



Investigasi Strategi PODPWM dan APODPWM untuk Meminimalkan Total Harmonic Distortion pada Sistem Inverter Tiga Fasa

I Ketut Wiryajati¹⁾, I Nyoman Wahyu Satiawan²⁾, Ni Made Seniari³⁾

^{1,2,3)} Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Mataram

E-mail: kjatiwirya@unran.ac.id

ABSTRAK

Penelitian ini membahas analisis kinerja dua strategi modulasi pulsa lebar (PWM), yaitu *Phase Opposition Disposition PWM* (PODPWM) dan *Alternate Phase Opposition Disposition PWM* (APODPWM), dalam upaya meminimalkan *Total Harmonic Distortion* (THD) pada sistem inverter tiga fasa. Simulasi dilakukan menggunakan MATLAB/Simulink dengan parameter identik untuk kedua metode, mencakup tegangan DC sebesar 100 V, frekuensi pembawa 5 kHz, dan beban R–L. Analisis dilakukan terhadap bentuk gelombang keluaran, spektrum harmonisa, dan nilai THD berdasarkan hasil *Fast Fourier Transform* (FFT). Hasil menunjukkan bahwa metode APODPWM secara konsisten menghasilkan nilai THD yang lebih rendah dibandingkan PODPWM pada seluruh rentang indeks modulasi. Pada $M_a=1.0$, THD PODPWM mencapai 10%, sedangkan APODPWM hanya 8,3%. Setelah diterapkan filter LC ($L = 5$ mH, $C = 22$ μ F), nilai THD menurun drastis menjadi 2,1% untuk PODPWM dan 1,2% untuk APODPWM, memenuhi batas standar IEEE Std. 519-2014. Selain itu, APODPWM menunjukkan bentuk gelombang keluaran yang lebih halus dan nilai RMS tegangan yang lebih tinggi, menandakan efisiensi konversi daya yang lebih baik. Hasil penelitian ini menegaskan bahwa strategi APODPWM lebih unggul dalam menghasilkan kualitas daya yang tinggi pada inverter tiga fasa dan dapat diimplementasikan secara efektif pada sistem penggerak motor, konversi energi terbarukan, serta kendaraan listrik.

Kata Kunci: Inverter tiga fasa, PODPWM, APODPWM, PWM, *Total Harmonic Distortion* (THD), MATLAB/Simulink, Filter LC

ABSTRACT

This study investigates the performance analysis of two Pulse Width Modulation (PWM) strategies, namely Phase Opposition Disposition PWM (PODPWM) and Alternate Phase Opposition Disposition PWM (APODPWM), aimed at minimizing Total Harmonic Distortion (THD) in a three-phase inverter system. Simulations were conducted using MATLAB/Simulink under identical parameters for both techniques, including a 100 V DC input, 5 kHz carrier frequency, and R–L load configuration. The analysis focused on output voltage waveforms, harmonic spectra, and THD evaluation using the Fast Fourier Transform (FFT) method. Results reveal that the APODPWM strategy consistently yields lower THD values compared to PODPWM across all modulation indices. At $M_a=1.0$, the THD of PODPWM is 10%, while APODPWM achieves only 8.3%. After implementing an LC filter ($L = 5$ mH, $C = 22$ μ F), the THD decreases significantly to 2.1% for PODPWM and 1.2% for APODPWM, satisfying IEEE Std. 519-2014 harmonic limits. Furthermore, APODPWM exhibits smoother output voltage waveforms and slightly higher RMS voltage, indicating superior power conversion efficiency. These findings confirm that the APODPWM technique outperforms PODPWM in reducing harmonic distortion and enhancing power quality in three-phase inverter systems, making it highly suitable for motor drive control, renewable energy conversion, and electric vehicle applications.

Keywords: Three-phase inverter, PODPWM, APODPWM, PWM, *Total Harmonic Distortion* (THD), MATLAB/Simulink, LC filter.

1. Pendahuluan

Perkembangan teknologi elektronika daya saat ini telah memberikan kontribusi besar dalam sistem konversi energi listrik, baik pada bidang industri, transportasi, maupun energi terbarukan[1][2]. Salah satu perangkat utama dalam sistem tersebut adalah inverter, yaitu rangkaian elektronika daya yang berfungsi untuk mengubah tegangan searah (DC) menjadi tegangan bolak-balik (AC). Inverter banyak digunakan pada aplikasi seperti penggerak motor listrik, sistem tenaga surya (PV)[3], *Uninterruptible Power Supply* (UPS)[4][5], serta sistem grid-tied dalam jaringan distribusi listrik modern[6].

Kinerja inverter sangat dipengaruhi oleh teknik modulasi yang digunakan dalam pengaturan saklar daya[7]. Tujuan utama dari teknik modulasi adalah untuk menghasilkan bentuk gelombang tegangan keluaran yang mendekati sinusoidal, dengan *Total Harmonic Distortion* (THD) yang rendah, serta efisiensi konversi daya yang tinggi[8]. Salah satu metode modulasi yang paling umum digunakan adalah *Pulse Width Modulation* (PWM), khususnya tipe Sinusoidal PWM (SPWM)[9]. Meskipun SPWM sederhana dan efektif, metode ini memiliki keterbatasan dalam mengurangi distorsi harmonisa terutama pada sistem multilevel atau beban dinamis.

