



# Simulasi Inverter Tiga Fasa Dengan Teknik Pengontrolan Sinusoidal Pulse Width Modulation Aplikasi Pada Pembangkit Listrik Tenaga Surya

Arzul

Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknologi Industri Universitas Bung Hatta Padang

DOI: 10.31004/jutin.v5i1.14695

✉ Corresponding author:  
[yusrizalbakar@bunghatta.ac.id]

---

## Article Info

## Abstrak

### *Kata kunci:*

Harmonisa;  
Pembangkit Listrik Tenaga Surya;  
SPWM

Keperluan energi listrik mengalami peningkatan dari waktu ke waktu sesuai dengan pertambahan jumlah penduduk dan perkembangan industri. Namun, ketersediaan energi listrik saat ini berasal dari energi fosil dan hal tersebut membuat ketersediaan energi fosil di dunia semakin menipis. Oleh karena itu energi terbarukan sangat dibutuhkan untuk memenuhi kebutuhan energi listrik dimasa akan datang. Di Indonesia sangat banyak ketersediaan energi terbarukan ini seperti energi angin, energi matahari, energi air dan lain-lainnya. Penelitian ini akan fokus pada energi matahari dengan menggunakan photovoltaic inverter dengan teknik pengontrolan pensaklaran menggunakan sinusoidal pulse width modulation (SPWM). Hasil perancangan SPWM untuk pengontrolan pensaklaran inverter telah dimulasikan dengan menggunakan Matlab Simulink. Hasil dari simulasi ini telah menghasilkan gelombang keluaran inverter mendekati sinusoidal sempurna. Kandungan harmonisa tegangan pada gelombang keluaran inverter ini sudah di bawah standar yang ditetapkan dengan THDv sebesar 2.69 %. Sedangkan harmonisa arus keluaran inverter sebesar THDi 15.09%. Dari hasil penelitian ini dapat dilihat bahwa keluaran inverter dengan menggunakan teknik kontrol SPWM sudah berhasil dilaksanakan dengan harmonisa di bawah yang sudah ditetapkan.

## Abstract

### *Keywords:*

Harmonics;  
Solar Power Plant;  
SPWM

The need for electrical energy has increased from time to time in accordance with the increase in population and industrial development. However, the current availability of electrical energy comes from fossil energy and this makes the availability of fossil energy in the world dwindling. Therefore, renewable energy is needed to meet future electrical energy needs. In Indonesia, there is a lot of availability of renewable energy such as wind energy, solar energy, water energy and others. This research will focus on solar energy using a photovoltaic inverter with switching control techniques using sinusoidal pulse width modulation (SPWM). The results of SPWM design for inverter switching control have been simulated using Matlab Simulink. The results of this simulation have resulted in the inverter output waveform approaching a perfect

sinusoid. The content of voltage harmonics in the output waveform of this inverter is already below the standard set with a THD<sub>v</sub> of 2.69%. Meanwhile, the inverter output current harmonic is THD<sub>i</sub> 15.09%. From the results of this study, it can be seen that the inverter output using the SPWM control technique has been successfully implemented with harmonics below the specified

---

## 1. PENDAHULUAN

Peningkatan jumlah penduduk dan berkembangnya teknologi dunia membuat semakin meningkatnya kebutuhan dan konsumsi energi listrik. Namun, sebagian besar energi listrik saat ini berasal dari energi fosil dan hal tersebut membuat ketersediaan energi fosil didunia semakin menipis. Oleh karena itu keberadaan energi terbarukan sangat dibutuhkan untuk memenuhi kebutuhan energi listrik dimasa akan datang [1], [2]. Sistem kelistrikan dirancang untuk bekerja dalam tegangan dan arus sinusoidal yang ideal bentuk gelombang pada frekuensi yang sama. Namun dalam kenyataannya tidak demikian, karena harmonisa pada sistem kelistrikan akan terjadi disebabkan oleh adanya beban tidak linier yang terhubung ke sistem. Salah satu beban yang tidak linier itu ialah inverter yang di aplikasikan untuk PLTS. Untuk meminumkan harmonisa yang dihasilkan oleh inverter maka gelombang tegangan yang dihasilkan harus sinusoidal sempurna. Untuk menghasilkan bentuk gelombang tegang yang sinusoidal sempurna maka pensaklaran inverter harus di kontrol dengan cara tertentu.

