

Kinerja Metode Carrier Based Sinusoidal PWM Inverter 3-tingkat untuk Pengaturan Kecepatan Motor Induksi 3-phase

Decky Ardhyadwipa Janustanto¹, I Nyoman Wahyu Satiawan², I Made Budi Sukmadana³
Jurusan Teknik Elektro, Universitas Mataram,
Jalan Majapahit 62 Mataram - NTB
deckyoliv04@gmail.com¹, nwahyus@unram.ac.id², mdbudisuk@unram.ac.id³

Abstrak

Paper ini membandingkan kinerja metoda Carrier Based Sinusoidal PWM (Sin-PWM) inverter 3-tingkat untuk pengaturan kecepatan motor induksi 3-phase. Inverter 3-tingkat dengan tipe Dioda Clamped / NPC inverter dan pembangkit pulsa PWM dimodelkan dengan menggunakan Matlab/Simulink. Hasil simulasi menunjukkan THD tegangan keluaran dan THD arus stator ketika sistem yang dikontrol dengan metoda In-Phase Disposition Sin-PWM (PD Sin-PWM) menunjukkan nilai yang paling rendah dibandingkan dengan sistem yang dikontrol dengan metoda Phase Opposition Disposition Sin-PWM dan inverter 2-tingkat pada semua rentang kecepatan. Pada indeks modulasi yang lebih rendah dari 0.85 THD arus stator yang dicatu oleh inverter dengan metoda POD CB-PWM menunjukkan nilai yang paling buruk dibandingkan dengan metoda yang lain. Selain itu, ditemukan juga bahwa nilai rata-rata riak torsi pada motor yang dikontrol dengan metoda PD Sin-PWM paling kecil dibandingkan dengan riak torsi motor yang dikontrol dengan POD Sin-PWM dan inverter 2-tingkat. Nilai riak torsi bersesuaian dengan kualitas dari tegangan dan arus.

Kata Kunci -- Inverter 3-Tingkat, Carrier Based Sinusoidal PWM, THD Tegangan, THD Arus, riak torsi

Abstract

This paper compares the performance of the Carrier Based Sinusoidal PWM (Sin-PWM) 3-level inverter for regulating the speed of a 3-phase induction motor. The 3-Level Inverter with Diode Clamped / NPC type and PWM pulses are modeled using Matlab/Simulink. The simulation results show that the THD of output voltage and stator current shows the lowest values when the system controlled using the In-Phase Disposition Sin-PWM (PD Sin-PWM) method compared to the Phase Opposition Disposition (POD Sin-PWM) method and 2-level inverter at all speed ranges. At a modulation index lower than 0.85 THD of the stator current when using the POD Sin-PWM method shows the worst value compared to other methods. Apart from that, it is also found that the average value of torque ripple on motors that controlled using the PD Sin-PWM method is the smallest compared to the torque ripple on motors controlled with POD Sin-PWM and 2-level inverter. The torque ripple value is in-line with to the quality of the voltage and current.

Keywords -- 3-Phase Inverter, Carrier Based Sinusoidal PWM, Voltage THD, Current THD, torque ripple.

I. PENDAHULUAN

Teknologi kendaraan dengan penggerak motor (*Electric Vehicles*) terus berkembang dan saat ini telah menjadi pesaing yang potensial dari kendaraan berbahan bakar fosil (*combustion engines*). Terdapat dua pilihan motor yang digunakan pada motor listrik yakni motor DC dan motor AC dimana keduanya memiliki keunggulan dan kelemahan masing-masing. Kecepatan motor DC lebih mudah diatur tetapi motor AC mampu memberikan daya yang lebih besar dibanding motor DC, tetapi sistem pengaturan kecepatan motor AC lebih kompleks [1]. Jika kendaraan listrik menggunakan motor AC (motor induksi atau motor sinkron) maka sistem pengaturan kecepatan membutuhkan inverter yang berfungsi merubah tegangan DC (baterai) menjadi tegangan AC dengan frekuensi *variable* yang diperlukan oleh motor supaya dapat berputar dengan kecepatan *variable*. Hubungan frekuensi dan kecepatan motor diatur dengan persamaan (1).

$$n = \frac{120f}{p} \dots\dots\dots(1)$$

Dimana, n adalah putaran motor dalam rpm, f adalah frekuensi tegangan masukan (Hz) dan P adalah jumlah pasang kutub dari rotor.