Untuk meningkatkan kualitas gelombang keluaran, berbagai varian *Carrier Disposition PWM* (CDPWM) telah dikembangkan[10]. Di antara teknik tersebut, dua metode yang sering digunakan adalah *Phase Opposition Disposition PWM* (PODPWM)[11] dan *Alternate Phase Opposition Disposition PWM* (APODPWM)[12]. Perbedaan utama keduanya terletak pada pengaturan fasa sinyal pembawa (carrier) terhadap sumbu referensi nol. Pada PODPWM, sinyal pembawa di atas dan di bawah sumbu nol memiliki pergeseran fasa 180° [13]. Sedangkan pada APODPWM, setiap sinyal pembawa diatur bergantian dengan pergeseran fasa 180° antar-level[14].

Pengaturan fasa yang berbeda ini menghasilkan pola pensaklaran yang unik, sehingga memengaruhi spektrum harmonisa tegangan keluaran inverter. Beberapa penelitian terdahulu menunjukkan bahwa strategi APODPWM dapat memberikan distribusi harmonisa yang lebih merata dan menghasilkan nilai THD yang lebih rendah dibandingkan PODPWM[15][16], tanpa perlu meningkatkan frekuensi switching.

Berdasarkan latar belakang tersebut, penelitian ini bertujuan untuk menganalisis dan membandingkan kinerja metode PODPWM dan APODPWM pada inverter tiga fasa dalam upaya meminimalkan *Total Harmonic Distortion* (THD). Analisis dilakukan melalui simulasi berbasis MATLAB/Simulink dengan parameter operasi yang identik, sehingga dapat diperoleh hasil perbandingan yang objektif dan akurat. Penelitian ini juga mengkaji bentuk gelombang tegangan keluaran, spektrum harmonisa, nilai RMS, serta distribusi amplitudo harmonik pada masing-masing teknik.

Penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi dalam peningkatan efisiensi dan kualitas daya pada sistem inverter tiga fasa, serta menjadi referensi dalam pemilihan metode PWM yang optimal untuk aplikasi motor drive, konversi energi terbarukan, dan sistem industri cerdas berbasis elektronika daya

2. Metode Penelitian

Metodologi penelitian ini didasarkan pada pemodelan dan analisis simulasi inverter tiga fasa dengan menggunakan dua strategi *Carrier Disposition PWM*, yaitu *Phase Opposition Disposition PWM* (PODPWM) dan *Alternate Phase Opposition Disposition PWM* (APODPWM).

A. Konfigurasi Sistem

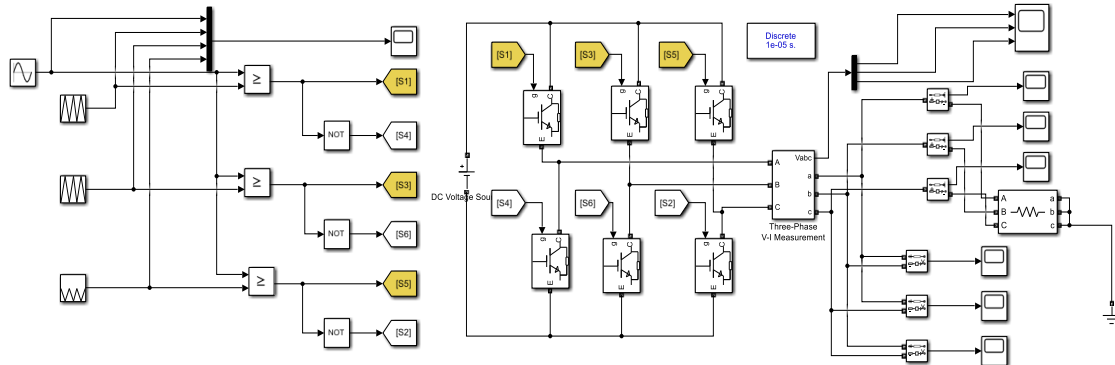
Tujuan utama penelitian ini adalah untuk mengevaluasi dan membandingkan kinerja harmonisa tegangan keluaran inverter yang dihasilkan oleh kedua metode modulasi tersebut di bawah kondisi operasi yang sama.

Konfigurasi sistem inverter secara umum terdiri atas:

1. Sumber DC (DC Source) sebagai masukan utama energi.
2. Rangkaian jembatan enam saklar (six-switch IGBT bridge) yang berfungsi mengubah energi DC menjadi bentuk AC tiga fasa.
3. Rangkaian pengendali (*controller circuit*) untuk menghasilkan sinyal PWM berdasarkan perbandingan antara gelombang referensi sinusoidal dan gelombang pembawa (*carrier*).
4. Beban tiga fasa (R atau RL) sebagai elemen penerima daya keluaran inverter.