Sebagai sumber energy terbarukan, PLTS baik skala besar, sedang maupun kecil berkembang dengan pesat dan terdistribusi pada sistem tenaga listrik. Inverter merupakan komponen utama pembangkit listrik tenaga surya yang digunakan untuk mengonversikan tegangan DC yang dihasilkan panel surya ke tegangan AC yang diperlukan oleh beban. Inverter ini dapat menghasilkan harmonisa yang tinggi kalau tidak dilakukan pengontrolan dengan baik dan benar. [4], [5]. Hal ini disebabkan oleh penggunaan inverter yang memakai teknik modulasi yang sederhana [6], [7]. Meningkatnya distorsi harmonisa dalam sistem tenaga listrik akan berdampak pada beban dan sistem kelistrikan itu sendiri [8]. Harmonisa dapat menyebabkan kerusakan peralatan elektronik, kegagalan kapasitor, panas yang berlebihan pada transformator, motor dan konduktor fasa serta konduktor netral [6]. Selain itu harmonisa bisa menyebabkan kehilangan kestabilan sistem tenaga bahkan bisa menyebabkan relai proteksi berkerja salah, meningkatnya rugi-rugi tenaga dan rendahnya faktor daya [3], [7]. Karena itu perlulah dilakukan penelitian untuk mengurangi distorsi harmonisa yang dihasilkan oleh inverter yang di aplikasikan pada PLTS

## 2. TINJAUAN PUSTAKA

PLTS mempunyai dua komponen utama yaitu modul panel surya dan inverter. Desain dan implementasi inverter perlu dilakukan karena efisiensi keseluruhan sistem pembangkit listrik photovoltaik yang terhubung ke jaringan tergantung pada efisiensi inverter [11–16]. Kontrol daya aktif dan daya reaktif yang di injeksikan ke dalam sistem grid dan kontrol tegangan dc-link akan menjamin tingginya kualitas dari daya yang di injeksikan. Selain itu pengurangan distorsi harmonisa, penghapusan komponen DC yang di injeksikan ke sistem grid, sinkronisasi jaringan dan implementasi digital kontrol juga akan menjamin kualitas daya yang dihasilkan [17], [18]. Teknik modulasi lebar pulsa (PWM) digunakan untuk mengendalikan inverter sumber tegangan (VSI), yang menyuntikkan arus ke jaringan. Teknik PWM ini merupakan perbandingan sinyal pembawa (carrier) segitiga "frekuensi tinggi" dengan bentuk gelombang referensi sinusoidal "frekuensi rendah. Titik persimpangan menentukan switching bentuk gelombang. Metode kedua, teknik PWM berdasarkan pola switching yang dibangkitkan. Teknik PWM akan mengurangi orde rendah komponen harmonisa [19], [20]. Dalam hal ini, pola peralihannya adalah dihitung secara apriori untuk kondisi operasi tertentu dan kemudian disimpan dalam memori untuk digunakan dalam waktu nyata [21–23].

Sebuah inverter dapat memiliki gelombang keluaran sinusoidal dan frekuensi 50Hz dengan cara mengimplementasi teknik pengontrolan PWM. Sebuah inverter terdiri dari beberapa blok rangkaian yaitu DC-DC booster, Osilator PWM, Gate Driver, Full-Bridge Inverter, dan Low Pass Filter. Hasil penelitian menunjukkan bahwa ini untuk frekuensi modulasi 3.3KHz inverter hanya mampu mengubah 12 VDC menjadi tegangan 42VDC yang kemudian dikonversi menjadi 20 VAC / 50Hz gelombang sinus [24]. PWM merupakan cara untuk mengolah sinyal gelombang yang konsepnya seperti pensaklaran. Pada keadaan menyala (ON) dan keadaan padam (OFF) yang di atur oleh sinyal gerbang. Dengan menggunakan mikrokontroller digital, komponen analog sederhana, dan rangkaian terpadu PWM yang spesifik dapat membuat variasi pola siklus sinyal PWM. Inverter modifikasi gelombang sinusoidal mirip dengan inverter gelombang kotak namun menggunakan jenzang lain untuk terlihat menyerupai bentuk gelombang sinusoidal. Pada kontrol PWM yang analog membutuhkan pembangkitan sinyal referensi dan pembawa yang mensuplai umpan ke komparator yang menciptakan sinyal output berdasarkan ketidaksamaan antara frekuensi. Sinyal referensi merupakan sinusoidal dan frekuensi sinyal output yang diinginkan, adapun sinyal pembawa biasanya berbentuk gigi gergaji pada frekuensi yang secara substansial lebih tinggi dibanding sinyal referensi [25].