Untuk menghasilkan tegangan keluaran dengan frekuensi variabel maka saklar-saklar inverter perlu diatur dengan menggunakan metoda PWM. Beberapa teknik modulasi inverter 3-phase yang banyak digunakan diantaranya metoda konduksi 180°, metoda *Space Vector PWM* (SVPWM) dan metoda Sinusoidal PWM (Sin-PWM). [2]

Metoda SVPWM dan metoda Sin-PWM memiliki perbedaan pendekatan yang sangat mendasar. Metoda Sin-PWM membangkitkan pulsa PWM dengan membandingkan sinyal referensi dengan sinyal segitiga frekuensi tinggi (*carrier*) sedangkan metoda SVPWM membentuk pulsa PWM menggunakan tegangan *space vector* yang dipilih menurut posisi dari sinyal referensi pada setiap sektor. Kemudian waktu

aplikasi tegangan vector dihitung dengan prinsip *volt-time balance*. Selanjutnya pulsa PWM disusun berdasarkan tegangan *space vector* yang dipilih dan lama waktu aplikasi untuk setiap *sector* sehingga terbentuk pulsa PWM untuk satu siklus operasi [3]. Metoda SVPWM memiliki keunggulan pada kompatibilitinya dengan sistem digital, tetapi prosedur pembangkitan pulsanya lebih kompleks jika dibandingkan metoda Sin-PWM. [4]

Berdasarkan posisi dari sinyal *carrier*-nya, metoda Sin-PWM untuk inverter bertingkat dapat dikelompokkan menjadi metoda pergeseran phase (*phase shifted PWM*) dan metoda pergeseran tingkat (*Level shifted PWM*). Metoda *Level Shifted PWM* dikelompokkan menjadi *In-Phase Disposition PWM (PD-PWM)*, *Phase Opposition Distribution PWM (POD-PWM)* dan *Alternative Phase Opposition Distribution PWM (APOD-PWM)*. [5]

Inverter 2-tingkat bekerja mengkonversi tegangan DC menjadi tegangan AC dengan menggunakan 2-tingkat tegangan positif dan negatif. Inverter 3-tingkat bekerja dengan mengkonversi tegangan DC menjadi AC dengan 3-tingkat tegangan positif, nol dan negatif seperti terlihat pada Tabel 1 dan Tabel 2. Gambar 1, dan 2 memperlihatkan skema inverter 3-phase 2-tingkat dan inverter 3-tingkat (NPC). Terlihat pada Gambar 1, Inverter 2-tingkat memakai 6 buah saklar sedangkan inverter 3-tingkat menggunakan 12 buah saklar yang disusun sedemikian rupa dimana setiap lengan (phase) berisi 4 saklar elektronika. [6]

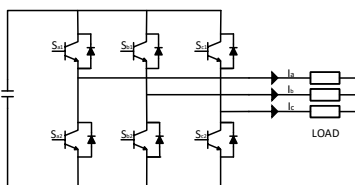
Paper ini membahas analisis kinerja 3-tingkat untuk memacu motor induksi 3-phase. Ada dua metoda yang dibandingkan yakni PD Sin-WM dan POD Sin-PWM. Metoda APOD tidak bisa diterapkam pada inverter 3-tingkat karena hanya terdapat 2 sinyal *carrier*. Analisa meliputi THD tegangan, THD arus stator dan riak torsi.

TABEL I
PRINSIP INVERTER 2-TINGKAT

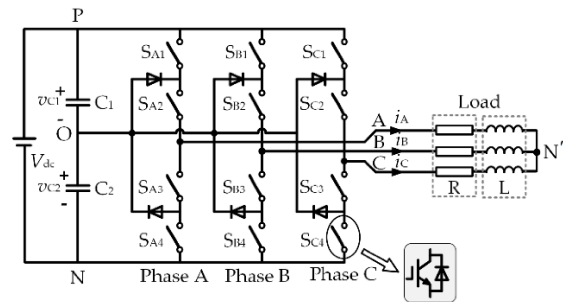
V_{AB}	Output Pole Voltage (V_{AO})	Switch States	
		S_{a1}	S_{a2}
$-V_{dc}$	0	1	0
V_{dc}	V_{dc}	0	1

TABEL II
PRINSIP INVERTER 3-TINGKAT [7]

V_{AB}	Output Pole Voltage (V_{AO})	Switch States			
		S_{A1}	S_{A2}	S_{A3}	S_{A4}
$-V_{dc}/2$	0	0	0	1	1
0	$V_{dc}/2$	0	1	1	0
$V_{dc}/2$	V_{dc}	1	1	0	0



Gbr 1. Inverter 2-tingkat, 3-phase



Gbr 2. Inverter 3-tingkat 3-phase [8]