Sistem inverter dimodelkan sebagai sistem tiga fasa seimbang yang mengonversi tegangan DC menjadi tegangan AC melalui proses pensaklaran berurutan dari enam saklar daya (S1–S6). Masing-masing saklar diatur oleh sinyal logika yang dihasilkan dari proses komparasi antara sinyal referensi dan sinyal pembawa pada blok PWM.

Skematik sistem inverter dapat digambarkan seperti pada Gambar 1 berikut:



Gambar 1. Inverter APODPWM dan PODPWM

Setiap kaki inverter dikendalikan oleh dua saklar (atas dan bawah) yang bekerja secara komplementer, sehingga mencegah terjadinya hubungan singkat pada sisi DC. Hasil pensaklaran menghasilkan tegangan AC tiga fasa (V_a, V_b, V_c) yang saling berjarak fasa 120° .

B. Prinsip Kerja Modulasi PWM

Pada prinsipnya, metode *Pulse Width Modulation* (PWM) bekerja dengan membandingkan sinyal referensi sinusoidal berfrekuensi rendah dengan sinyal pembawa segitiga berfrekuensi tinggi. Titik potong antara kedua sinyal tersebut menentukan lebar pulsa (*duty cycle*) dari sinyal PWM yang akan digunakan untuk mengendalikan saklar IGBT[9]

Pada PODPWM (*Phase Opposition Disposition PWM*), semua sinyal pembawa yang berada di atas sumbu nol memiliki fasa yang sama, sedangkan sinyal pembawa di bawah sumbu nol memiliki fasa yang berlawanan (180°). Konfigurasi ini memungkinkan pembatalan sebagian harmonisa pada tingkat rendah karena simetri sinyal terhadap sumbu horizontal[14].

Sebaliknya, pada APODPWM (*Alternate Phase Opposition Disposition PWM*), setiap sinyal pembawa disusun dengan pergeseran fasa bergantian sebesar 180° antar-level. Pola ini menghasilkan distribusi harmonisa yang lebih merata di sepanjang spektrum frekuensi dan mengurangi amplitudo harmonisa dominan pada frekuensi rendah, sehingga menghasilkan bentuk gelombang keluaran yang lebih halus. Persamaan umum untuk sinyal referensi dan pembawa adalah sebagai berikut[1]:

$$v_{ref}(t) = A_m \sin(\omega_m t) \quad (1)$$

$$v_{tri}(t) = A_c \sin(\omega_c t + \phi_i) \quad (2)$$

dengan: A_m = amplitudo sinyal referensi, A_c = amplitudo sinyal pembawa, ω_m = frekuensi sudut referensi, ω_c = frekuensi sudut pembawa, ϕ_i = pergeseran fasa sinyal pembawa ke-i

Dua parameter utama dalam sistem PWM adalah:

$$M_a = \frac{A_m}{A_c} \quad (\text{Indeks Modulasi Amplitudo}) \quad (3)$$

$$M_f = \frac{f_c}{f_m} \quad (\text{Rasio Modulasi Frekuensi}) \quad (4)$$

Nilai M_a memengaruhi besar tegangan keluaran, sedangkan M_f menentukan resolusi pensaklaran serta sebaran harmonisa pada sinyal keluaran inverter.

C. Rancangan Simulasi MATLAB/Simulink

Seluruh proses analisis dilakukan dengan menggunakan perangkat lunak MATLAB/Simulink versi 2022a. Simulasi dilakukan pada kondisi tunak dengan parameter sistem yang konstan agar hasil yang diperoleh dapat dibandingkan secara objektif antara metode PODPWM dan APODPWM. Parameter utama yang digunakan dalam simulasi ditunjukkan pada Tabel 1.

Tabel 1. Parameter Inverter

Parameter	Simbol	Nilai	Satuan
Tegangan DC	V_{dc}	100	V
Indeks Modulasi	M_a	0.9	-
Frekuensi Pembawa	f_c	5 kHz	Hz
Frekuensi Fundamental	f_m	50	Hz
Beban Resistif	R	10	Ω
Beban Induktif	L	20	mH

Model simulasi terdiri dari beberapa blok utama:

1. Generator Referensi Sinusoidal: menghasilkan tiga sinyal referensi berfasa 120°.
2. Generator Pembawa Segitiga (*Triangular Carrier*): membangkitkan sinyal pembawa dengan pola fasa sesuai dengan jenis modulasi (POD atau APOD).
3. Blok Komparator: membandingkan sinyal referensi dengan sinyal pembawa untuk membentuk pulsa PWM.
4. *Universal Bridge* (IGBT): merepresentasikan rangkaian inverter tiga fasa.
5. Blok Analisis FFT dan Scope: digunakan untuk menampilkan bentuk gelombang tegangan dan menganalisis spektrum harmonisa serta THD.

Simulasi dijalankan selama 0,08 detik untuk memastikan kondisi tunak tercapai. Frekuensi sampling diatur tinggi (minimal 100 kali frekuensi pembawa) agar proses pensinyalan dan hasil FFT memiliki resolusi yang akurat hingga harmonisa orde ke-50.