Pada output inverter, total harmonisa dapat dikurangi dengan metode SPWM. Harmonisa pada SPWM menawarkan solusi untuk mengontrol tegangan output dan amplitudo. Proses kontrolnya, melalui modulasi bentuk gelombang untuk mengurangi harmonisa. Proses pensaklaran SPWM bipolar switching menggunakan dua buah sinyal yaitu sinyal segitiga dan sinyal sinus. Cara modulasinya dengan perbandingan sinyal pembawa dan sinyal referensi. Prinsip bipolar switching adalah ketika amplitudo sinyal referensi lebih besar dari sinyal pembawa maka hasilnya HIGH atau ON. Kemudian, ketika sinyal referensi lebih kecil dari sinyal pembawa maka hasilnya OFF atau LOW.

Dalam sistem photovoltaik yang terhubung ke jaringan, tujuan utamanya adalah untuk mengontrol daya yang disuntikkan oleh inverter ke dalam jaringan dari energi yang disediakan oleh generator photovoltaik. Kualitas daya yang disuntikkan ke jaringan dan kinerja sistem konverter tergantung pada kualitas kontrol arus inverter. Teknik kontrol yang digunakan untuk photovoltaik sistem terhubung ke grid berdasarkan modulasi lebar pulsa digital (DSPWM) yang dapat menyinkronkan output sinusoidal arus dengan tegangan grid dan kontrol faktor daya diusulkan. Kontrol ini didasarkan pada inverter fase tunggal yang dikendalikan oleh bipolar PWM Switching dan kontrol arus linier [26]. Cara lain yang dilakukan adalah pergeseran sudut fasa dari tegangan keluaran inverter dengan DSPWM (Digital Sinusoidal Pulse Width Modulasi). Teknik kontrol ini dapat menyinkronkan arus keluaran inverter sinusoidal dengan tegangan grid dan mengontrol daya yang disuntikkan ke jaringan. Kontrol digital ini menunjukkan kesederhanaan, pengurangan kebutuhan memori dan daya perhitungan untuk kontrol. Struktur fungsional sistem dengan kontrol digital ini telah divalidasi dengan simulasi dan hasil eksperimen [27]. Tegangan keluaran dapat bernilai tetap atau berubah-ubah pada frekuensi tetap atau berubah-ubah. Tegangan keluaran yang berubah-ubah dapat diperoleh dengan memvariasikan tegangan masukan DC dan menjaga penguatan inverter bernilai tetap. Sebaliknya jika tegangan masukan DC tetap dan tidak terkontrol, tegangan keluaran yang berubah-ubah dapat diperoleh dengan memvariasikan penguatan dari inverter. Variasi penguatan inverter biasanya diperoleh dengan menggunakan pengendali PWM dan SPWM yang ada pada inverter [28], [29]. Fungsi periodik non sinusoidal  $f(t)$  dalam selang waktu  $(T)$  dapat diwakili oleh penjumlahan komponen fundamental dan rangkaian komponen harmonisa orde tinggi pada frekuensi  $(f)$  yang merupakan kelipatan integral dari komponen fundamental. Dengan menggunakan representasi deret Fourier, bentuk gelombang yang terdistorsi dapat dianalisis dengan persamaan di bawah ini:

$$f(t) = A_0 + \sum_{h=1}^{\infty} [A_h \cos(h\omega t) + B_h \sin(h\omega t)] \tag{1}$$

$$f(t) = A_0 + \sum_{h=1}^{\infty} [C_h \cos(h\omega t + \theta_h)] \tag{2}$$

Ah dan Bh ialah koefisien deret Fourier.

Fundamental frekwensi angular ialah  $\omega_1 = 2\pi f_1$ ,  $f_1$  ialah frekwensi fundamental 50 Hz dan perioda ialah  $T = \frac{1}{f_1} = \frac{2\pi}{\omega_1}$ .  $C_1 \cos(\omega_1 t + \theta_1)$  merupakan komponen fundamental, dan  $C_h \cos(h\omega t + \theta_h)$  harmonisa ke h dari amplitudo  $C_h$ , frekwensi  $h\omega_1$  and fasa  $\theta_h$  relatif terhadap fundamental.