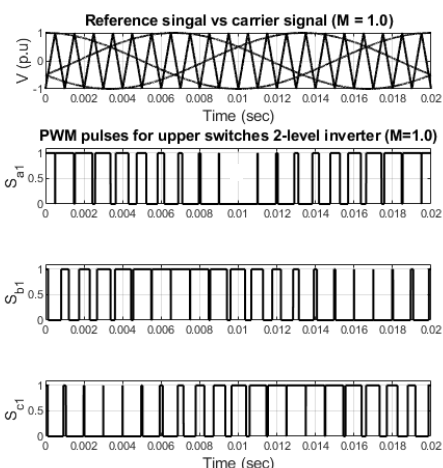
II. METHODA PWM

Metoda PWM yang digunakan untuk mengatur saklar-saklar inverter adalah metoda *Carrier Based Sinusoidal PWM (Sin-PWM)*. Metoda sin-PWM membentuk pulsa dengan membandingkan sinyal *carrier* yang berupa sinyal segitiga (*triangular*) dengan sinyal referensi (gelombang Sinusoidal). Pulsa PWM dibangkitkan dengan logika sederhana. Jika sinyal referensi lebih besar dari sinyal *carrier* maka nilai pulsanya adalah *high* (1) dan sebaliknya jika sinyal referensi lebih kecil atau sama dengan dari sinyal *carrier* maka nilai pulsa adalah *low* (0). Gambar 3 memperlihatkan pembangkitan pulsa PWM inverter 2-tingkat. Dengan menggunakan label saklar seperti pada Gambar 1 dapat dilihat bahwa perbandingan sinyal referensi 3-phase dengan sinyal *carrier* menghasilkan pulsa PWM untuk saklar bagian atas inverter (S_{a1} , S_{b1} dan S_{c1}). Sedangkan pulsa PWM untuk saklar bagian bawah (S_{a2} , S_{b2} dan S_{c2}) diperoleh dengan membalik pulsa PWM saklar-saklar bagian atas [9].

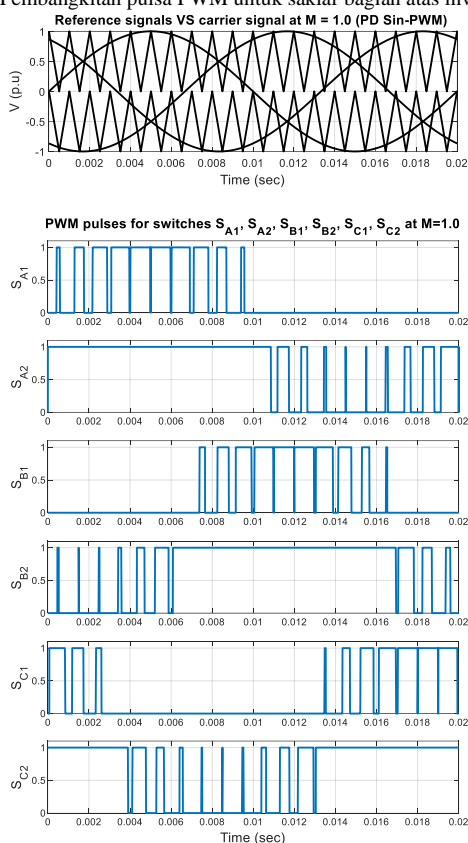
Selanjutnya, pembangkitan pulsa PWM inverter 3-tingkat dengan metoda PD Sin-PWM diperlihatkan pada Gambar 4. Dengan menggunakan label saklar pada Gambar 2 dapat dilihat bentuk pulsa PWM untuk 6 saklar bagian atas yakni S_{A1} , S_{B1} , S_{C1} , S_{A2} , S_{B2} dan S_{C2} , yang diperoleh dengan membandingkan sinyal referensi dengan 2 buah sinyal *carrier*. Sedangkan pulsa PWM untuk saklar S_{A3} , S_{B3} , S_{C3} , diperoleh dengan membalik pulsa S_{A1} , S_{B1} , S_{C1} , dan pulsa PWM untuk saklar S_{A4} , S_{B4} , S_{C4} , diperoleh dengan membalik pulsa S_{A2} , S_{B2} , S_{C2} .

Pembangkitan pulsa PWM inverter 3-tingkat dengan metoda POD Sin-PWM menerapkan cara yang hampir sama dengan metoda PD Sin-PWM hanya berbeda pada phase dari dua sinyal *carrier* yang digunakan seperti terlihat pada Gambar 5.