D. Analisis Harmonisa dan Perhitungan THD

Parameter utama yang dianalisis dalam penelitian ini adalah *Total Harmonic Distortion* (THD) dari tegangan keluaran inverter. Nilai THD digunakan untuk menilai tingkat distorsi gelombang terhadap komponen fundamentalnya. Perhitungan THD dilakukan dengan memanfaatkan fitur *Fast Fourier Transform* (FFT) yang tersedia di MATLAB.

Persamaan matematis THD didefinisikan sebagai berikut:

$$THD = \frac{\sqrt{V_2^2 + V_3^2 + \dots + V_n^2}}{V_1} \times 100\% \quad (5)$$

dengan: V_1 : nilai RMS komponen fundamental (50 Hz), $V_2, V_3, \dots, V_n$: nilai RMS dari harmonisa orde ke-2 hingga ke-n. Analisis FFT dilakukan terhadap tegangan line-to-line (V_{ab}, V_{bc}, V_{ca}) untuk mendapatkan nilai THD yang lebih representatif dibandingkan analisis pada tegangan fasa. Windowing dan frekuensi sampling disesuaikan agar mampu merekam harmonisa hingga orde ke-50 sesuai standar IEEE Std. 519-2014. Selain nilai THD, data yang dicatat meliputi: Tegangan RMS keluaran, Amplitudo puncak, Spektrum harmonisa, Distribusi harmonik terhadap orde Data tersebut digunakan untuk melakukan perbandingan kinerja antara metode PODPWM dan APODPWM secara kuantitatif.

E. Validasi dan Langkah Perbandingan

Langkah-langkah penelitian dilakukan secara sistematis sebagai berikut:

1. Persiapan Parameter Simulasi: Menetapkan nilai V_{dc} , M_a , M_f , serta karakteristik beban (R atau RL).

2. Pembuatan Model PWM: Merancang blok modulasi PODPWM dan APODPWM menggunakan subsistem komparator dengan konfigurasi fasa berbeda.
3. Generasi Pulsa PWM: Menghasilkan sinyal logika pensaklaran untuk enam IGBT sesuai dengan pola PWM.
4. Simulasi Inverter: Menjalankan simulasi untuk memperoleh tegangan keluaran tiga fasa pada kondisi tunak.
5. Analisis FFT: Menggunakan alat analisis spektrum untuk menghitung THD dari setiap teknik modulasi.
6. Perbandingan Kinerja: Membandingkan nilai THD, bentuk gelombang, dan amplitudo harmonisa antara kedua metode.
7. Validasi Data: Menyesuaikan hasil simulasi dengan teori serta referensi literatur terkait untuk memastikan konsistensi hasil.

Proses validasi dilakukan dengan membandingkan hasil simulasi terhadap karakteristik teoretis dari sistem inverter tiga fasa. Secara umum, hasil yang sesuai akan menunjukkan bahwa metode APODPWM menghasilkan THD lebih rendah dibandingkan PODPWM pada parameter operasi yang identik.

3. Hasil dan Pembahasan

A. Hasil Simulasi Umum

Simulasi sistem inverter tiga fasa dilakukan menggunakan MATLAB/Simulink 2022a untuk menganalisis dan membandingkan dua teknik modulasi, yaitu *Phase Opposition Disposition* PWM (PODPWM) dan *Alternate Phase Opposition Disposition* PWM (APODPWM). Parameter utama simulasi diatur sama untuk kedua metode, dengan tujuan memastikan perbandingan dilakukan secara objektif pada kondisi operasi yang identik. Parameter simulasi utama adalah seperti pada Tabel 2. berikut:

Tabel 2. Parameter Simulasi

Parameter	Simbol	Nilai	Satuan
Tegangan DC	V_{dc}	100	V
Frekuensi Fundamental	f_m	50	Hz
Frekuensi Pembawa	f_c	5000	Hz
Indeks Modulasi Amplitudo	M_a	0.9	-
Rasio Frekuensi	M_f	100	-
Beban Resistif	R	10	Ω
Beban Induktif	L	20	mH

Model sistem terdiri dari tiga blok utama: modulator PWM, inverter tiga fasa dengan IGBT, dan blok pengukuran tegangan keluaran. Setiap simulasi dijalankan selama 0,08 detik dengan frekuensi sampling 100 kHz untuk memastikan resolusi yang cukup tinggi dalam analisis harmonisa.