Sistem tenaga Indonesia dioperasikan pada frekwensi 50 Hz dan dengan demikian frekuensi harmonisa akan muncul sebagai kelipatan 50 Hz seperti 150 Hz, 250 Hz, 350 dll. Koefisien deret Fourier  $C_1, C_2, \dots, C_h$  membentuk spektrum harmonisa dari bentuk gelombang dan ditemukan menggunakan persamaan:

$$A_0 = \frac{1}{T} \int_0^T f(t) dt = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} f(t) dx \tag{3}$$

$$A_h = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \cos(h\omega_0 t) dt = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(t) \cos(hx) dx \tag{4}$$

$$B_h = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \sin(h\omega t) dt = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(t) \sin(hx) dx \tag{5}$$

$$A_h = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \cos(h\omega t) dt = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(t) \cos(hx) dx \tag{6}$$

$$C_h = \sqrt{A_h^2 + B_h^2} \tag{7}$$

$$\theta_h = \tan^{-1} \left( \frac{A_h}{B_h} \right) \tag{8}$$

Berdasarkan analisis Fourier, arus non-sinusoidal terdiri dari arus fundamental dan komponen arus yang mengandung harmonisa, yang dinyatakan sebagai [30]:

$$i_s(t) = \sqrt{2}I_{s1} \sin(\omega_1 t - \theta_1) + \sum_{h \neq 1}^{\infty} \sqrt{2}I_{sh} \sin(h\omega t - \theta_h) \quad (9)$$

Dimana:

$i_s$  ialah arus fasa

$I_{s1}$  ialah nilai RMS komponen fundamental

$I_{sh}$  ialah nilai RMS komponen harmonisa order  $h$

$h$  ialah order harmonisa

Ukuran distorsi dalam bentuk gelombang diberikan oleh (10) dan disebut distorsi harmonisa total (THD). THD arus (THDi) adalah rasio nilai RMS dari arus harmonisa total dan nilai RMS dari bagian fundamental,  $I_1$ . Nilai ini biasanya dinyatakan sebagai berikut:

$$THD_i = \frac{\left[ \sum_{h=2}^{\infty} (I_h)^2 \right]^{1/2}}{I_1} \times 100\% \quad (10)$$