Total *Harmonic Distortion* atau biasa disingkat THD didefinisikan sebagai rasio perbandingan antara nilai komponen harmonisa dengan nilai komponen fundamental. THD menyatakan besarnya distorsi atau deviasi suatu gelombang yang mengandung komponen harmonisa. THD dinyatakan dalam persen. THD tegangan dan arus dihitung dengan persamaan (2) dan (3). [10]



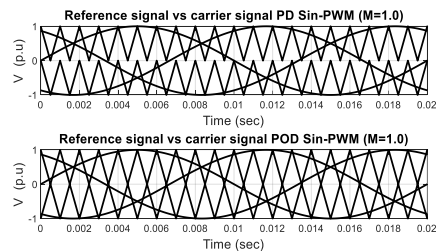
Gbr 3. Pembangkitan pulsa PWM untuk saklar bagian atas inverter 2- tingkat



Gbr 4. pembangkitan pulsa PWM untuk saklar S_{A1} , S_{A2} , S_{B1} , S_{B2} , S_{C1} , S_{C2} pada inverter 3-tingkat menggunakan PD- Sin-PWM

$$THD_v = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} v_h^2}}{V_1} \dots\dots\dots(2)$$

$$THD_I = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} I_h^2}}{I_1} \dots\dots\dots(3)$$



Gbr 5. Proses pembangkitan pulsa PWM inverter 3-tingkat menggunakan PD Sin-PWM (atas) dan POD Sin-PWM (bawah)

dengan v_h adalah nilai tegangan harmonisa ke- h , v_1 adalah nilai tegangan fundamental, I_h adalah nilai arus harmonisa ke- h , dan I_1 adalah nilai arus fundamental.

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

Metode PWM diverifikasi dengan menggunakan Matlab/Simulink. Saklar-saklar dan komponen lain yang digunakan pada rangkaian Inverter dimodelkan dengan menggunakan Simscape. Pulsa PWM di-set pada *switching* frekuensi 2000 Hz dan inverter dicatu tegangan DC-link sebesar 600 Volt. Pada modulasi indeks, $M = 1$ frekuensi sinyal referensi di-set pada 50 Hz. Tegangan keluaran inverter digunakan untuk mencatu motor induksi *3-phase* dengan spesifikasi seperti Tabel 3. Hasil berupa tegangan keluaran inverter, arus stator dan riak torsi untuk masing-masing metoda PMW ditampilkan dan analisa pada sub-seksi berikut.

TABEL III.

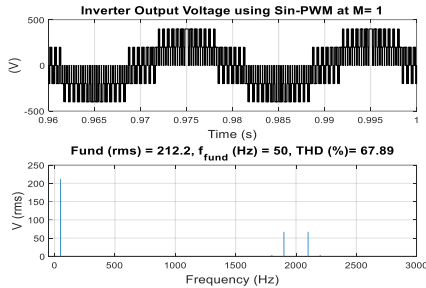
MOTOR PARAMETERS [11]

Parameter	Value	Dimention
Nominal Power	5 Hp/3730 VA	
No. of pair pole (P)	2	
Voltage input (VL-L) rms	460 V	Volt
Frequency input (f)	60 Hz	Hz
Nominal rotor speed at maks. Frequency of 60 Hz	1750	rpm
Stator Resistance, R_s	1.115	Ohm
Rotor Resistance, R_r	1.083	Ohm
Stator Inductance, L_{ls}	0.005974	Hendri (H)
Rotor Inductance, L_{lr}	0.005974	Hendri (H)
Mutual Inductance, L_m	0.2037	Hendri (H)
Motor Inertia, (J)	0.02	J (kg.m ²)
Friction factor	0.00575	F (N.m.s)
Torque Load (Maks)	20	N-m

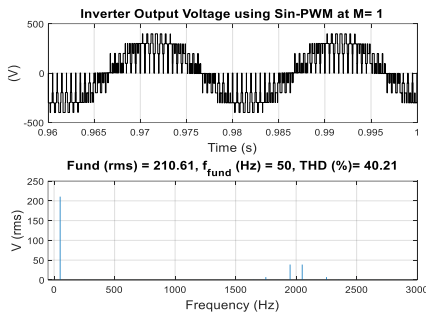
A. Analisis Tegangan Keluaran Inverter

Gambar 6 memperlihatkan tegangan keluaran inverter dengan metoda Sin-PWM pada $M=1$ untuk masing-masing inverter 2-tingkat dan 3-tingkat. Pada Gambar 6 (a) terlihat bahwa dari bentuk gelombang tegangan keluaran, inverter 2-tingkat dibentuk dari 5 level tegangan DC yakni $\{-1/3, -2/3, 0, 1/3, 2/3\} \times v_{dc}$, sedangkan tegangan keluar inverter 3-tingkat yang dikontrol dengan metoda POD Sin-PWM berisi 7 level tegangan (Gambar 6 (b)) dan yang dikontrol dengan metoda PD Sin-PWM memiliki 9 level tegangan (Gambar 6 (c)). Terlihat pada spectrum harmonisa, tegangan keluaran tidak mengandung harmonisa rendah. Metoda PWM yang

