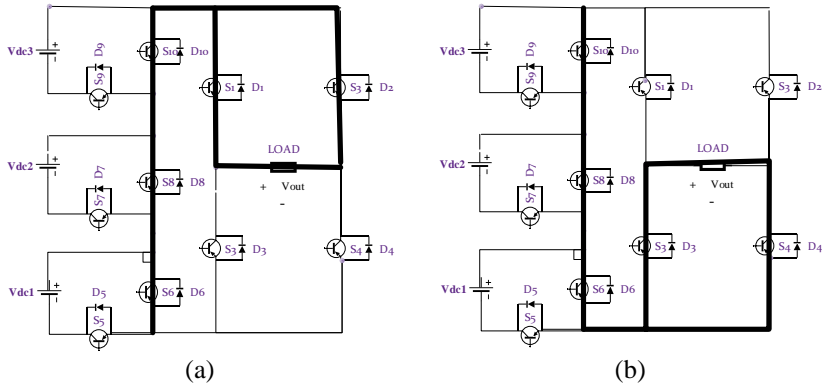
Gambar 7.21. Kombinasi saklar untuk menghasilkan tegangan; (a) $+(V_{dc2} + V_{dc3})$, (b) $-(V_{dc2} + V_{dc3})$



Gambar 7.22 Kombinasi saklar untuk menghasilkan tegangan; (a) $+(V_{dc1} + V_{dc3})$, (b) $-(V_{dc1} + V_{dc3})$



Gambar 7.23. Kombinasi saklar untuk menghasilkan tegangan; (a) $+(V_{dc1} + V_{dc2} + V_{dc3})$, (b) $-(V_{dc1} + V_{dc2} + V_{dc3})$



Gambar 7.24. Kombinasi saklar untuk menghasilkan tegangan keluaran nol

Tabel 7.4. Hubungan kombinasi saklar dengan tegangan keluaran inverter

Level	Saklar yang konduksi	Tegangan keluaran (V_{out})
1	$S_1, S_4, S_5, S_8, S_{10}$	V_{dc1}
2	$S_1, S_4, S_6, S_7, S_{10}$	V_{dc2}
3	$S_1, S_4, S_5, S_7, S_{10}$	V_{dc3}
4	S_1, S_4, S_6, S_8, S_9	$V_{dc1} + V_{dc2}$
5	S_1, S_4, S_5, S_8, S_9	$V_{dc1} + V_{dc3}$
6	S_1, S_4, S_6, S_7, S_9	$V_{dc2} + V_{dc3}$
7	S_1, S_4, S_5, S_7, S_9	$V_{dc1} + V_{dc2} + V_{dc3}$
0	S_1, S_3 atau S_2, S_4	0
-7	S_2, S_3, S_5, S_7, S_9	$-(V_{dc1} + V_{dc2} + V_{dc3})$
-6	S_2, S_3, S_6, S_7, S_9	$-(V_{dc1} + V_{dc2})$
-5	S_2, S_3, S_5, S_8, S_9	$-(V_{dc1} + V_{dc2})$
-4	S_2, S_3, S_6, S_8, S_9	$-(V_{dc1} + V_{dc2})$
-3	$S_2, S_3, S_5, S_7, S_{10}$	$-V_{dc3}$
-2	$S_2, S_3, S_6, S_7, S_{10}$	$-V_{dc2}$
-1	$S_2, S_3, S_5, S_8, S_{10}$	$-V_{dc1}$

	Leve l	0	1	2	3	4	5	6	7	6	5	4	3	2	1	0
SAKLAR	S ₁	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0
	S ₂	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
	S ₃	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	S ₄	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	S ₅	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0
	S ₆	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1
	S ₇	0	0	1	1	0	0	1	1	1	0	0	1	1	0	0
	S ₈	1	1	0	0	1	1	0	0	0	1	1	0	0	1	1
	S ₉	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0
	S ₁₀	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1

Gambar 7.25. Matrik biner untuk pembentukan pulsa PWM inverter 7L-S10 rasio tegangan DC 1 :2:4

Realisasi pulsa PWM untuk inverter S10-L7 dengan perbandingan tegangan DC 1:2:4 dilakukan dengan membandingkan 7 tegangan konstan dengan magnitudo 1-7 dengan nilai multak tegangan sinusoidal dengan magnitudo 8 seperti terlihat pada Gambar 7.26. Perbandingan tersebut menghasilkan 7 pulsa dasar yang diberi label pulsa A, B, C, D, E, F dan G. Selanjutnya pulsa PWM untuk saklar S₅ sampai S₁₀ dibentuk dengan dengan cara sebagai berikut;

$$S_5 = \text{XOR}\{A, B, C, D, E, F, G\},$$

$$S_6 = \text{NOT} (S_5),$$

$$S_7 = \text{XOR}\{B, D, F\},$$

$$S_8 = \text{NOT} (S_7),$$

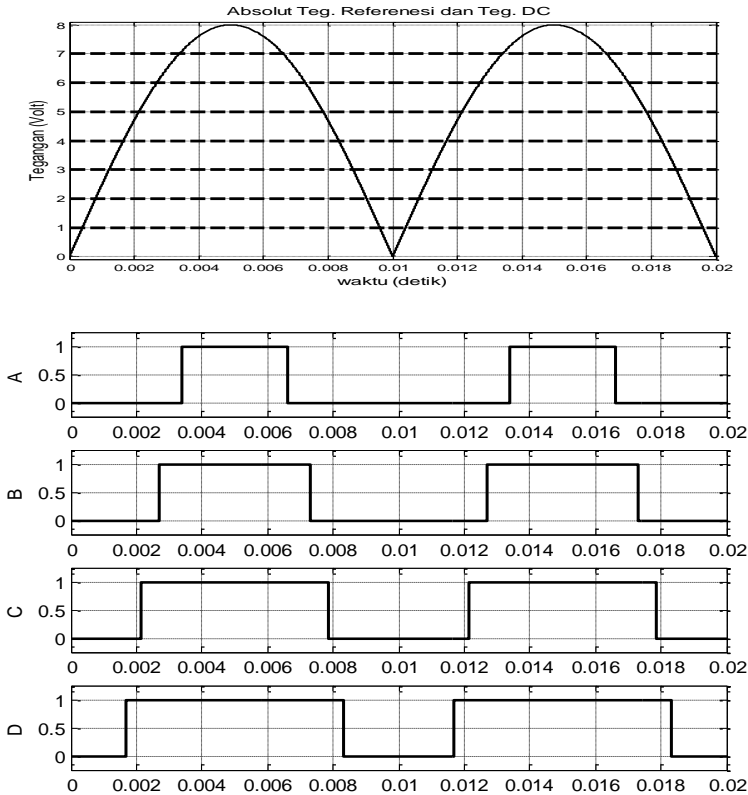
$$S_9 = D,$$

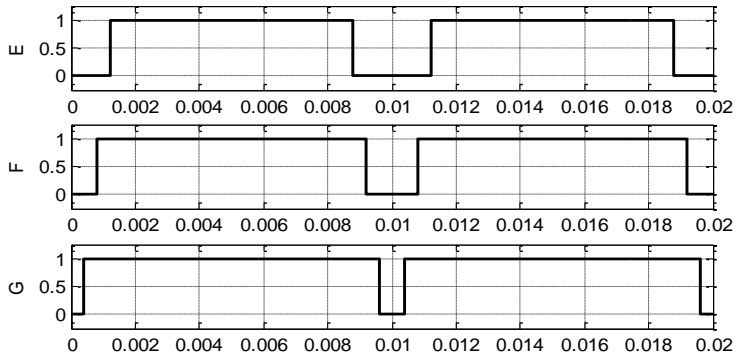
$$S_{10} = \text{NOT} (S_9)$$

Bentuk pulsa untuk saklar S₅- S₁₀ diperlihatkan pada Gambar 7.27. dari Gambar 7.27 terlihat bahwa saklar S₅, S₇ dan S₉ selalu berlawanan dengan saklar S₆, S₈ dan S₁₀. Saklar S₅ (dan S₆) terlihat paling sering konduksi dibandingkan dengan saklar yang lain. Hal ini

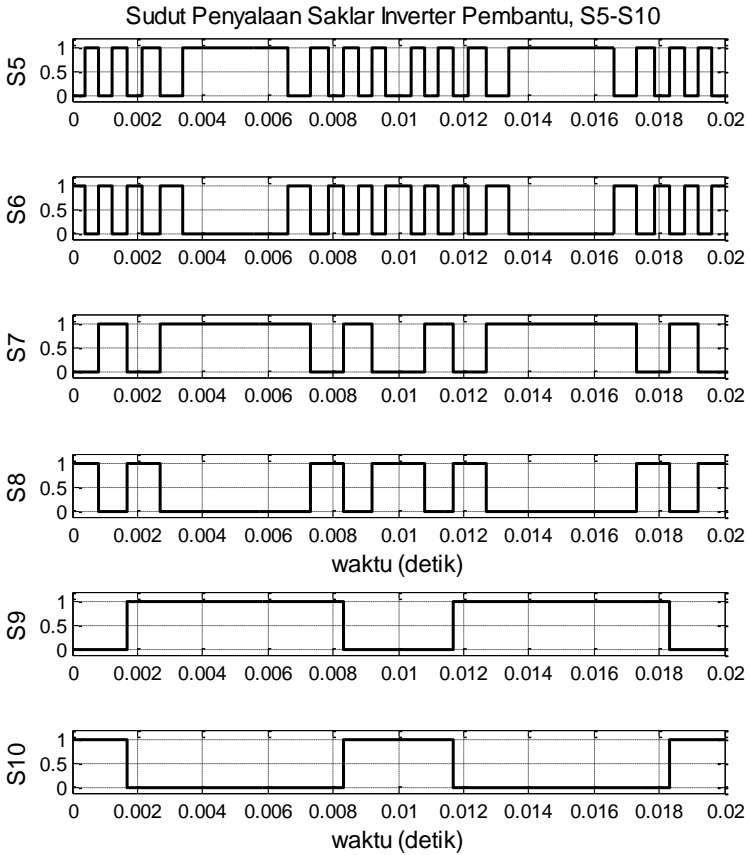
terjadi karena posisi saklar S_5 dimana harus konduksi untuk menghasilkan tegangan 6 V, 18 V, 30 V dan 48 V. Sedangkan saklar yang lain konduksi lebih jarang.