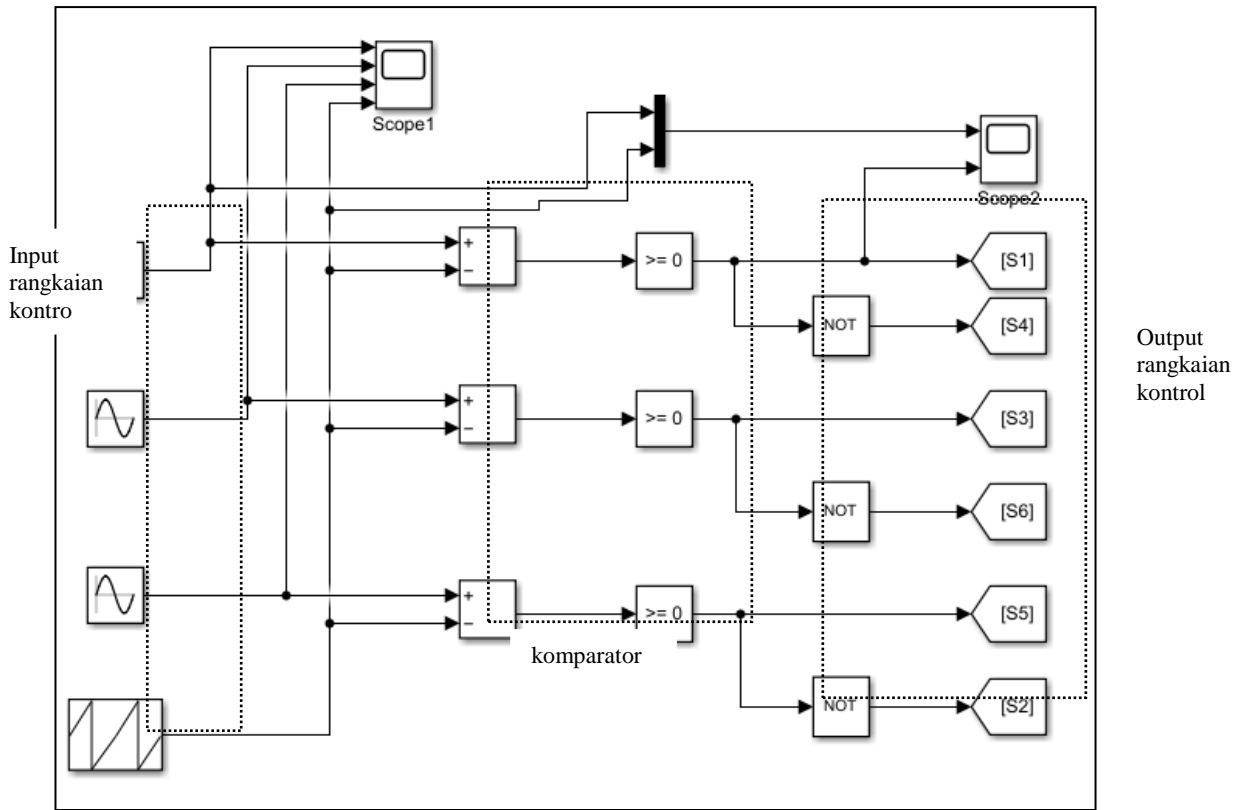
### 3. METODOLOGI

Langkah awal penelitian ini ialah mempersiapkan penelitian melalui studi literatur, dan mempelajari inverter dan teknik pengontrolan sesuai digunakan untuk PLTS dan menghasilkan rendah harmonisa. Setelah mengidentifikasi jenis inverter yang akan digunakan kemudian dilanjutkan dengan mengidentifikasi teknik kontrol pensaklaran yang menghasilkan rendah harmonisa. Pemodelan teknik kontrol SPWM yang akan digunakan sebagai pengontrolan inverter dan mensimulasikannya dengan menggunakan software MATLAB SIMULINK. Untuk mendapatkan pulse width modulation (PWM) diperlukan dua sumber pada rangkaian kontrol. Pertama, sumber gelombang sinusoidal yang disebut sebagai gelombang modulasi amplitudo. Kedua, sumber gelombang segitiga yang disebut dengan gelombang pembawa.

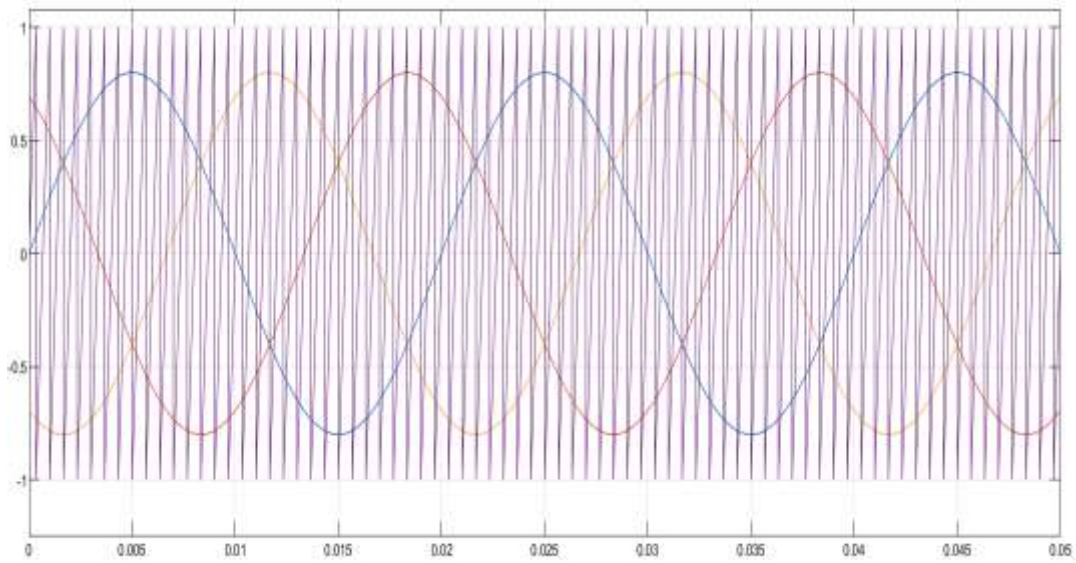
Dengan menggunakan komparator kedua gelombang sinusoidal dan gelombang segi tiga ini dibandingkan. Hasil keluaran dari rangkaian kontrol ini berupa gelombang yang berbentuk pulsa (high dan low). Apabila nilai gelombang modulasi amplitude lebih besar dari nilai gelombang pembawa maka keluaran komparator akan HIGH. Apabila nilai gelombang modulasi amplitude lebih kecil dari nilai gelombang pembawa maka keluaran komparator akan LOW. Rangkaian kontrol mempunyai enam gelombang keluaran yang digunakan untuk mengontrol pensaklaran enam buah semikonduktor pada inverter. Kemudian dilanjutkan dengan memodelkan inverter dan mensimulasikannya dengan menggunakan software MATLAB SIMULINK. Rangkai inverter seperti pada gambar 2. Urutan pengontrolan semikonduktor seperti yang tertera pada tabel 1. Keluaran dari inverter di analisa hasil simulasi dari teknik pengontrolan SPWM dan menganalisa hasil simulasi dari pemodelan inverter. Pengabungan pemodelan inverter dan teknik pengontrolannya dan mensimulasikannya dengan menggunakan software MATLAB SIMULINK. Menganalisa hasil simulasi inverter dengan teknik pengontrolan SPWM. Jika inverter menghasilkan harmonisa sesuai dengan standard IEC maka akan dilanjutkan ke analisa. Namun jika harmonisa masih belum memenuhi standard IEC maka proses akan ke pengecekan ke proses desain.