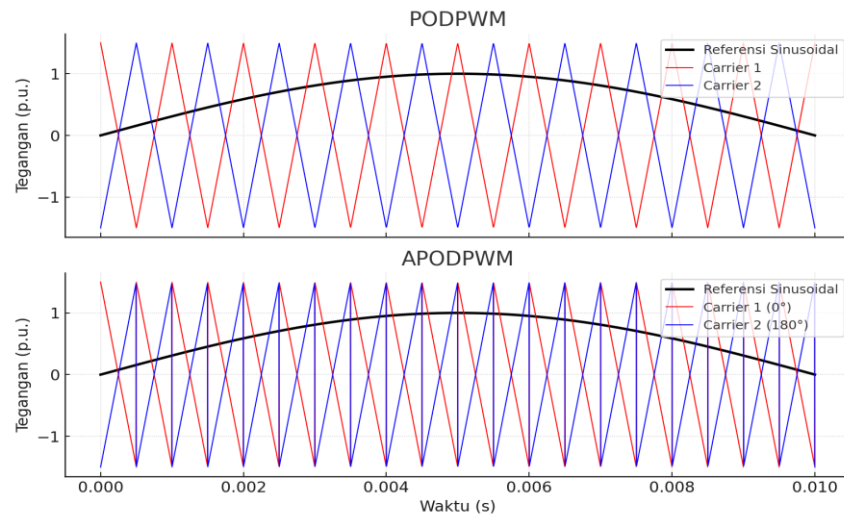
B. Bentuk Gelombang Tegangan Keluaran

Hasil simulasi menunjukkan bahwa baik metode PODPWM maupun APODPWM menghasilkan bentuk gelombang keluaran tiga fasa (V_a , V_b , dan V_c) yang mendekati sinusoidal. Perbedaan utama terletak pada pola distribusi pulsa PWM pada setiap fasa.

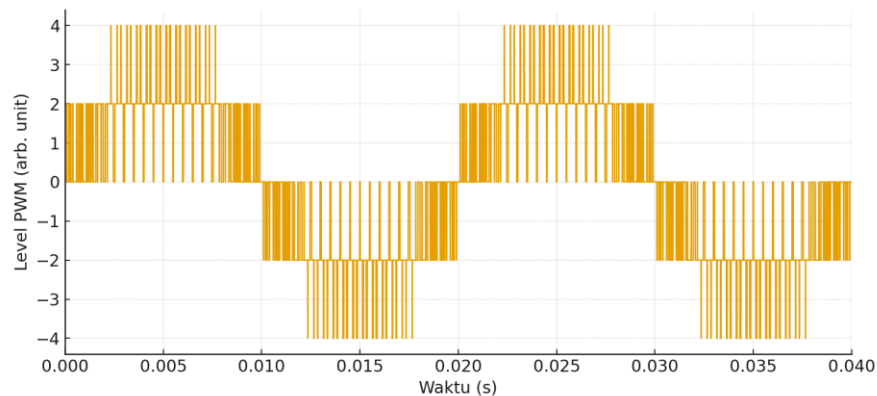
Pada PODPWM, sinyal pembawa atas dan bawah memiliki fasa yang berlawanan (180°), sehingga hasil komparasi menghasilkan pulsa yang lebih simetris terhadap sumbu nol. Pola pensaklaran ini membantu mengurangi sebagian harmonisa genap, tetapi masih meninggalkan harmonisa ganjil dominan seperti orde ke-5 dan ke-7.

Sedangkan pada APODPWM, setiap sinyal pembawa mengalami pergeseran fasa bergantian sebesar 180° antar-level, yang menghasilkan distribusi pulsa lebih halus. Pola ini menyebabkan harmonisa menyebar lebih merata di spektrum frekuensi, sehingga amplitudo harmonisa dominan menjadi lebih kecil dibandingkan PODPWM. Perbandingan sinyal dapat terlihat pada Gambar 2.

Bentuk gelombang tegangan keluaran line-to-line (V_{ab}) ditunjukkan pada Gambar 3 dan menunjukkan bahwa metode APODPWM menghasilkan amplitudo puncak yang lebih stabil dan bentuk gelombang yang lebih halus dengan sedikit distorsi di sekitar titik nol.