Hasil simulasi Matlab tegangan keluaran inverter dengan tegangan DC $V_{dc1} = 6$ V, $V_{dc2} = 12$ V dan $V_{dc3} = 24$ V diperlihatkan pada Gambar 7.28.

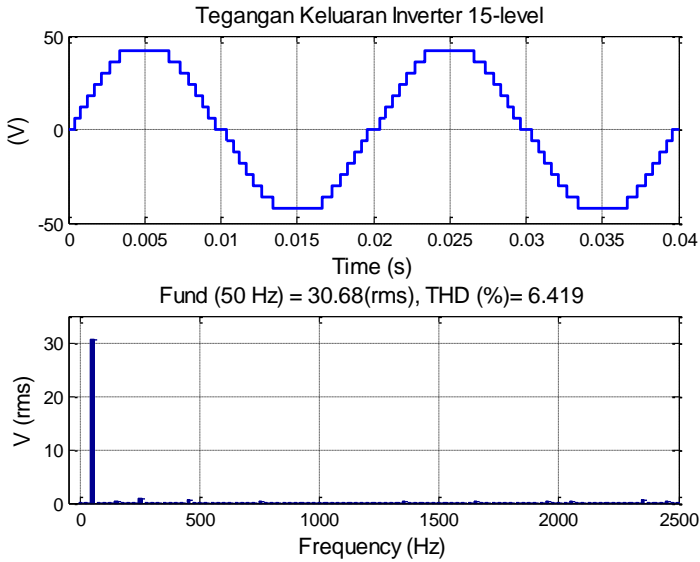




Gambar 7.26 Pembentukan pulsa dasar untuk inverter 7L-10S dengan rasio tegangan DC 1:2:4



Gambar 7.27 Bentuk pulsa PWM inverter 7L-10S dengan rasio tegangan DC 1:2:4



Gambar 7.28 Bentuk gelombang tegangan keluaran inverter 7L-S10 dengan rasio tegangan DC 1:2:4

Dari Gambar 7.28 terlihat bentuk tegangan keluaran inverter 15 level yang bisa dihasilkan oleh struktur inverter 7L-10S dengan hanya menggunakan hanya 10 saklar saja. Penghematan jumlah saklar yang sangat banyak dibandingkan dengan inverter jembatan-H bertingkat konvensional tentunya sangat berguna dalam menghemat biaya pembuatan inverter dan juga dapat meningkatkan keandalan inverter dengan semakin sedikit saklar yang terlibat. Namun demikian perbedaan tegangan DC yang cukup besar antara V_{dc1} dengan V_{dc3} (1:4) tentu akan menimbulkan kesulitan tersendiri terutama dalam menentukan rating komponen dari rangkaian driver yang digunakan dalam membentuk pulsa PWM.

7.4 Penutup

Bab ini membahas modifikasi struktur inverter jembatan-H. Inverter jembatan-H dimodifikasi dengan cara menambah rangkaian yang terdiri dari beberapa saklar tambahan yang fungsinya untuk memberikan variasi tegangan masukan pada inverter jembatan-H. Ada dua struktur inverter yang dibahas. Struktur inverter pertama menggunakan tiga sumber DC terpisah dan 7 saklar untuk menghasilkan 7 level tegangan pada keluaran inverter. Struktur ini sangat sederhana dan mudah dikembangkan. Untuk menjadikan tegangan keluaran inverter 15 level, maka memerlukan 11 saklar. Struktur ini dapat menghemat penggunaan saklar sampai lebih dari 60 % untuk keluaran inverter 15 level dibandingkan inverter jembatan – H bertingkat. Struktur kedua menggunakan tiga sumber DC dengan perbandingan 1:2:4 dan 10 saklar untuk menghasilkan tegangan 15 level. Teknik modulasi yang dibangun diuji menggunakan Matlab / Simulink. Teknik modulasi sangat sederhana dan dengan mudah dapat direalisasikan menggunakan Mikrokontroler murah sekelas *Arduio*.

Pustaka

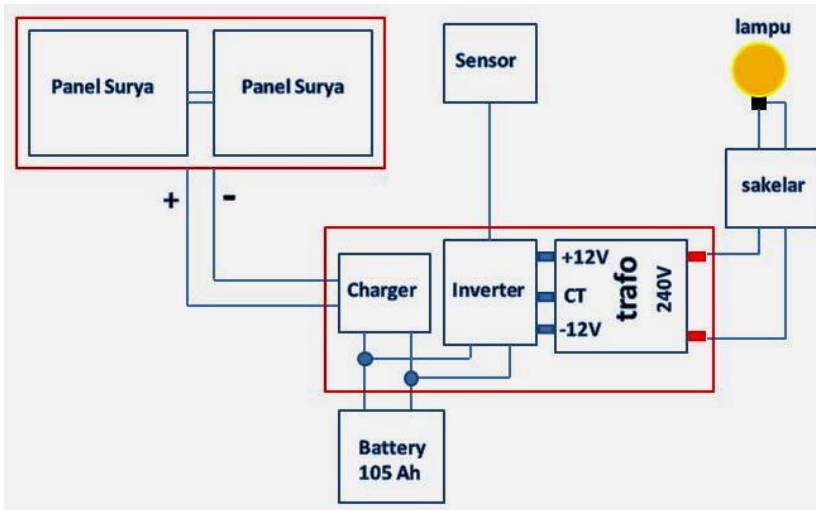
- I. B. F. Citarsa, I. N. W. Satiawan, Supriono, A New Modulation Technique for A Three-Cell Single-Phase CHB Inverter with Un-Equal DC-Link Voltage for Improving Output Voltage Quality, International Conference on The 2nd Applied Electromagnetic Technology Proceeding, 2018.

BAB VIII

VERIFIKASI TEKNIK MODULASI DENGAN SIMULASI DAN REALISASI HARDWARE

8.1 Desain teknik modulasi dan perbaikan struktur inverter 1-phase jembatan-H

Diagram skematik sistem PLTS diperlihatkan pada Gambar 8.1. dapat dilihat bahwa panel surya (*solar cells*) merubah energi foton (cahaya matahari) menjadi energi listrik DC. Tegangan DC keluaran panel surya lalu disimpan pada baterai kemudian di-inversi menjadi tegangan AC oleh inverter. Karena beban pada umumnya memerlukan tegangan AC sekitar 220-230 V rms maka tegangan keluaran inverter biasanya dinaikkan dengan menggunakan transformator. Alternatif lain, tegangan sel surya / tegangan baterai dapat dinaikkan terlebih dulu menggunakan DC-DC converter / *boost converter* sehingga tegangan keluaran inverter langsung dapat dipergunakan oleh beban tanpa perlu dinaikkan oleh transformator.



Gambar 8.1 Skema Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS)

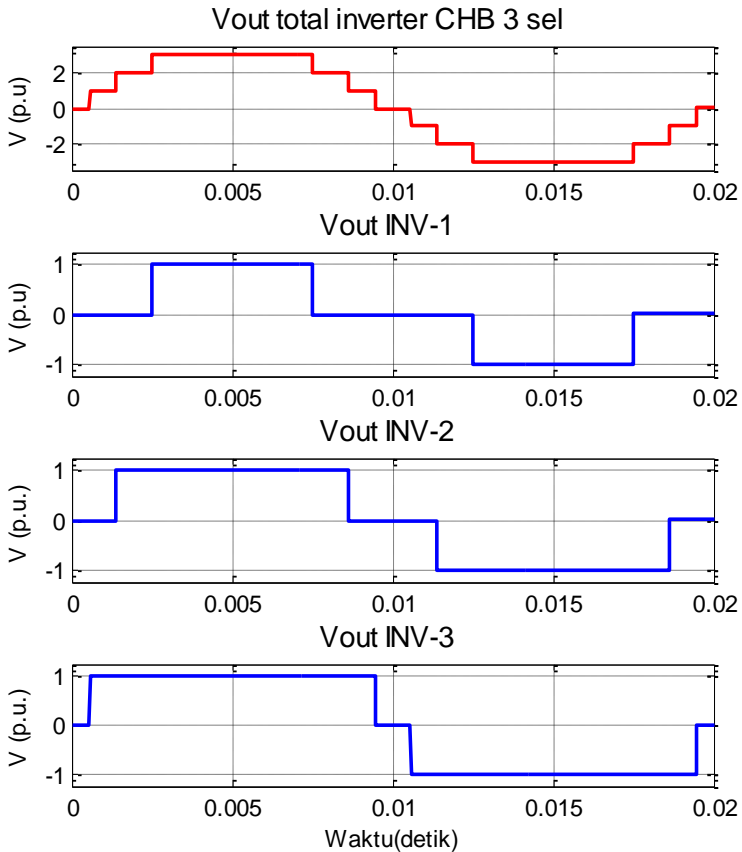
Seperti terlihat pada Gambar 8.1 peranan inverter pada sebuah PLTS sangat vital. Pada umumnya keluaran inverter berupa tegangan gelombang kotak, atau gelombang tangga (*staircase*) yang masih mengandung komponen harmonisa yang cukup tinggi. Kualitas tegangan keluaran inverter yang rendah berpengaruh pada efisiensi dan keandalan PLTS. Nilai harmonisa yang tinggi dapat membahayakan peralatan pada sistem PLTS itu sendiri (seperti transformator, filter bahkan baterai) dan juga, dalam jangka panjang dapat mempercepat kerusakan peralatan listrik yang dilayan. Simulasi dan realisasi inverter ini ditekankan pada upaya memperbaiki kualitas tegangan keluaran inverter yang diindikasikan dengan bentuk gelombang keluaran yang semakin mendekati sinusoidal, berkurangnya nilai komponen harmonisa rendah dan menurunnya nilai THD sampai memenuhi nilai yang dipersyaratkan oleh standar internasional. Simulasi dan realisasi inverter menyangkut perbaikan teknik modulasi pada inverter 1-phase dengan 3 sel inverter jembatan-H dan modifikasi struktur inverter seperti diuraikan sebagai berikut.