### 4. HASIL DAN PEMBAHASAN

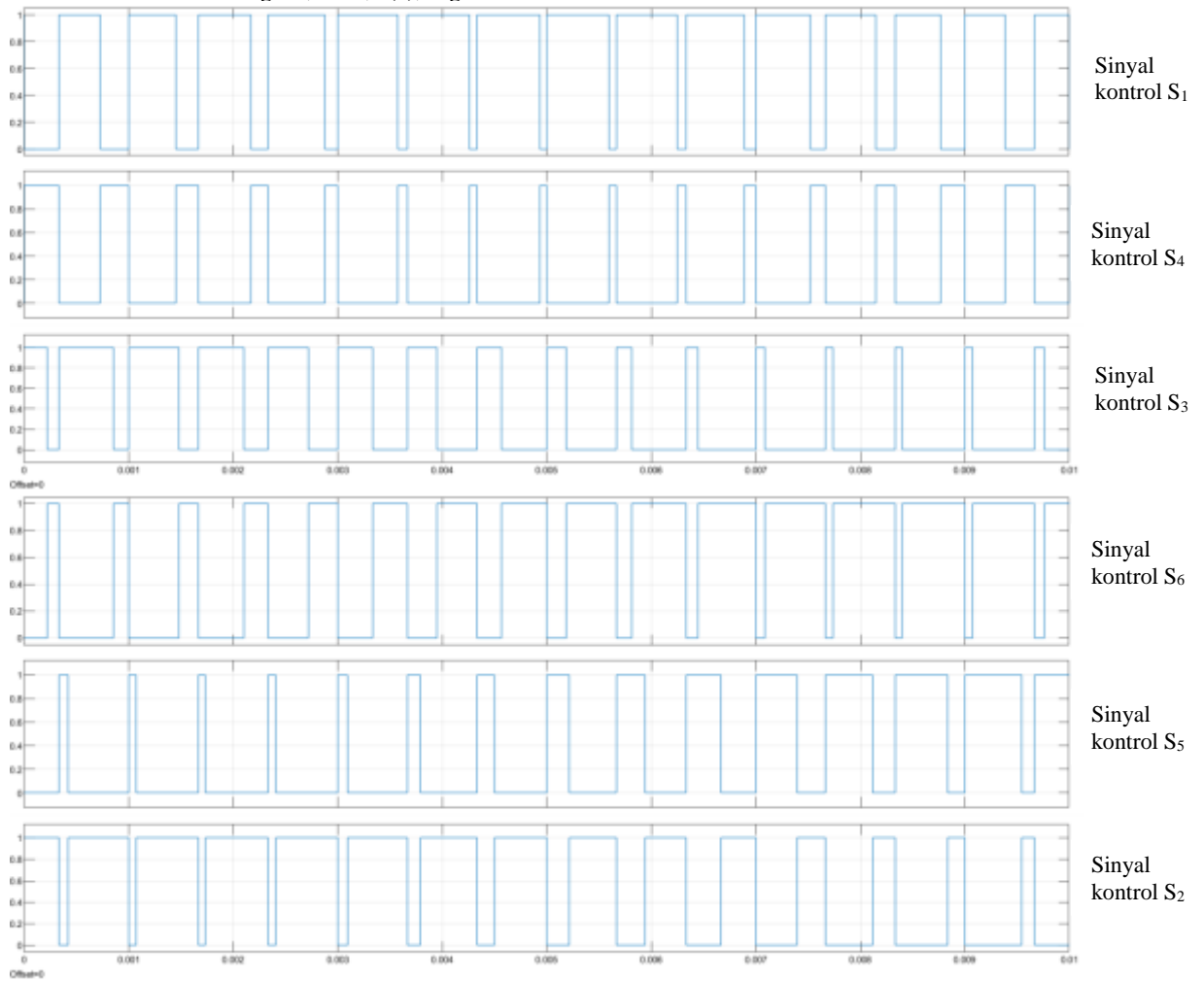
Model rangkaian kontrol



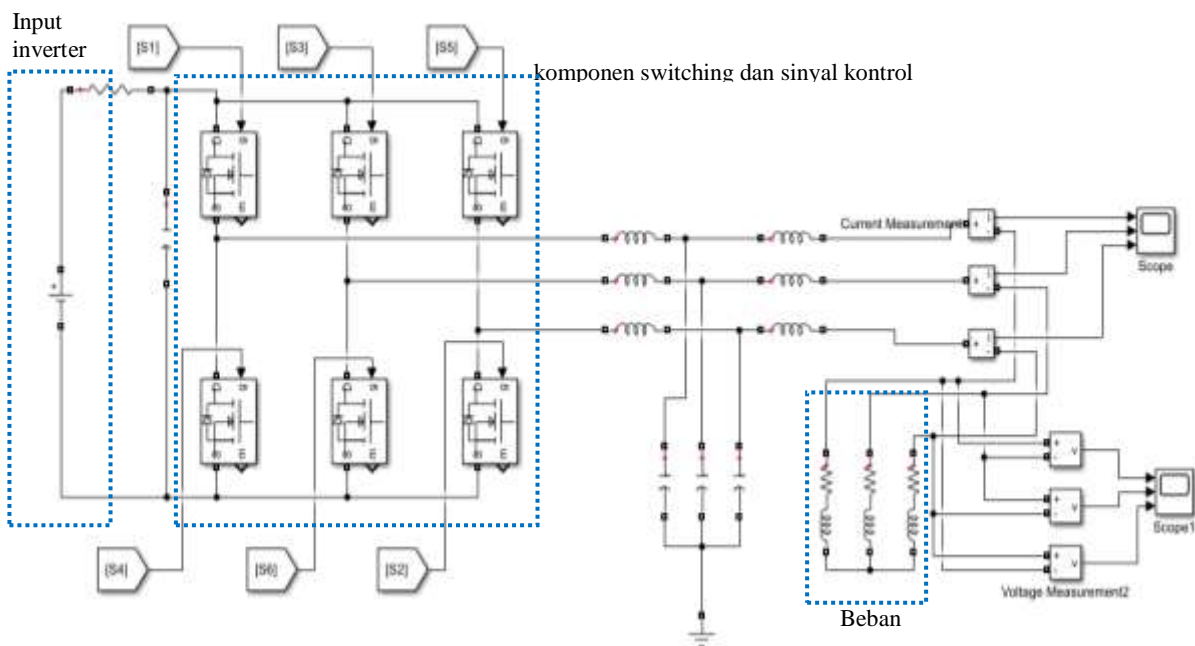
Gambar 1  