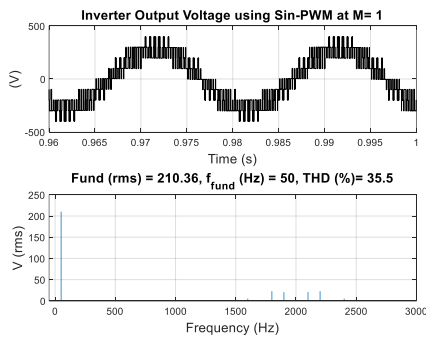
diterapkan berhasil menggeser harmonisa ke sekitar frekwensi switching (2000 Hz). Namun demikian, dari perhitungan THD terlihat, pada $M = 1$ THD tegangan untuk inverter 2-tingkat adalah 67.89% , sedangkan untuk inverter 3-tingkat adalah 40.21 % (POD Sin-PWM) dan 35.5 % (PD Sin-PWM). Kualitas tegangan yang dihasilkan berkaitan dengan jumlah level tegangan yang dihasilkan.



(a) Inverter 2-tingkat $M = 1.0$



(b) Inverter 3-level (POD-Sin-PWM) $M = 1.0$



(c) Inverter 3-level (PD-Sin-PWM) $M = 1.0$

Gbr. 6. Bentuk gelombang tegangan keluaran inverter (atas) dan spectrum harmonisa (bawah)

Simulasi diulang pada rentang $M = 0.1$ sampai 1.0 dengan pertambahan M sebesar 0.05. Hasil dirangkum dalam Tabel IV dan grafik perbandingan THD diperlihatkan pada Gambar 7. Pada Gambar 7 terlihat bahwa THD tegangan semakin besar dengan menurunnya indeks modulasi. Ini berarti, pada indeks modulasi yang semakin rendah kualitas tegangan yang dihasilkan juga semakin buruk. Dari ketiga metoda yang dianalisa terlihat inverter 3-tingkat dengan metoda PD Sin-PWM mampu menghasilkan tegangan dengan kualitas yang paling baik yang dibuktikan dengan nilai THD yang paling rendah dibandingkan dengan inverter 2-tingkat dan inverter 3-

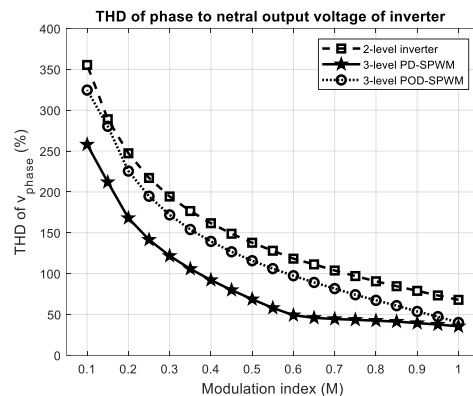
tingkat dengan metoda POD Sin-PWM untuk semua nilai indeks modulasi.

B. Analisis Performa Arus Stator

Tegangan keluaran inverter digunakan untuk mencatu motor induksi 3-phase. Arus *phase* stator untuk berbagai teknik modulasi khususnya pada $M=1.0$ ditunjukkan pada Gambar 8. Terlihat pada Gambar 8 bahwa pada M

TABEL IV
 THD TEGANGAN KELUARAN INVERTER

M	THD Tegangan		
	Inverter 2 tingkat	Inverter 3 tingkat POD PWM	Inverter 3 tingkat PD -PWM
1	67.88	40.21	35.5
0.95	73.28	47.34	37.67
0.9	78.89	53.66	39.46
0.85	84.58	60.76	41.25
0.8	90.58	67.45	42.38
0.75	97.07	74.17	43.45
0.7	103.9	81.68	44.47
0.65	111.3	89.16	45.86
0.6	119.5	97.51	49.11
0.55	128.2	106.2	57.99
0.5	138	115.8	68.64
0.45	149	126.6	79.88
0.4	161.7	139.6	92.13
0.35	176.5	154.2	105.8
0.3	194.5	171.8	121.7
0.25	217.3	194.7	141.5
0.2	248.6	226.1	168
0.15	290.9	280.1	212
0.1	358.5	323.8	258



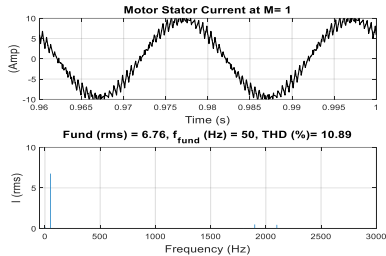
Gbr 7. Grafik Perbandingan THD Tegangan inverter 2-tingkat ,inverter 3-tingkat PD Sin-PWM dan inverter 3-tingkat POD Sin-PWM = 1.0 THD arus stator adalah 5.83%, 6.31% dan 10.89% untuk masing-masing inverter 3-tingkat dengan teknik modulasi PD Sin-PWM, inverter 3-tingkat dengan POD Sin-PWM dan inverter 2 – tingkat.