Simulasi dan realisasi inverter menitikberatkan pada investigasi teknik modulasi inverter 1-phase jembatan-H bertingkat (CHB) dengan 3 sel inverter (menggunakan 12 saklar). Struktur inverter CHB 3 sel dengan 12 saklar dapat dilihat pada Gambar 8.2. Teknik modulasi yang paling sederhana adalah menggunakan metode konduksi 180° dimana setiap saklar dibuat konduksi (ON) pada setengah siklus positif dan dis-konduksi (OFF) pada setengah siklus berikutnya. Dengan menggeser fase sudut penyalaan lengan inverter “a” dan lengan inverter “b” pada setiap sel inverter maka akan dihasilkan bentuk tegangan keluaran yang berbeda seperti terlihat pada Gambar 8.2 baris ke 2 sampai baris ke-4. Sedangkan tegangan keluar inverter CHB diperlihatkan pada Gambar 8.2 baris paling atas. Jika masing-masing inverter menggunakan tegangan DC-link terpisah sebesar 1 p.u.c. maka tegangan keluar inverter akan tersusun oleh 7 level tegangan DC yakni $\{-1, -2, -3, 0, +3, +2, +1\}$ p.u.

Tegangan keluaran inverter CHB 3 sel, 12 saklar masih mengandung komponen harmonisa rendah dan THD yang cukup tinggi (sekitar 15 -20%). Jumlah level tegangan pada tegangan keluaran inverter CHB dapat diperbanyak dengan memvariasikan perbandingan tegangan DC-link misalnya 1 : 2 : 4 atau 1: 3: 9. Pada perbandingan tegangan DC-link 1 : 2 : 4, jika setiap sel inverter dapat menghasilkan masing-masing 3 level tegangan yakni $\{+1, 0, -1\}$ p.u, $\{+2, 0, -2\}$ p.u, $\{+4, 0, -4\}$ p.u, maka hasil total tegangan yang dihasilkan pada keluaran inverter merupakan kombinasi dari tegangan individual inverter tersebut yang berjumlah 15 level yakni $\{\pm 7, \pm 6, \pm 5, \pm 4, \pm 3, \pm 2, \pm 1, 0\}$ p.u.

Sedangkan pada perbandingan tegangan DC-link 1 : 3 : 9, jika setiap sel inverter dapat menghasilkan masing-masing 3 level tegangan yakni $\{+1, 0, -1\}$ p.u, $\{+3, 0, -3\}$ p.u, $\{+9, 0, -9\}$ p.u., maka hasil total tegangan yang dihasilkan pada tegangan keluaran inverter merupakan kombinasi dari tegangan individual inverter tersebut yang berjumlah 27 level yakni $\{\pm 13, \pm 12, \pm 11, \pm 10, \pm 9, \pm 8,$

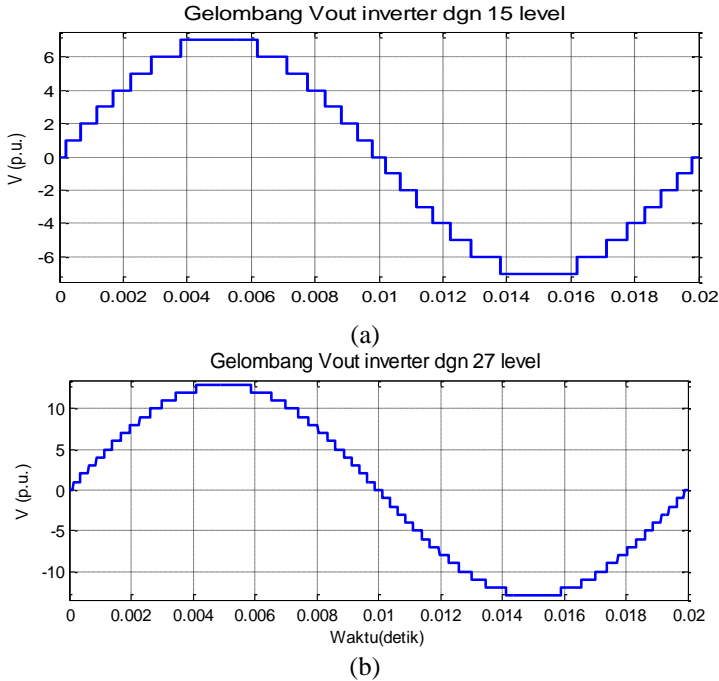
$\pm 7, \pm 6, \pm 5, \pm 4, \pm 3, \pm 2, \pm 1, 0$ p.u. Perkiraan bentuk tegangan yang dihasilkan inverter untuk kedua variasi kombinasi tegangan DC-link 1 : 2 : 4 dan 1 : 3 : 9 diperlihatkan masing-masing pada Gambar 8.3.a dan Gambar 8.3 b.



Gambar 8.2 Tegangan keluar masing-masing sel inverter bertingkat 7 level dan tegangan keluar total (paling atas)

8.2 Langkah-langkah Simulasi dan realisasi inverter

Langkah pertama pada Simulasi dan realisasi inverter bertingkat ini adalah mendefinisikan bentuk pulsa / sinyal modulasi yang sesuai untuk dapat menghasilkan bentuk gelombang tegangan keluaran seperti yang diinginkan. Sinyal modulasi dibentuk dengan merekonstruksi nilai tegangan DC yang diinginkan pada tegangan keluaran inverter dengan operasi masing-masing sel inverter. Misalnya, untuk perbandingan tegangan DC-link 1 : 3 : 9, untuk menghasilkan nilai level tegangan $5 V_{dc}$ maka inverter 1 beroperasi dimodulasikan untuk menghasilkan tegangan $-1V_{dc}$, inverter 2 dimodulasika untuk menghaiikan tegangan $-2 V_{dc}$ dan inverter 3 dimodulasikan untuk menghasilkan tegangan $+ 9V_{dc}$ ($-1 + (-2) +9 = +5$). Demikian juga untuk level-level tegangan yang lain diperoleh dengan cara yang sama.



Gambar 8.3 Hasil Simulasi gelombang tegangan keluar inverter bertingkat (a) tegangan 15 level (b) tegangan 27 level

Selanjutnya, untuk menghilangkan harmonisa rendah, teknik modulasi akan dikoreksi dengan menerapkan metode *selective harmonics elimination* (SHE). Metode SHE dilakukan dengan cara menyelesaikan persamaan persamaan simultan untuk menentukan sudut penyalaan saklar-saklar inverter sehingga bentuk tegangan keluaran menjadi terkoreksi. Dari bentuk tegangan keluar yang terkoreksi kemudian dapat ditentukan sinyal modulasi untuk struktur inverter diperbaiki. Secara teori, untuk tegangan keluaran dengan jumlah level 15 maka harmonisa orde 3, 5, 7, 9, 11, 13 dapat dieliminasi sehingga komponen harmonisa baru muncul pada harmonic ke 15 (frekwensi 750) sedangkah untuk inverter dengan level tegangan keluaran 27 maka komponen harmonisa sampai dengan

ke 25 atau harmonisa sampai pada frekwensi 1750 Hz bisa dihilangkan.

Setelah itu, teknik modulasi diverifikasi dengan menggunakan program MATLAB. Jika sinyal modulasi sudah terkonfirmasi baik, maka Simulasi dan realisasi inverter inverter dilanjutkan dengan perakitan inverter, pembangunan sinyal modulasi menggunakan Arduino dan menyelidki performa inverter secara menyeluruh.