Model rangkaian pengontrolan switching dari inverter tiga fasa



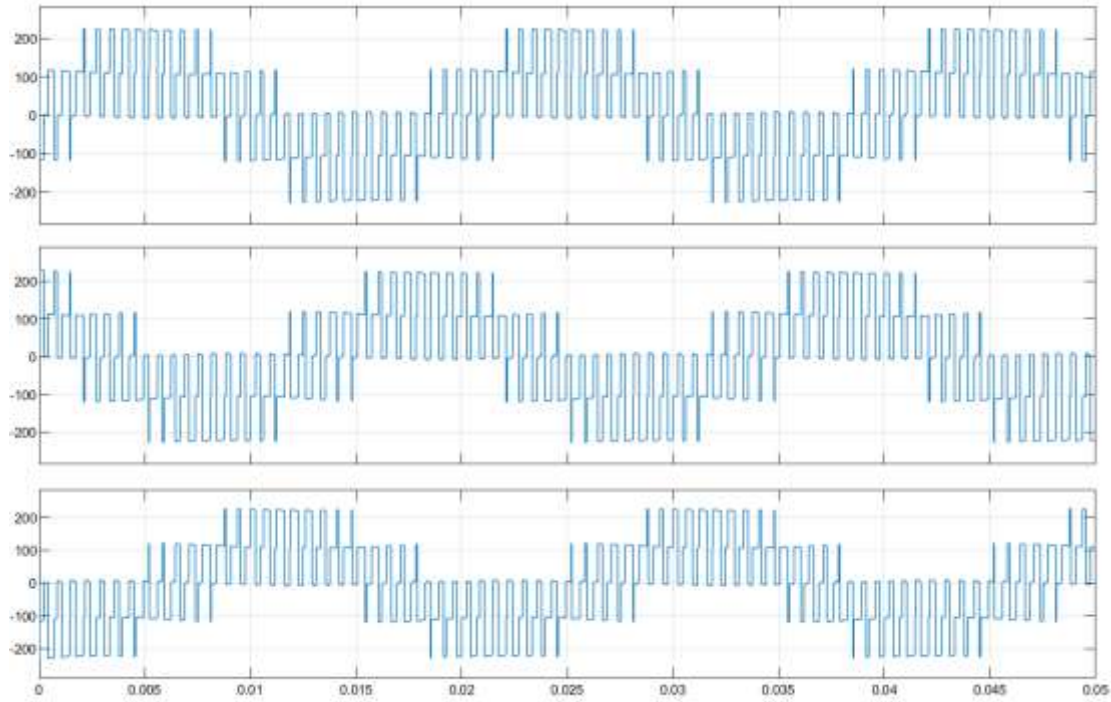
Gambar 2  
Sinyal masukan rangkaian pengontrol