Hasil pengukuran THD arus stator untuk indeks modulasi 0.15 sampai 1.0 dirangkum pada Tabel V dan Gambar 9. Gambar 9 menunjukkan bahwa THD arus secara umum semakin besar untuk indeks modulasi yang semakin besar. Hal ini berbanding terbalik dengan THD tegangan keluaran inverter. Ini terjadi karena kualitas arus stator dipengaruhi oleh parameter motor. Ketika variable speed diterapkan, perubahan nilai tegangan input motor akan diikuti oleh perubahan

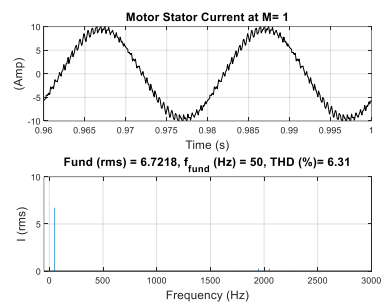
frekuensi tegangan. Jika frekuensi berubah maka nilai impedansi motor juga akan berubah. Pada indeks modulasi yang semakin rendah, nilai impedansi yang makin rendah dan menghasilkan nilai fundamental arus yang semakin tinggi dan THD menjadi semakin rendah. Pada Gambar 9 terlihat bahwa arus stator saat motor dicatu oleh inverter 3-tingkat yang

torsi saat kondisi steady state untuk inverter 3-tingkat dengan metoda PD Sin-PWM pada $M=1$ diperlihatkan pada pojok kanan Gambar 10.

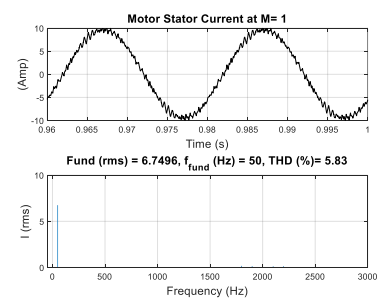
Nilai riak torsi untuk metoda PWM yang lain dicari dengan cara yang sama. dan dirangkum Nilai riak dari Torsi motor pada variasi indeks modulasi 0.2 - 1.0 diperlihatkan pada Tabel VI dan Gambar 11. Dari Gambar 11 dapat dilihat bahwa inverter 3-tingkat yang dikendalikan dengan metoda PD Sin-PWM menghasilkan torsi motor dengan riak yang paling kecil dibandingkan dengan yang dihasilkan dengan metoda POD Sin-PWM dan inverter 2-tingkat. Rata-rata riak torsi untuk motor yang dicatu oleh inverter dengan PD Sin-PWM adalah 3,6500 berbanding 8,0074 dan 9,300 untuk masing-masing inverter 2-tingkat dan inverter 3-tingkat POD Sin-PWM. Nilai riak torsi besesuaian dengan nilai THD arus, karena torsi motor adalah fungsi dari arus sesuai dengan persamaan (4).



(a) Inverter 2-tingkat $M = 1.0$



(b) Inverter 3-level (POD-SPWM) $M = 1.0$



(c) Inverter 3-level (PD-SPWM) $M = 1.0$

Gbr. 8 Bentuk gelombang arus stator untuk $M=1.0$

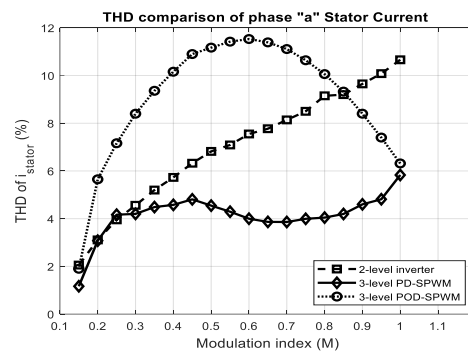
dikontrol dengan metoda PD Sin-PWM menghasilkan arus stator dengan THD yang paling rendah dibandingkan dengan inverter 2-tingkat dan inverter 3-tingkat dengan metoda POD Sin-PWM. Pada Gambar 9 juga terlihat THD arus saat motor dicatu oleh inverter dengan metoda POD Sin-PWM paling tinggi dibandingkan dengan motor yang dicatu oleh inverter dengan metoda lainnya terutama untuk $m \geq 0.85$.