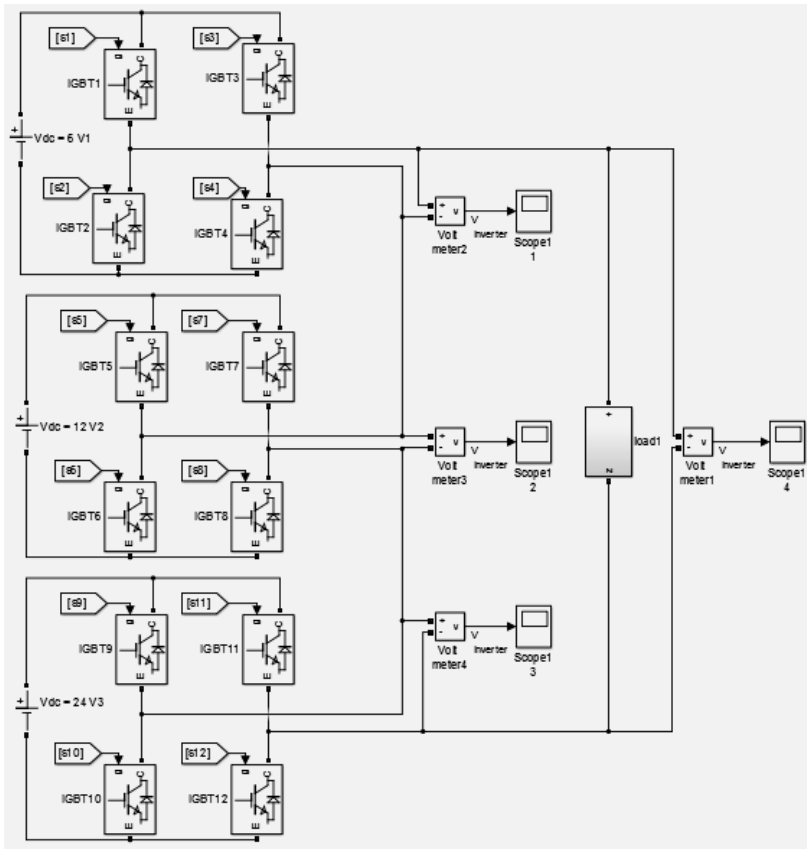
8.3 Hasil Pemodelan inverter bertingkat

Untuk mendapatkan informasi permulaan terhadap kinerja peralatan konversi daya (inverter) maka langkah pertama yang dilakukan dalam Simulasi dan realisasi inverter ini adalah membuat pemodelan dari paket-paket inverter daya yang disusun secara bertingkat (*cascade*) untuk dapat menghasilkan tegangan keluaran dengan kualitas yang lebih baik. Pemodelan dilakukan dengan menggunakan *Sim-power Blokset* yang terdapat pada MATLAB. Dengan menggunakan fasilitas yang ada pada *Sim-power Blokset*, memungkinkan dilakukan pemodelan inverter yang sangat mendekati dengan kenyataan karena berbagai komponen elektronika seperti saklar-saklar elektronika daya (IGBT, Power MOSFET, Thyristor, dll) dan komponen elektronika lainnya seperti Dioda, Kapasitor, resisitor sudah tersedia di library *Sim-power Blokset* tersebut dengan parameter-parameter yang dapat diatur sesuai dengan rating dan kapasitas komponen yang ada dipasaran.

Struktur dari inverter multilevel *cascaded H-bridge* dapat tersusun dari 2 atau lebih inverter H-bridge. Inverter ini dapat disuplai oleh satu atau lebih sumber DC. Hasil pemodelan inverter ini menggunakan *Sim-power Blokset* yang terdapat pada MATLAB ditampilkan pada Gambar 8.4. Inverter tipe ini tersusun dari 3 sel inverter H-bridge sehingga memerlukan 12 saklar daya elektronis. Teknik modulasi yang paling sederhana adalah menggunakan metode konduksi 180° dimana

setiap saklar dibuat konduksi (ON) pada setengah siklus positif dan dis-konduksi (OFF) pada setengah siklus berikutnya. Jika masing-masing inverter menggunakan tegangan DC link simetris terpisah sebesar $1 V_{dc}$. maka tegangan keluar inverter akan tersusun oleh 7 level tegangan DC yakni $\{-1, -2, -3, 0, +3, +2, +1\}V_{dc}$.

Tegangan keluaran inverter CHB 3 sel, 12 saklar masih mengandung komponen harmonisa rendah dan THD yang cukup tinggi (sekitar 15 -20%). Jumlah level tegangan pada tegangan keluaran inverter CHB dapat diperbanyak dengan memvariasikan perbandingan tegangan DC-link misalnya 1 : 2 : 4 atau 1: 3: 9. Pada perbandingan tegangan DC-link 1 : 2 : 4, jika setiap sel inverter dapat menghasilkan masing-masing 3 level tegangan yakni $\{+1, 0, -1\}V_{dc}$, $\{+2, 0, -2\} V_{dc}$, $\{+4, 0, -4\} V_{dc}$ maka hasil total tegangan yang dihasilkan pada keluaran inverter merupakan kombinasi dari tegangan individual inverter tersebut yang



Gambar 8.4. Inverter bertingkat (Cascaded) dengan 3 sel inverter jembatan-H

berjumlah 15 level yakni $\{ \pm 7, \pm 6, \pm 5, \pm 4, \pm 3, \pm 2, \pm 1, 0 \} V_{dc}$. Sedangkan pada perbandingan tegangan DC-link 1 : 3 :9, jika setiap sel inverter dapat menghasilkan masing-masing 3 level tegangan yakni $\{ +1, 0, -1 \} V_{dc}$, $\{ +3, 0, -3 \} V_{dc}$, $\{ +9, 0, -9 \} V_{dc}$ maka hasil total tegangan yang dihasilkan pada tegangan keluar inverter merupakan kombinasi dari tegangan individual inverter tersebut yang berjumlah 27 level yakni $\{ \pm 13, \pm 12, \pm 11, \pm 10, \pm 9, \pm 8, \pm 7, \pm 6, \pm 5, \pm 4, \pm 3, \pm 2, \pm 1, 0 \} V_{dc}$.

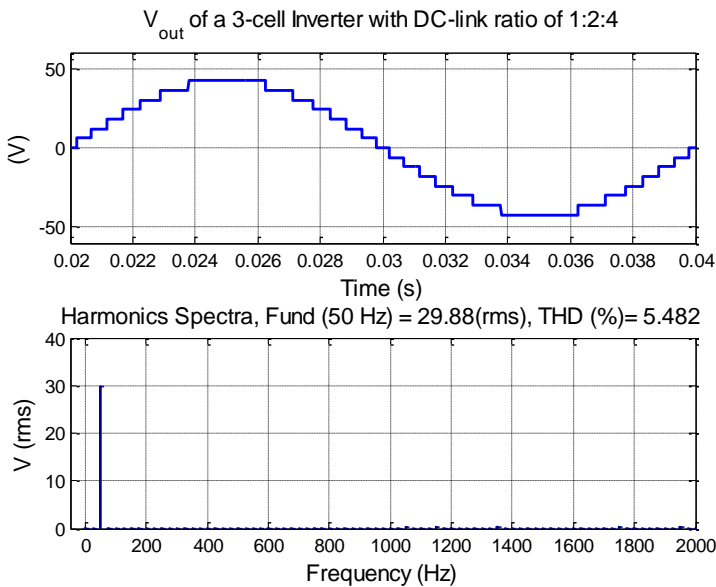
8.4 Bentuk pulsa saklar-saklar inverter Cascaded H-Bridge 3 sel

Hasil pemodelan inverter dengan menggunakan perangkat lunak *Sim-Power Blockset* dari Matlab dan teknik-teknik modulasi di atas selanjutnya diuji menggunakan simulasi computer. Untuk pulsa-pulsa PWM dari teknik-teknik modulasi di atas, dibangkitkan menggunakan perangkat lunak *Simulink* juga dari Matlab. Dalam simulasi ini, efek dead-time dari saklar inverter diabaikan. Frekuensi pensaklaran dari inverter beroperasi dalam mode PWM digunakan 1 kHz. Nilai Total Harmonic Distortion (THD) dihitung berdasarkan persamaan (2) dimana harmonisa orde rendah dapat mencapai 100.000 Hz (sampai harmonic ke 2000).

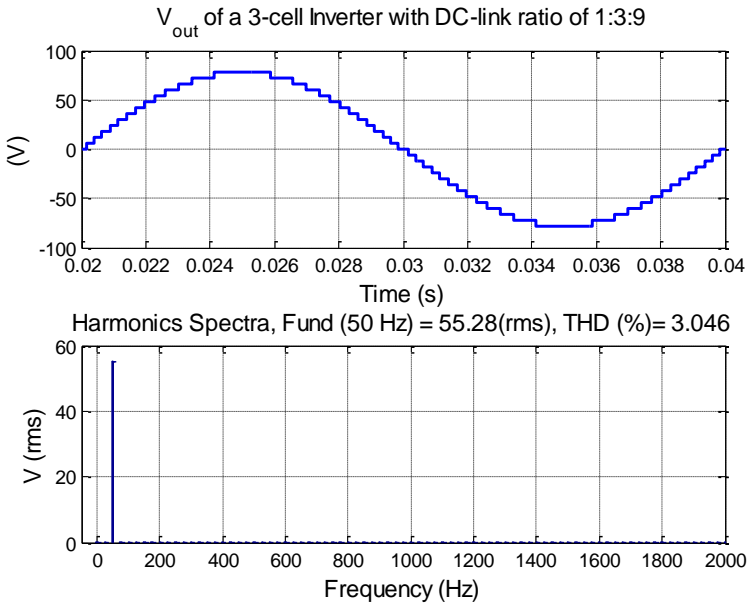
Langkah pertama adalah mendefinisikan bentuk pulsa / sinyal modulasi yang sesuai untuk dapat menghasilkan bentuk gelombang tegangan keluaran seperti yang diinginkan. Sinyal modulasi dibentuk dengan merekonstruksi nilai tegangan DC yang diinginkan pada tegangan keluaran inverter dengan operasi masing-masing sel inverter. Misalnya, untuk perbandingan tegangan DC-link 1 : 3 : 9, untuk menghasilkan nilai level tegangan $5 V_{dc}$ maka inverter 1 beroperasi dimodulasikan untuk menghasilkan tegangan $-1V_{dc}$, inverter 2 dimodulasikan untuk menghasilkan tegangan $-2 V_{dc}$ dan inverter 3 dimodulasikan untuk menghasilkan tegangan $+ 9V_{dc}$ ($-1 + (-2) + 9 = +5$). Demikian juga untuk level-level tegangan yang lain diperoleh dengan cara yang sama.