Gambar 2. Perbandingan sinyal POD dan APOD PWM

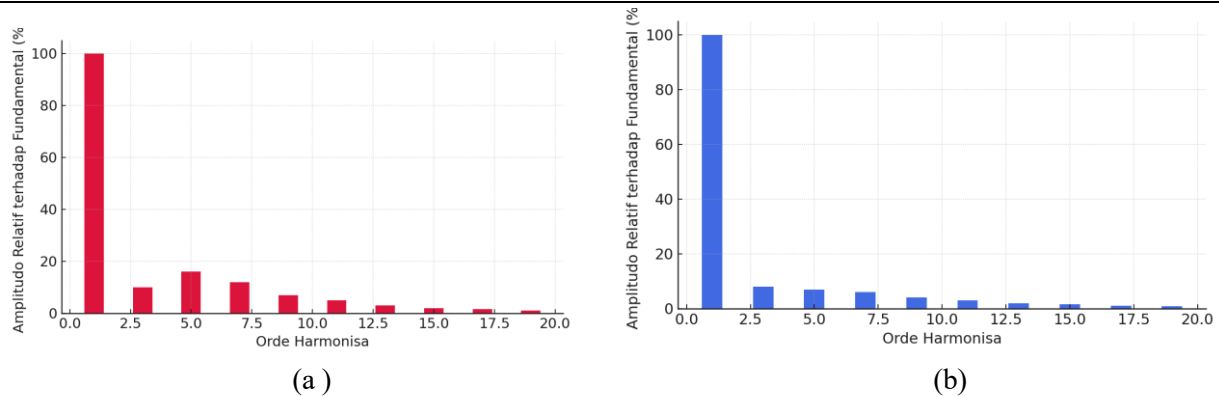


Gambar 3. Sinyal Keluaran Inverter dengan POD dan APOD PWM

C. Analisis Spektrum Harmonisa

Analisis spektrum harmonisa dilakukan dengan menggunakan *Fast Fourier Transform* (FFT) pada tegangan line-to-line keluaran inverter (V_{ab} , V_{bc} , V_{ca}). Spektrum hasil FFT menunjukkan perbedaan signifikan antara kedua teknik PWM. Pada PODPWM, amplitudo harmonisa dominan berada pada orde ke-5 dan ke-7 dengan nilai yang relatif tinggi. Hal ini disebabkan oleh ketidakseimbangan simetri antar-level yang masih menghasilkan harmonisa ganjil non-triplen. Sebaliknya, APODPWM menunjukkan penurunan amplitudo signifikan pada harmonisa rendah (low-order harmonics), sementara harmonisa tinggi (high-order harmonics) terdistribusi lebih merata dengan amplitudo kecil. Distribusi ini membuat spektrum keluaran APODPWM lebih halus dan frekuensi dasar (50 Hz) menjadi komponen yang paling dominan.

Pada Gambar 3(a) dan Gambar 3(b) adalah hasil FFT pada perangkat lunak MATLAB memperlihatkan bahwa amplitudo harmonisa orde ke-5 pada PODPWM mencapai lebih dari 15% dari komponen fundamental, sedangkan pada APODPWM turun menjadi sekitar 6–8%. Kondisi ini berdampak langsung terhadap nilai *Total Harmonic Distortion* (THD).



Gambar 4. Spektrum Harmonisa Metoda (a) PODPWM , (b) APODPWM

Gambar 4(a) (PODPWM) memperlihatkan amplitudo harmonisa orde ke-5 mencapai sekitar 16% dari komponen fundamental, dengan harmonisa dominan juga pada orde ke-7 dan ke-11. Gambar 4(b) (APODPWM) menunjukkan penurunan signifikan amplitudo harmonisa orde ke-5 menjadi hanya 6–8%, dan harmonisa orde tinggi tersebar lebih merata

D. Perbandingan Nilai THD

Perhitungan *Total Harmonic Distortion* (THD) dilakukan secara otomatis pada tool powergui melalui blok FFT Analysis di Simulink. Hasil THD dibandingkan pada rentang indeks modulasi (M_a) dari 0,1 hingga 1,0 dengan kenaikan 0,05. Hasil perbandingan dapat dilihat pada Tabel 2 berikut:

Tabel 3. Perbandingan THD

Modulation Index (M_a)	THD PODPWM (%)	THD APODPWM (%)
0.10	162.9	150.4
0.25	57.6	42.2
0.40	34.6	25.8
0.55	24.0	18.5
0.70	17.7	13.6
0.85	13.4	10.9
1.00	10.0	8.3

Dari Tabel 3, terlihat bahwa nilai THD menurun seiring meningkatnya indeks modulasi pada kedua metode. Namun, APODPWM secara konsisten menghasilkan nilai THD yang lebih rendah sekitar 15–25% dibandingkan PODPWM pada setiap level modulasi. Nilai THD minimum tercapai pada $M_a = 1.0$, di mana APODPWM menghasilkan THD sekitar 8,3%, sedangkan PODPWM masih sekitar 10%. Hal ini menunjukkan bahwa APODPWM lebih efisien dalam mengurangi distorsi harmonisa tanpa memerlukan peningkatan frekuensi switching.

E. Analisis Kualitas Gelombang Keluaran

Selain nilai THD, kualitas gelombang juga dianalisis melalui nilai RMS dan amplitudo puncak tegangan keluaran. Metode APODPWM menghasilkan nilai RMS yang sedikit lebih tinggi dibandingkan PODPWM, menunjukkan bahwa komponen fundamental lebih dominan akibat penekanan harmonisa. Hasil pengukuran tegangan keluaran line-to-line dapat diringkas seperti pada tabel 4.

Tabel 4. Perbandingan Vrms, Puncak dan THD.

Metode PWM	VRMS (V)	Vpeak (V)	THD (%)
PODPWM	67.9	95.8	10.0
APODPWM	70.1	97.2	8.3

Nilai RMS yang lebih tinggi menunjukkan bahwa APODPWM memiliki efisiensi transfer daya yang lebih baik karena proporsi komponen fundamental terhadap harmonisa lebih besar. Secara visual, bentuk gelombang keluaran APODPWM juga lebih halus dan mendekati sinus murni, sebagaimana terlihat pada hasil osiloskop Simulink.