C. Perbandingan Riak Torsi motor

Selanjutnya riak dari torsi motor diselidiki. Gambar 10 memperlihatkan grafik torsi-kecepatan untuk inverter 3-tingkat dengan metoda PD Sin-PWM untuk $M=0.85$. Dapat dilihat bahwa motor mencapai kecepatan 1500 rpm pada $t = 0.2$ detik dengan nilai rata-rata riak torsi pada saat system sudah *steady state* sebesar 4,0744 N/m. Gambar potongan

TABEL V
THD ARUS STATOR

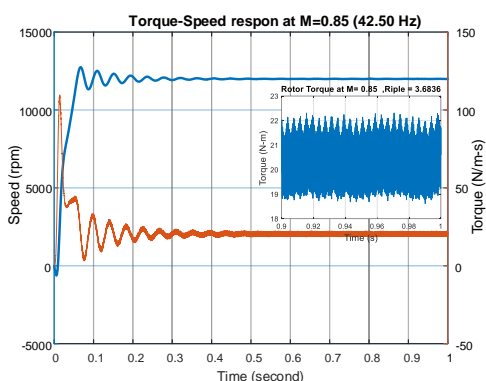
M	THD Arus stator		
	Inverter 2-tingkat	Inverter 3-tingkat PD PWM	Inverter 3 tingkat POD-PWM
1	10.66	5.83	6.315
0.95	10.08	4.814	7.4
0.9	9.65	4.6	8.4
0.85	9.2	4.197	9.325
0.8	9.15	4.045	10.06
0.75	8.5	3.994	10.64
0.7	8.14	3.86	11.11
0.65	7.77	3.865	11.39
0.6	7.55	3.998	11.53
0.55	7.09	4.292	11.42
0.5	6.82	4.547	11.17
0.45	6.324	4.81	10.9
0.4	5.73	4.578	10.16
0.35	5.2	4.486	9.36
0.3	4.56	4.2	8.4
0.25	3.95	4.167	7.162
0.2	3.11	3.077	5.65
0.15	2.055	1.166	1.9



Gbr 9. Arus THD Arus inverter 2-tingkat ,inverter 3-tingkat PD Sin-PWM dan inverter 3-tingkat POD Sin-PWM

$$T = \frac{5252 \times V \times I \times \cos\phi}{n} \dots \dots \dots (4)$$

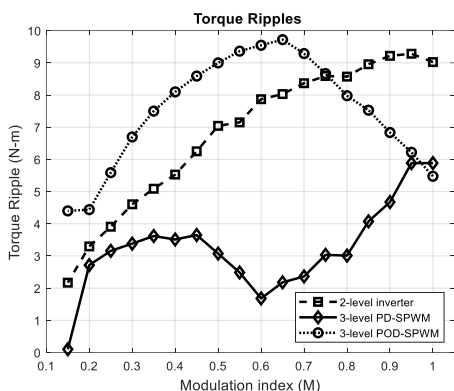
Dimana, T adalah Torsi motor (Nm), V tegangan masukan (Volt), I adalah arus stator (Ampere) dan n kecepatan putar motor (rpm).



Gbr 10. Hubungan Torsi dan kecepatan motor untuk $M=0.85$

TABEL VI
 NILAI RIAK DARI TORSI MOTOR PADA VARIASI INDEK MODULASI

M	Rotor Torque		
	Inverter 2 tingkat	Inverter 3 tingkat PD-PWM	Inverter 3 tingkat POD-PWM
1	9.3512	5.8847	5.5770
0.95	9.7929	5.8847	5.5770
0.9	9.7244	6.6740	7.2300
0.85	9.4478	4.0744	8.0790
0.8	9.0897	3.0110	8.0560
0.75	9.1159	3.0339	9.3745
0.7	9.1264	2.3633	9.4114
0.65	10.2754	2.1800	10.1740
0.6	15.4996	1.6800	10.7900
0.55	10.7179	2.4860	10.8220
0.5	8.5755	3.0730	9.1480
0.45	8.0074	3.6500	9.3000
0.4	6.3292	3.5110	8.1100
0.35	5.8215	3.6190	7.5700
0.3	5.3741	3.3830	6.7000
0.25	4.743	3.1590	5.7420
0.2	4.2249	2.7158	4.5920
0.15	3.6239	0.1013	0.63
0.1	2.9903	0.0450	0.0299



Gbr 11. Grafik Riak inverter 2-tingkat ,inverter 3-tingkat PD Sin-PWM dan inverter 3-tingkat POD Sin-PWM

IV. KESIMPULAN

Paper ini membahas kinerja inverter 3-tingkat yang digunakan untuk mengatur kecepatan motor induksi 3-phase.