Gambar 8.5 dan 8.6 memperlihatkan tegangan keluaran inverter hasil simulasi menggunakan *SimPower Blokset* / *Simulnk* untuk masing rasio tegangan DC-link. Kualitas tegangan keluaran diproses menggunakan Matlab untuk memperlihatkan kandungan harmonisanya. Simulasi menggunakan tegangan DC-link pada masing-masing sel yakni 6 V, 12 V dan 24 V untuk rasio 1:2:4 dan 6 V, 18 V dan 54 V untuk rasio 1: 3: 9. Dari Gambar 8.6 terlihat tegangan keluaran disusun oleh

lima belas level tegangan DC yakni $\{ 0, \pm 6, \pm 12, \pm 18, \pm 24, \pm 30, \pm 36, \pm 42 \}$ V. Spektrum harmonisa mengandung komponen fundamental sebesar 29.88 V rms (42,26 peak) dengan THD 5.428%. Sedangkan Gambar 8.7 memperlihatkan tegangan keluaran inverter disusun oleh 27 level tegangan DC yakni $\{0, \pm 6, \pm 12, \pm 18, \pm 24, \pm 30, \pm 36, \pm 42, \pm 48, \pm 54, \pm 60, \pm 66, \pm 72, \pm 78 \}$ V. Spektrum harmonisa mengandung komponen fundamental sebesar 52,88 V rms (78,18 peak) dengan THD 3,048 %.



Gambar 8.5. Tegangan keluaran inverter bertingkat 3 sel dengan rasio DC-link 1:2:4



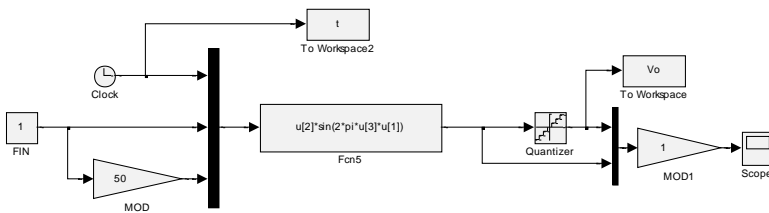
Gambar 8.6. Tegangan keluaran inverter bertingkat dengan rasio DC-link 1:3:9

8.5 Pembangkitan pulsa / sudut penyalaan saklar-saklar inverter CHB 3 sel

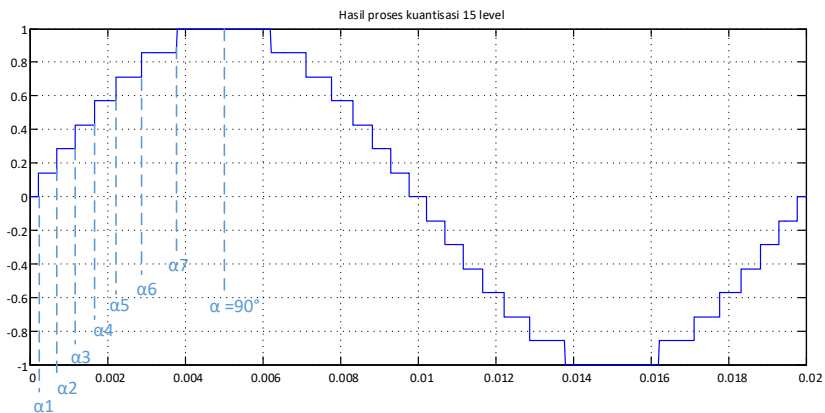
8.5.1 Hasil simulasi

Langkah pertama yang dilakukan untuk mendapatkan bentuk pulsa / sinyal PWM untuk masing-masing saklar pada tiap sel inverter adalah dengan cara mengkuantisasi sinyal sinusoidal menjadi beberapa bagian yang dikehendaki dengan menggunakan blok Quantizer pada *Simulink*. Proses kuantisasi adalah proses membagi / mencacah sinyal sinusoidal dalam komponen-komponen DC yang paling mendekati berdasarkan nilai terdekatnya. Selanjutnya dari proses kuantisasi dapat ditentukan sudut penyalaan inverter yang mana sangat diperlukan dalam pembuatan program / coding untuk mikrokontroler / Arduino. Gambar 8.7 memperlihatkan proses kuantisasi dimana blok

Quantizer pada Simulink dirangkai dengan sinyal sinusoidal. Hasil kuantisasi 15 level diperlihatkan pada Gambar 8.8 dan dari Gambar tersebut dapat ditentukan besarnya sudut penyalan keduabelas saklar inverter.



Gambar 8.7 Simulink blok kuantisasi gelombang sinus menjadi 15 tegangan DC



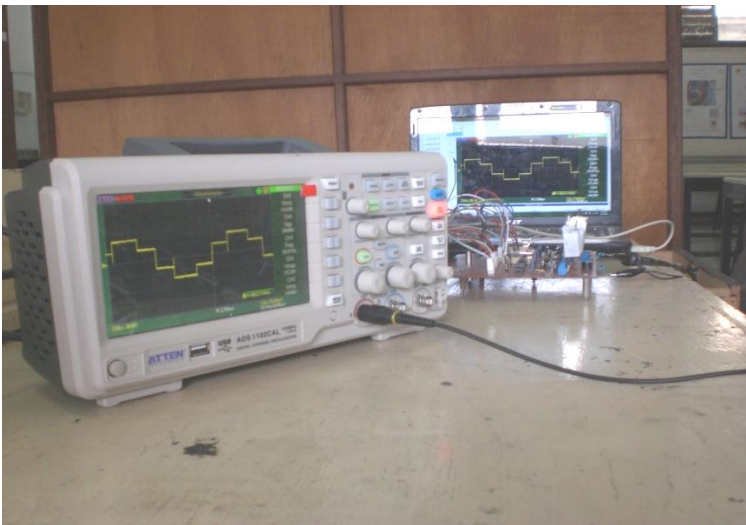
Gambar 8.8. Hasil kuantisasi tegangan sinusoidal menjadi 15 level

Selanjutnya untuk dapat menghasilkan pulsa PWM yang dikehendaki maka ketiga sel inverter harus dioperasikan untuk menghasilkan level tegangan tertentu dengan kombinasi keluaran setiap sel inverter. Atau dengan kata lain, sinyal PWM dibentuk dengan merekonstruksi nilai tegangan DC yang diinginkan pada tegangan keluaran inverter dengan operasi masing-masing sel inverter. Misalnya, untuk perbandingan

tegangan DC-link 1 : 2 : 4, untuk menghasilkan nilai level tegangan $5 V_{dc}$ maka inverter 1 beroperasi untuk menghasilkan tegangan $+ 1V_{dc}$, inverter 2 beroperasi untuk menghasilkan tegangan $0 V_{dc}$ dan inverter 3 dimodulasikan untuk menghasilkan tegangan $+ 4 V_{dc}$ ($+1 + (0) +4 = +5$). Demikian juga untuk level-level tegangan yang lain diperoleh dengan cara yang sama.

8.5.2 Realisasi hardware dan software.

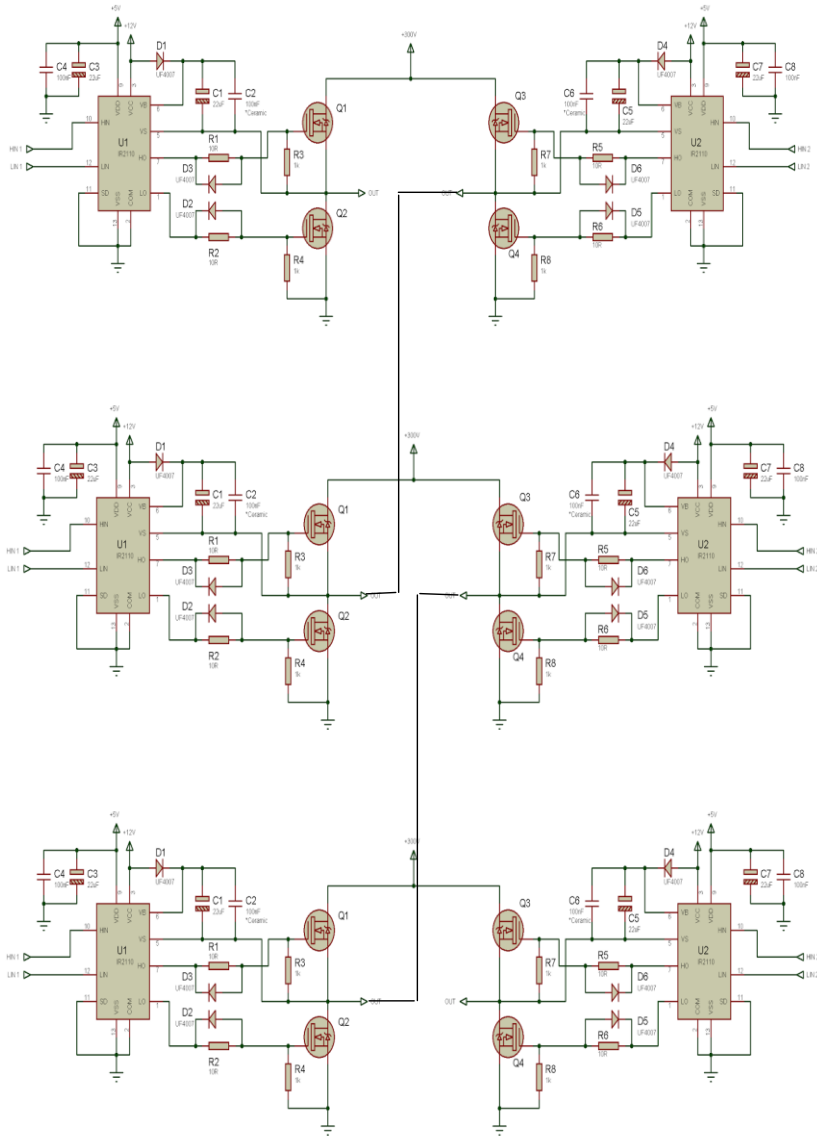
Realisasi hardware meliputi pembuatan rangkaian inverter jembatan dan peralatan pendukungnya seperti driver mosfet dan catu daya. Sedangkan realisasi software berkaitan dengan upaya untuk menghasilkan sinyal PWM sebagai pulsa pengendali inverter dengan menggunakan Mikrokontroler (Arduino Mega). Rangkaian skematik inverter dan driver diperlihatkan pada Gambar 8.10 dan direalisasikan menggunakan komponen yang tersedia dipasar lokal. Sistem inverter yang telah dirakit selanjutnya diuji kemampuan dan keluarannya melalui tahap pengujian inverter dengan rangkaian pengujian sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 8.9.