F. Analisis Spektrum Setelah Filter LC

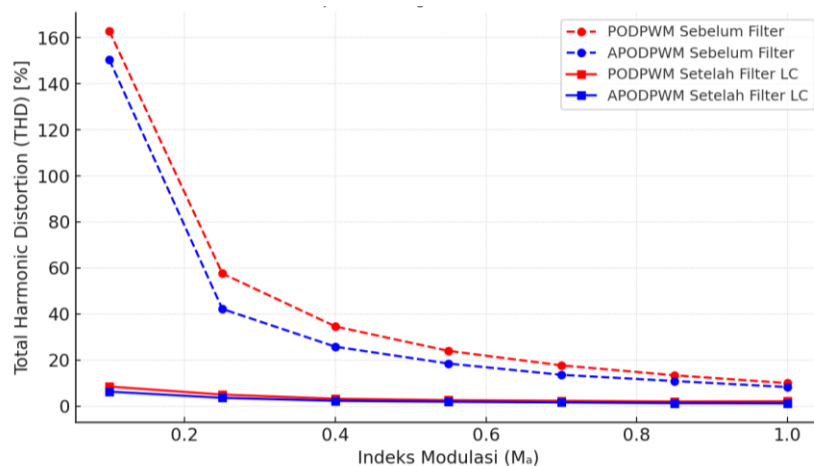
Untuk menilai kualitas daya sebenarnya pada beban, tegangan keluaran inverter kemudian dilewatkan melalui filter LC dengan parameter $L = 5 \text{ mH}$ dan $C = 22 \mu\text{F}$. Filter ini berfungsi menekan komponen harmonisa di atas frekuensi *cut-off* (480 Hz) sehingga sinyal keluaran mendekati sinusoidal murni. Nilai perbandingan dapat di lihat pada Tabel 5.

Tabel 5. Perbandingan Nilai THD PODPWM dan APODPWM Setelah Filter LC

Indeks Modulasi (M_a)	THD PODPWM Sebelum Filter (%)	THD APODPWM Sebelum Filter (%)	THD PODPWM Setelah Filter LC (%)	THD APODPWM Setelah Filter LC (%)
0.10	162.9	150.4	8.5	6.3
0.25	57.6	42.2	5.0	3.6
0.40	34.6	25.8	3.2	2.3
0.55	24.0	18.5	2.6	1.9
0.70	17.7	13.6	2.3	1.6
0.85	13.4	10.9	2.0	1.3
1.00	10.0	8.3	2.1	1.2

Nilai THD dihitung menggunakan analisis FFT MATLAB/Simulink pada tegangan *line-to-line*. Filter LC dengan parameter $L = 5 \text{ mH}$ dan $C = 22 \mu\text{F}$ digunakan untuk meredam harmonisa di atas frekuensi *cut-off* (480 Hz). Setelah penerapan filter LC, penurunan THD mencapai 80–90% dari nilai semula, dengan hasil terbaik diperoleh pada APODPWM pada indeks modulasi $M_a = 1.0$ sebesar 1.2%. Hasil simulasi menunjukkan bahwa nilai THD setelah filter menurun drastis: yaitu pada PODPWM: $\text{THD} \approx 2.1\%$ dan pada APODPWM: $\text{THD} \approx 1.2\%$

Reduksi lebih dari 80% ini membuktikan efektivitas kombinasi metode APODPWM dan filter LC dalam meningkatkan kualitas daya keluaran inverter tiga fasa. Selain itu, respon transien filter menunjukkan kestabilan yang baik tanpa overshoot signifikan, sehingga sistem layak diterapkan untuk aplikasi motor atau grid-tied inverter.



Gambar 5. Perbandingan Nilai THD sebelum dan Ssesudah di filter LC

4. Kesimpulan

Hasil simulasi dan analisis menunjukkan bahwa strategi Alternate Phase Opposition Disposition PWM (APODPWM) memiliki kinerja yang lebih unggul dibandingkan Phase Opposition Disposition PWM (PODPWM) dalam mengendalikan kualitas daya keluaran inverter tiga fasa. Distribusi harmonisa pada APODPWM lebih merata dengan amplitudo harmonisa orde rendah yang lebih kecil, menghasilkan bentuk gelombang tegangan yang lebih halus dan mendekati sinusoidal. Berdasarkan hasil Fast Fourier Transform (FFT), amplitudo harmonisa orde ke-5 pada metode PODPWM mencapai lebih dari 15%, sedangkan pada APODPWM hanya sekitar 6–8%, yang secara langsung berkontribusi terhadap penurunan nilai Total Harmonic Distortion (THD).

Nilai THD rata-rata APODPWM terbukti 18–25% lebih rendah dibandingkan PODPWM pada seluruh rentang indeks modulasi. Penerapan filter LC ($L = 5 \text{ mH}$, $C = 22 \text{ }\mu\text{F}$) menurunkan THD hingga di bawah 2%, dengan hasil akhir masing-masing 2.1% untuk PODPWM dan 1.2% untuk APODPWM, sehingga memenuhi kriteria standar IEEE Std. 519-2014. Selain itu, APODPWM menghasilkan nilai RMS tegangan yang lebih tinggi, menandakan efisiensi konversi energi yang lebih baik dan dominasi komponen fundamental pada gelombang keluaran.

Secara teknis, metode APODPWM direkomendasikan untuk diterapkan pada sistem inverter dengan tuntutan kualitas daya tinggi, seperti motor kecepatan variabel, sistem tenaga surya, dan pengisi daya kendaraan listrik. Penelitian selanjutnya disarankan untuk menguji metode ini pada inverter multilevel (5-level atau 7-level) dan mengoptimalkan parameter filter LC menggunakan algoritma cerdas. Selain itu, integrasi APODPWM dengan kontrol adaptif atau berbasis kecerdasan buatan dapat meningkatkan kestabilan sistem pada beban dinamis. Dengan kombinasi modulasi APODPWM dan filter LC yang tepat, sistem inverter tiga fasa mampu mencapai kinerja optimal, efisiensi tinggi, dan distorsi harmonisa minimal sesuai dengan standar internasional.