Inverter dikontrol dengan metoda carrier based sinusoidal PWM (CB Sin-PWM) diantaranya metoda PD Sin-PWM dan POD Sin-PWM. Kinerja inverter dibandingkan dengan inverter 2-tingkat. Kualitas tegangan keluaran inverter semakin buruk pada indek modulasi yang semakin kecil, sebaliknya kualitas arus semakin baik dengan penurunan indeks modulasi. Kualitas arus dipengaruhi oleh besarnya nilai impedansi motor yang berubah dengan perubahan frekuensi tegangan keluar dari inverter. Hasil simulasi menunjukkan bahwa kualitas tegangan keluaran dan kualitas arus stator yang dihasilkan oleh inverter yang dikontrol dengan metoda PD Sin-PWM paling baik diindikasikan dengan nilai THD tegangan yang paling rendah dibandingkan dengan metoda POD Sin-PWM dan inverter 2-tingkat untuk semua rentang kecepatan. Pada indeks modulasi yang lebih rendah dari 0.85 THD arus stator yang dicatu oleh inverter dengan metoda POD Sin-PWM paling buruk dibandingkan dengan metoda yang lain. Selain itu, ditemukan juga bahwa nilai rata-rata riak torsi memperlihatkan torsi motor yang dikontrol dengan metoda PD Sin -PWM paling kecil dibandingkan dengan riak torsi motor yang dikontrol dengan POD Sin -PWM dan inverter 2-tingkat. Hasil ini bersesuaian dengan kualitas dari THD arus.

UCAPAN TERIMAKASIH

Ucapan terima kasih disampaikan kepada semua pihak yang mendukung sehingga paper ini bisa diselesaikan diantaranya tim penguji Tugas Akhir, pimpinan dan staf dari Jurusan Teknik Elektro Universitas Mataram.

REFERENSI

- [1] I. N. W. Satiawan, I. B. F. Citarsa, Supriono, "Perbandingan Kinerja Teknik Modulasi Inverter Dua-Level Untuk Pengaturan Kecepatan Motor Induksi Tiga-Fase", *Jurnal Arus Elektro Indonesia*, Vol. 1, No. 1, 2015.
- [2] Ratmaji, I. N. W.Satiawan, Supriono, "Perbandingan Teknik Modulasi Inverter 3-Phasa 2-Tingkat Untuk Menghasilkan Tegangan Keluaran Variabel", *Dielektrika*, Vol. 6, No. 1, 2019.
- [3] A. A. Kadum, " PWM Control Techniques For Three Phase Three Level Inverter Driver", *TELKOMNIKA Telecommunication, Computing, Electronics and Control*, Vol. 18, No.1,2020.
- [4] F. H. Sholidah, N. R. Hadiano, Mustaghfiri, "Desain dan Implementasi Inverter 3 Fasa Dengan Penambahan Push-Pull Converter", *Jurnal SIMETRIS*, Vol. 11 No.1,2020.
- [5] K. Shabarbana, C. Ismayil, P. Baburaj, H. Unails, "Three Phase Diode Clamped Three Level Inverter With Phase Disposition PWM", *ICSEE*, 2019.
- [6] R. Dharmaprakash, J. Henry, " Switching Table Based 2-Leve Inverter And 3-Level Diode Clamped Inverter", *Journal Of Theoretical and Aplied Information Technology*, Vol. 60, No. 2, 2014.
- [7] P.K. Chaturvedi, S. Jain, P. Agrawal, " A Study of Neutral Point Potential and Common Mode Voltage Control In Multilevel SPWM Technique", *IEEE National Power System Conference*, ITT Bombay, 2008.
- [8] G. Z. Yingjie su, Z. Zhou, Qianggeng,"A Carrier-Based Discontinuous PWM Strategy of NPC Three-Level Inverter for Common-Mode Voltage and Switching Loss Reduction" *Electronics*,2021.
- [9] A. Krismadinata, I. Husnaini, " Inverter Tiga Fasa Untuk Pembangkit Listrik Tenaga Surya", *Teknik Elektro Universitas Negeri Padang*,2017.

[10] I. W. Rinas, “Analisa THD (Total Harmonic Distortion) dan Peningkatan Arus pada Kawat Neutral Terhadap Pengoperasian Beban Listrik Pada Kondisi Takseimbang pada Sistem Tenaga Listrik”, *Karya Ilmiah*. Jimbaran-Bali.2016

[11] H. Haryanto, V. Immanuel, “Analisa Kinerja Sinusoidal Inverter Untuk Pengaturan Kecepatan Motor Induksi Tiga Fasa”, *Jurnal Teknik*, Vol. 12, No.1, 2016.