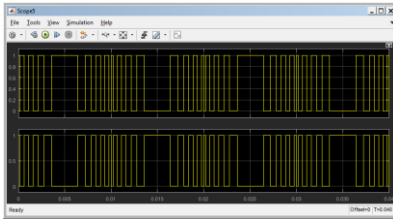
Gambar 8.9 Rangkaian pengujian inverter secara keseluruhan

8.5.3 Realisasi Pembangkitan Pulsa Inverter Untuk Rasio DC-Link 1:2:4

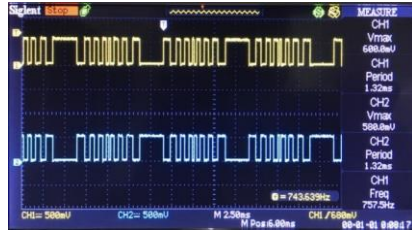
Gambar 8.11 sampai 8.16 memperlihatkan hasil rekaman bentuk sinyal PWM dari masing-masing saklar pemicu dari saklar S_1 sampai dengan S_{12} inverter yang dihasilkan oleh simulasi dan Mikrokontroler yang diukur menggunakan *Oscilloscope*. Berdasarkan perbandingan bentuk sinyal PWM yang dihasilkan melalui simulasi dan Mikrokontroler untuk semua saklar terlihat bahwa hasil keluaran mikrokontroler sudah sangat mendekati dengan hasil simulasi. Hal ini menunjukkan bahwa pembangkitan sinyal telah berhasil direalisasikan.



Gambar 8.10. Rangkaian skematik inverter jembatan-H bertingkat tiga- sel

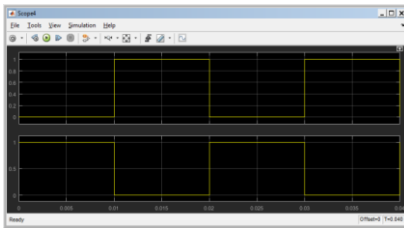


(a) Hasil Simulasi

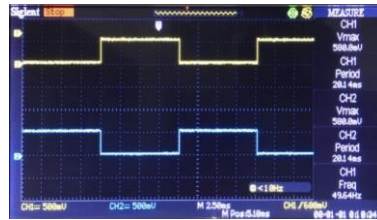


(b) Hasil Keluaran Mikrokontroler

Gambar 8.11. Hasil realisasi sinyal PWM inverter bertingkat rasio DC-link 1: 2: 4 untuk saklar S_1 (atas) dan S_2 (bawah)

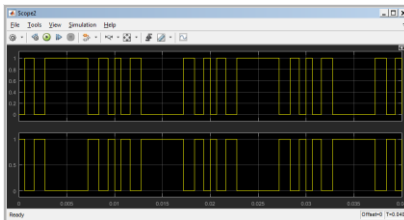


(a) Hasil Simulasi

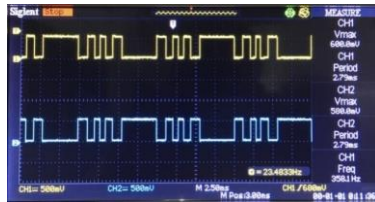


(b) Hasil Keluaran Mikrokontroler

Gambar 8.12. Hasil realisasi sinyal PWM inverter bertingkat rasio DC-link 1: 2: 4 untuk saklar S_3 (atas) dan S_4 (bawah)

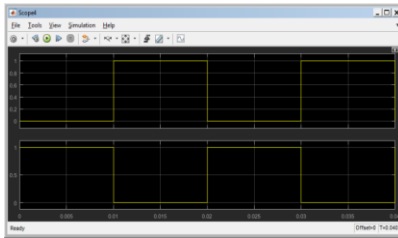


(a) Hasil Simulasi



(b) Hasil Keluaran Mikrokontroler

Gambar 8.13. Hasil realisasi sinyal PWM inverter bertingkat rasio DC-link 1: 2: 4 untuk saklar S_5 (atas) dan S_6 (bawah)

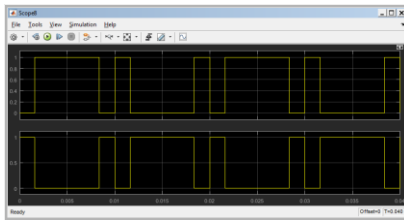


(a) Hasil Simulasi



(b) Hasil Keluaran Mikrokontroler

Gambar 8.14. Hasil realisasi sinyal PWM inverter bertingkat rasio DC-link 1: 2: 4 untuk saklar S_7 (atas) dan S_8 (bawah)

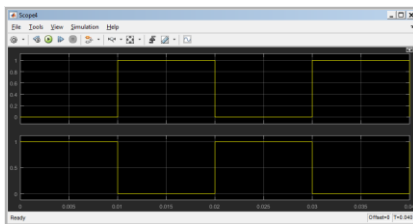


(a) Hasil Simulasi



(b) Hasil Keluaran Mikrokontroler

Gambar 8.15. Hasil realisasi sinyal PWM inverter bertingkat rasio DC-link 1: 2: 4 untuk saklar S_9 (atas) dan S_{10} (bawah)



(a) Hasil Simulasi

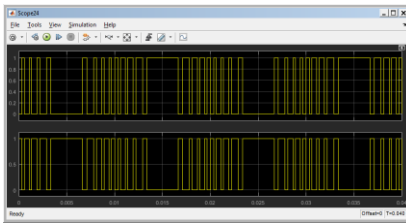


(b) Hasil Keluaran Mikrokontroler

Gambar 8.16. Hasil realisasi sinyal PWM inverter bertingkat rasio DC-link 1: 2: 4 untuk saklar S_{11} (atas) dan S_{12} (bawah)

8.5.4 Realisasi Pembangkitan Pulsa Inverter Untuk Rasio DC-Link 1:3:9

Gambar 8.17 sampai 8.22 menunjukkan hasil simulasi dan hasil rekaman sinyal PWM untuk masing-masing saklar pemacu dari saklar S_1 sampai dengan S_{12} inverter yang dihasilkan yang diukur menggunakan *Oscilloscope* pada perbandingan DC-link 1:3:9.. Berdasarkan perbandingan bentuk gelombang keluaran inverter dengan hasil simulasi bentuk pulsa dari masing-masing saklar pemacu dari saklar S_1 sampai dengan S_{12} dapat dilihat bahwa antara hasil simulasi computer dengan keluaran inverter (realisasi) memiliki tingkat kesamaan bentuk pulsa yang tinggi. Hal ini menunjukkan bahwa inverter yang dirakit telah menghasilkan keluaran sebagaimana yang diharapkan.

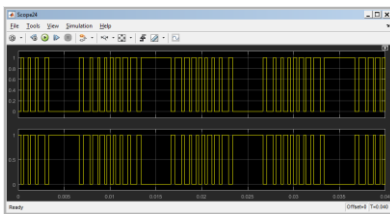


(a) Hasil Simulasi

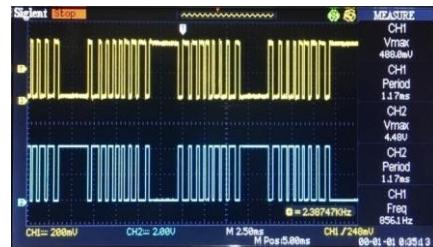


(b) Hasil Keluaran Mikrokontroler

Gambar 8.17. Hasil realisasi sinyal PWM inverter bertingkat rasio DC-link 1: 3: 9 untuk saklar S_1 (atas) dan S_2 (bawah)

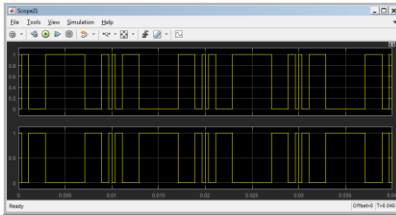


(c) Hasil Simulasi

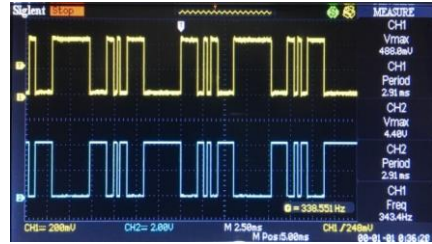


(d) Hasil Keluaran Mikrokontroler

Gambar 8.18. Hasil realisasi sinyal PWM inverter bertingkat rasio DC-link 1: 3: 9 untuk saklar S_3 (atas) dan S_4 (bawah)

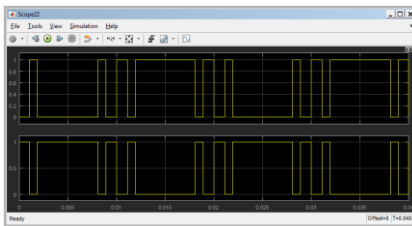


(e) Hasil Simulasi



(f) Hasil Keluaran Mikrokontroler

Gambar 8.19. Hasil realisasi sinyal PWM inverter bertingkat rasio DC-link 1: 3: 9 untuk saklar S_5 (atas) dan S_6 (bawah)