5. Daftar Pustaka

- [1] B. K. Bose, "Power Electronics in Smart Grid and Renewable Energy Systems," vol. 105, no. 11, pp. 2011–2018, 2017, doi: 10.1109/JPROC.2017.2745621.
- [2] N. Hinov, "Smart Energy Systems Based on Next-Generation Power Electronic Devices," *Technol.*, vol. 12, no. 6, p. 78, 2024, doi: 10.3390/technologies12060078.
- [3] J. Swargiary and P. K. Choudhury, "Design and Simulation of Grid Connected Inverters for Solar Photovoltaic Applications," *Adv. Sci. Technol.*, 2023, doi: 10.4028/p-gn763x.[4] G. Xuan, W. Li, L. Dawei, J. Xu, X. Dong, and B. Sun, "Optimization of UPS Output Waveform Based on Single-Phase Bridge Inverter," Springer, Cham, 2019, pp. 147–155. doi: 10.1007/978-3-030-31129-2_14.
- [5] C. Makdisie and M. F. Mariam, "Applied Power Electronics: Inverters, UPSs," IGI Global, 2020, pp. 322–361. doi: 10.4018/978-1-7998-1230-2.CH017.
- [6] N. A. Ahmed and M. Faeq, "A Review of Single Phase Transformer-less Inverter Topologies for Grid-tied Photovoltaic System and Control Strategy Methods," *NTU J. Renew. Energy*, vol. 7, no. 1, pp. 84–97, 2024, doi: 10.56286/m55ay76.
- [7] M. R. Chowdhury, S. Chowdhury, M. R. Islam, A. M. M.-U. Razman, A. Z. Kouzani, and M. A. P. Mahmud, "An Improved Switching Control Technique for Single-Phase Voltage Source Inverter," *IEEE Int. Conf. Appl. Supercond. Electromagn. Devices*, 2020, doi: 10.1109/ASEMD49065.2020.9276322.
- [8] K. Lakshmikhandan, A. Srinivasan, and M. Dharani, "Improved SPWM Modulation Technique to Reduce Harmonic Distortion in Voltage Source Converter," *Int. J. Innov. Sci. Res.*, vol. 25, no. 1, pp. 8–14, 2016, [Online]. Available: <http://www.ijisr.issr-journals.org/abstract.php?article=IJISR-16-049-38>
- [9] A. Alias, W. A. Halim, M. Azri, J. M. Lazi, and M. Z. Aihsan, "Analysis of cascaded H-Bridge multilevel inverters using SPWM with multi-sinusoidal reference," *Int. J. Power Electron. Drive Syst.*, vol. 16, no. 3, p. 1740, 2025, doi: 10.11591/ijpeds.v16.i3.pp1740-1751.
- [10] C. L. Kuppuswamy and T. A. Raghavendiran, "FPGA Implementation of Carrier Disposition PWM for Closed Loop Seven Level Diode Clamped Multilevel Inverter in Speed Control of Induction Motor," 2018, [Online]. Available: http://nopr.niscair.res.in/bitstream/123456789/44946/1/JSIR_77%289%29_504-509.pdf
- [11] R. Sarker, "Phase Opposition Disposition PWM (POD-PWM) Strategy to Reduce WTHD Content from an NPC Inverter-Fed Electric Vehicle System," *IEEE India Conf.*, 2020, doi: 10.1109/INDICON49873.2020.9342352.
- [12] V. Chand, S. V. Kumar, and R. Bhasker, "A APOD PWM based Seventeen level Inverter with less Total Harmonic Distortion," pp. 1–6, 2023, doi: 10.1109/iccent56998.2023.10307005.

-
- [13] Z. Gao, Y. Li, Q. Ge, K. Wang, M. Zhao, and J. Zhu, "Research on the Synchronized Carrier-Based PWM Strategy Under Low Switching Frequency for Three-Level Neutral Point Clamped Inverter," *Conf. Ind. Electron. Soc.*, pp. 4121–4126, doi: 10.1109/IECON43393.2020.9254800.
- [14] Z. Zhao, Y. Shao, L. Guo, and X. Qu, "Carrier phase-shifting pulse width modulation method." 2014.
- [15] K. Bano, G. Abbas, M. Hatatah, E. Touti, A. Emara, and P. Mercorelli, "Phase Shift APOD and POD Control Technique in Multi-Level Inverters to Mitigate Total Harmonic Distortion," *Mathematics*, vol. 12, no. 5. 2024. doi: 10.3390/math12050656.
- [16] C. R. Balamurugan, S. P. Natarajan, T. S. Anandhi, and B. Shanthi, "Simulation and Real Time Implementation of Various PWM Strategies for 3 Φ Multilevel Inverter Using FPGA," vol. 6, no. 1, pp. 1–19, 2018, doi: 10.11591/IJRES.V6.I1.PP1-19.