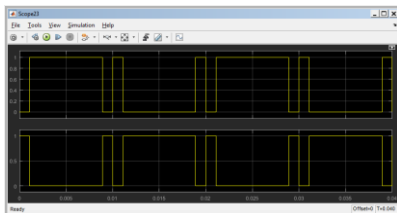


(g) Hasil Simulasi

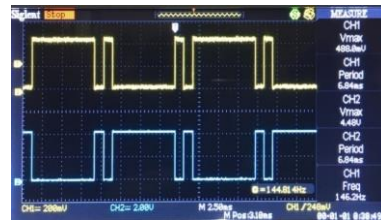


(h) Hasil Keluaran Mikrokontroler

Gambar 8.20. Hasil realisasi sinyal PWM inverter bertingkat rasio DC-link 1: 3: 9 untuk saklar S_7 (atas) dan S_8 (bawah)

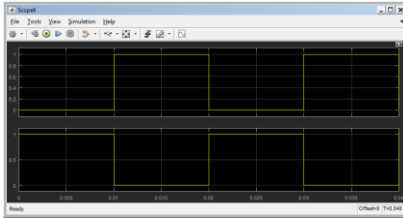


(i) Hasil Simulasi

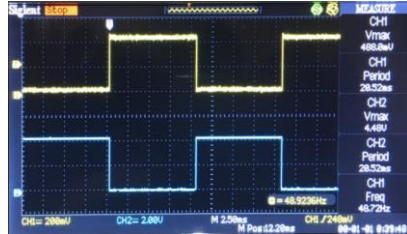


(j) Hasil Keluaran Mikrokontroler

Gambar 8.21 Hasil realisasi sinyal PWM inverter bertingkat rasio DC-link 1: 3: 9 untuk saklar S_9 (atas) dan S_{10} (bawah)



(k) Hasil Simulasi



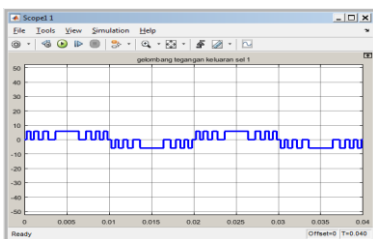
(l) Hasil Keluaran Mikrokontroler

Gambar 8.22 Hasil realisasi sinyal PWM inverter bertingkat rasio DC-link 1: 3: 9 untuk saklar S_{11} (atas) dan S_{12} (bawah)

8.6 Tegangan keluaran inverter *Cascaded H-Bridge* 3 sel

8.6.1 Tegangan Keluaran untuk Perbandingan DC-link 1:2:4

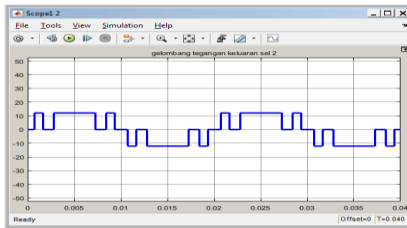
Untuk memverifikasi hasil keluaran inverter, maka bentuk tegangan yang dihasilkan oleh tiap-tiap sel direkam dan dibandingkan dengan hasil simulasi seperti diperlihatkan pada Gambar 8.23.



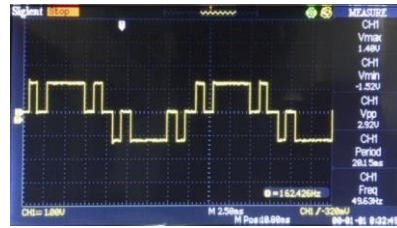
(a) Sel 1 - Simulasi



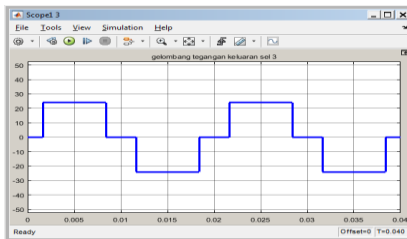
(b) Sel 1 – Experiment



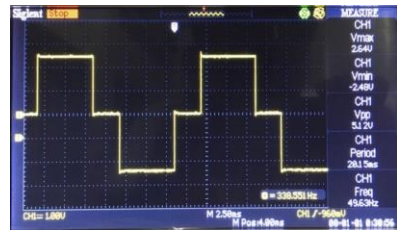
(c) Sel 2 - Simulasi



(d) Sel 2-Experiment



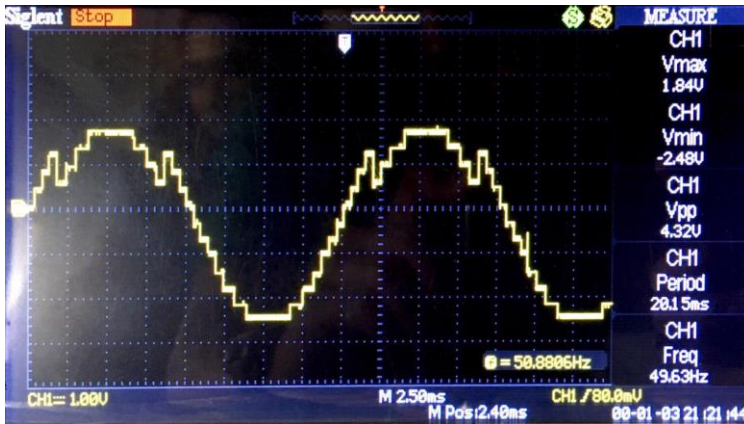
(e) Sel 3 - Simulasi



(f) Sel 3 - Experiment

Gambar 8.23. Hasil realisasi tegangan keluaran untuk masing-masing sel 1, sel 2 dan sel 3 inverter bertingkat rasio DC-link 1: 2: 4 .

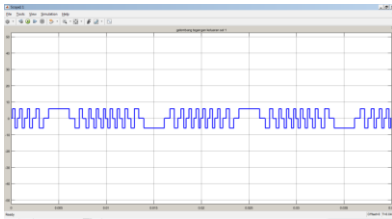
Gambar 8.23 (a)-(f) memperlihatkan hasil rekaman bentuk gelombang tegangan keluaran sel 1 sampai sel 3 dari inverter CHB 3 sel yang diukur menggunakan *Oscilloscope*. Berdasarkan perbandingan bentuk gelombang tegangan keluaran inverter dengan hasil simulasi dari sel 1 sampai dengan sel 3 dapat dilihat bahwa antara hasil simulasi computer dengan keluaran inverter (realisasi) memiliki kesamaan bentuk gelombang tegangan keluaran. Hal ini semakin menunjukkan bahwa inverter yang dirakit telah menghasilkan keluaran sebagaimana yang diharapkan. Selanjutnya, tegangan keluaran inverter total diperlihatkan pada Gambar 8.24.



Gambar 8.24 Realisasi tegangan keluar inverter bertingkat 3 sel dengan rasio DC-link 1:2:4

8.6.2 Tegangan Keluaran Untuk Perbandingan DC-Link 1:3:9

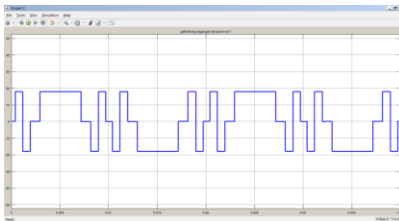
Tegangan keluaran inverter untuk perbandingan DC-link 1:3:9 pada masing-masing sel diperlihatkan pada Gambar 8.25. Terlihat dari perbandingan dengan hasil simulasi bahwa tegangan keluaran sudah sangat mendekati dan cenderung sama. Ini menandakan bahwa pengujian pada masing-masing sel telah menunjukkan hasil yang baik seperti yang diharapkan. Sedangkan hasil tegangan keluaran inverter keseluruhan masih terdistorsi cukup kuat, perbedaan tegangan DC link Masukan yang sangat besar cukup menyulitkan kerja dari rangkaian driver sehingga walaupun pulsa sudah sama dengan simulasi tetapi hasil tegangan keluar belum sempurna. Tegangan keluaran seharusnya menyerupai Gambar 8.7 yang mengandung 27 level tegangan.



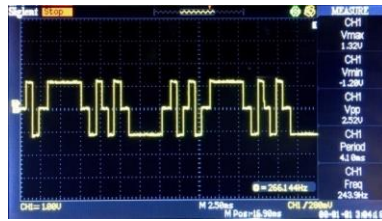
(a) Simulasi



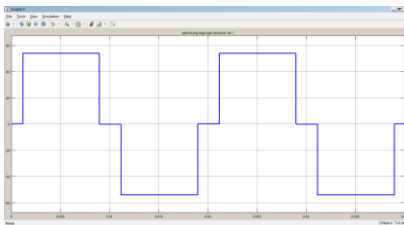
(b) Experiment



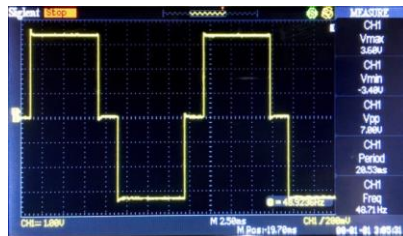
(c) Simulasi



(d) Experiment



(e) Simulasi



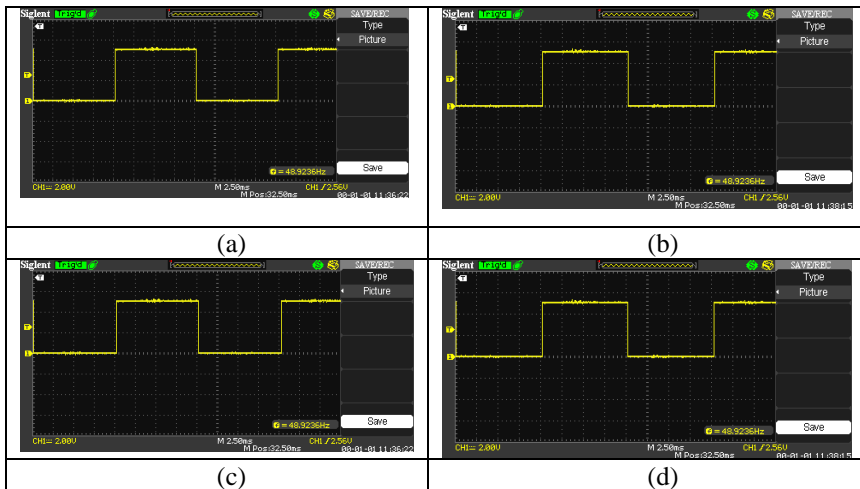
(f) Experiment

Gambar 8.25. Realisasi tegangan keluar setiap sel inverter bertingkat 3-sel untuk rasio DC-link 1:3:9

8.6.3 Realisasi perbaikan struktur inverter jembatan-H

Inverter jembatan-H yang dimodifikasi seperti dijelaskan pada Bab 7 (Gambar 7.2) direalisasikan dengan menggunakan saklar IGBT FGL40N120 Type N untuk inverter Jembatan sedangkan untuk tiga saklar pada inverter pembantu menggunakan MOSFET

IRFP460 Type N. Pulsa PWM direalisasikan menggunakan Arduino Uno. Pulsa untuk saklar pada inverter Utama (inverter jembatan-H) yang berisi 4 saklar diperlihatkan pada Gambar 8.26. Sedangkan pulsa PWM untuk ketiga saklar dari inverter pembantu diperlihatkan pada Gambar 2.27. Hasil realisasi tegangan keluar inverter yang berupa tegangan tangga 7 level diperlihatkan pada Gambar 2.28



Gambar 8.26. Realisasi Pulsa PWM perbaikan inverter jembatan-H untuk saklar (a) S_1 , (b) S_2 , (c) S_3 , (d) S_4

Dari realisasi pulsa PWM terlihat bahwa hasil hardware sudah mendekati sama dengan hasil simulasi pada seperti dijelaskan pada Bab 7. Demikian juga tegangan keluaran mengandung 7 level tegangan sudah sangat mendekati dengan hasil yang diharapkan.

8.7 Analisa Hasil Yang Dicapai

Berdasarkan hasil yang telah dipresentasikan pada Sub-bab 8.6 dapat dinyatakan bahwa teknik modulasi atau metode pembangkitan sinyal PWM untuk semua saklar-saklar inverter telah dapat direalisasikan dengan baik dan bentuk pulsa sesuai dengan yang diinginkan terbukti dari bentuk pulsa sesuai dengan hasil simulasi menggunakan MATLAB / Simulink. Pada perbandingan DC-link 1 : 2 : 4, terlihat pula bahwa kecepatan pulsa PWM sangat beragam untuk ketiga sel. Sel inverter 1 dengan tegangan DC-link 1 V_{dc} beroperasi 15 kali lebih cepat dengan dari saklar-saklar pada sel inverter 3, sedangkan saklar-saklar pada sel inverter 2 beroperasi 7 kali lebih cepat dari saklar-saklar pada sel inverter 3. Sel inverter 3 beroperasi dengan komutasi minimal dimana sekali ON dan sekali OFF dalam satu periode / frekwensi fundamental (50 Hz). Selah satu konsekwensi dari kecepatan operasi saklar yang berbeda adalah umur hidup saklar-saklar pada sel 1 menjadi lebih pendek dibandingkan saklar-saklar pada 2 sel yang lain. Namun demikian hal ini dapat diatasi dengan menggunakan jenis saklar yang berbeda atau saklar dengan spesifikasi kemampuan switching yang berbeda.

Pada perbandingan tegangan DC-link 1 : 2 : 4, inverter CHB 3 sel di atas telah berhasil menghasilkan nilai level tegangan 15 V_{dc} dengan inverter 1 dimodulasikan untuk menghasilkan tegangan $\{-1, 0, +1\}V_{dc}$, inverter 2 dimodulasikan untuk menghasilkan tegangan $\{-2, 0, +2\} V_{dc}$ dan inverter 3 dimodulasikan untuk menghasilkan tegangan $\{-4, 0, +4\}V_{dc}$. Kombinasi dari semua variasi tegangan yang dihasilkan oleh ketiga

sel inverter menjadi $\{\pm 7, \pm 6, \pm 5, \pm 4, \pm 3, \pm 2, \pm 1, 0\} V_{dc}$. Namun demikian, bentuk tegangan terutama pada bagian setengah siklus positif terdapat ketidak sempurnaan bentuk gelombang. Hal ini disebabkan karena adanya permasalahan pada hardware dimana sepasang saklar pada salah satu sel tidak berfungsi dengan baik. Beberapa upaya untuk mengatasi masalah tersebut telah dilakukan diantaranya, membangkitkan sinyal PWM dengan menggunakan Arduino Support package dengan Matlab 2013, menggantikan komponen dengan IGBT dengan rating yang lebih tinggi. Namun perbaikan significant belum diperoleh.

Sedangkan untuk perbandingan DC-link 1:3:9, pulsa PWM sudah berhasil dibangkitkan dengan baik. Namun terdapat kendala yang sangat berarti yakni perbandingan DC-link yang sangat timpang terutama antara inverter sel1 dan sel 3 sangat menyulitkan dalam realisasinya. Misalnya, jika sel 1 inverter jembatan dicatu dengan aki 6 Volt DC, maka sel 3 harus dicatu dengan tegangan 54 Volt DC. Hal ini tentu sangat berpotensi untuk mempengaruhi performa tegangan keluaran inverter dimana diperlukan rating inverter yang jauh lebih tinggi lagi. Disamping itu, diperlukan koordinasi kerja di setiap sel yang sangat presisi sepanjang waktu. Jika terjadi kesalahan pembangkitan pulsa sedikit saja akan dapat merusak bentuk keluaran dengan sangat signifikan. Demikian juga untuk inverter jembatan termodifikasi, hasil yang diperoleh baik pulsa untuk masing-masing saklar semikonduktor yang digunakan maupun tegangan keluar dari inverter sudah sesuai dengan simulasi menggunakan Matlab / Simulink. Hal ini berarti teknik modulasi yang digambarkan pada Bab – Bab sebelumnya sangat memungkinkan untuk direalisasikan bahkan dengan menggunakan Mikrokontroler murah sekelas Arduino.

8.8 Penutup

Pada perbandingan tegangan DC-link 1 : 2 : 4, inverter CHB 3 sel telah berhasil menghasilkan nilai level tegangan $15 V_{dc}$ dengan inverter 1 dimodulasikan untuk menghasilkan tegangan $\{-1, 0, +1\}V_{dc}$, inverter 2 dimodulasikan untuk menghasilkan tegangan $\{-2, 0, +2\}V_{dc}$ dan inverter 3 dimodulasikan untuk menghasilkan tegangan $\{-4, 0, +4\}V_{dc}$. Kombinasi dari semua variasi tegangan yang dihasilkan oleh ketiga sel inverter menjadi $\{\pm 7, \pm 6, \pm 5, \pm 4, \pm 3, \pm 2, \pm 1, 0\} V_{dc}$. Sedangkan untuk perbandingan DC-link 1:3:9, pulsa PWM sudah berhasil dibangkitkan dengan baik. Demikian juga untuk realisasi inverter jembatan-H termodifikasi, menunjukkan hasil yang sangat memuaskan dimana tegangan keluaran 7 level dapat direalisasikan hanya dengan menggunakan 7 saklar saja.

Pustaka

- I. B. F. Citarsa, I. N. W. Satiawan, Supriono, A New Modulation Technique for A Three-Cell Single-Phase CHB Inverter with Un-Equal DC-Link Voltage for Improving Output Voltage Quality, International Conference on The 2nd Applied Electromagnetic Technology Proceeding, 2018.

DAFTAR PUSTAKA

- A.K.A. Khan, D.B. Amir, M.F. Athar, U. Nasir, Electrical System (Motor Control) Of A Series HEV, National University of Sciences and Technology (NUST), Islamabad, Pakistan
- Armi, F., Manai, L., Besbes, M., 2016, Newton Raphson algorithm for Selective Harmonic Elimination in Asymmetrical CHB Multilevel Inverter using FPGA, Procs. Of Engineering and Technology (PET), pp. 887 - 894
- I.B.F. Citarsa, I.N.W. Satiawan, I.K. Wiryajati, Comparison Analysis of Phase-Shifted and Level-Shifted Carrier-Based PWM on the Five-Level Single-Phase Cascaded H-Bridge (CHB) Multilevel Inverter, International Conference on EECCIS 2016 Proceeding, 2016
- I. B. F. Citarsa, I. N. W. Satiawan, I. K. Wiryajati, Supriono, Performance Analysis Of Cascaded H-Bridge Multilevel Inverter Using Mixed Switching Frequency With Various Dc-Link Voltages, *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* 105 012003, 2016
- I. B. F. Citarsa, I. N. W. Satiawan, Supriono, A New Modulation Technique for A Three-Cell Single-Phase CHB Inverter with Un-Equal DC-Link Voltage for Improving Output Voltage Quality, International Conference on The 2nd Applied Electromagnetic Technology Proceeding, 2018.

J. Doucet, D. Eggleston, J. Shaw, DC/AC Pure Sine wave
Inverter, Worcester Polytechnic Institute, UK.