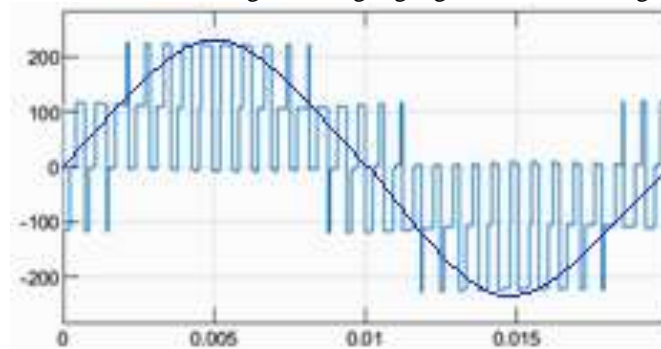
Gambar 3  
Gelombang keluaran rangkaian kontrol



Gambar 4  
Model inverter tiga fasa dengan MathLab Simulink Bentuk Keluaran Gelombang Tegangan

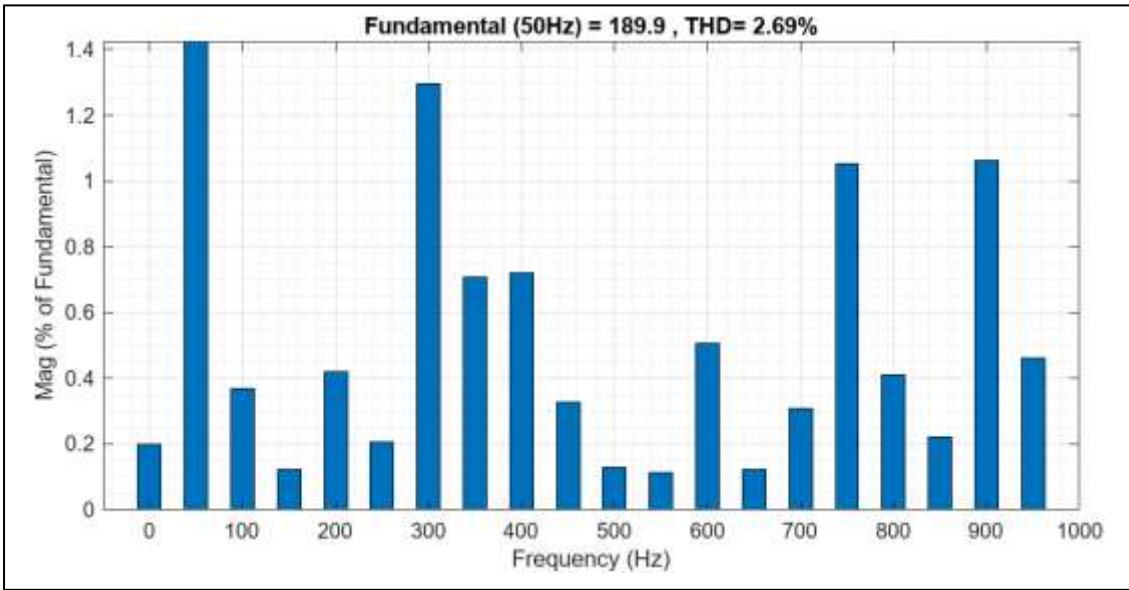


Gambar 5  
Bentuk keluaran gelombang tegangan dari inverter tiga fasa



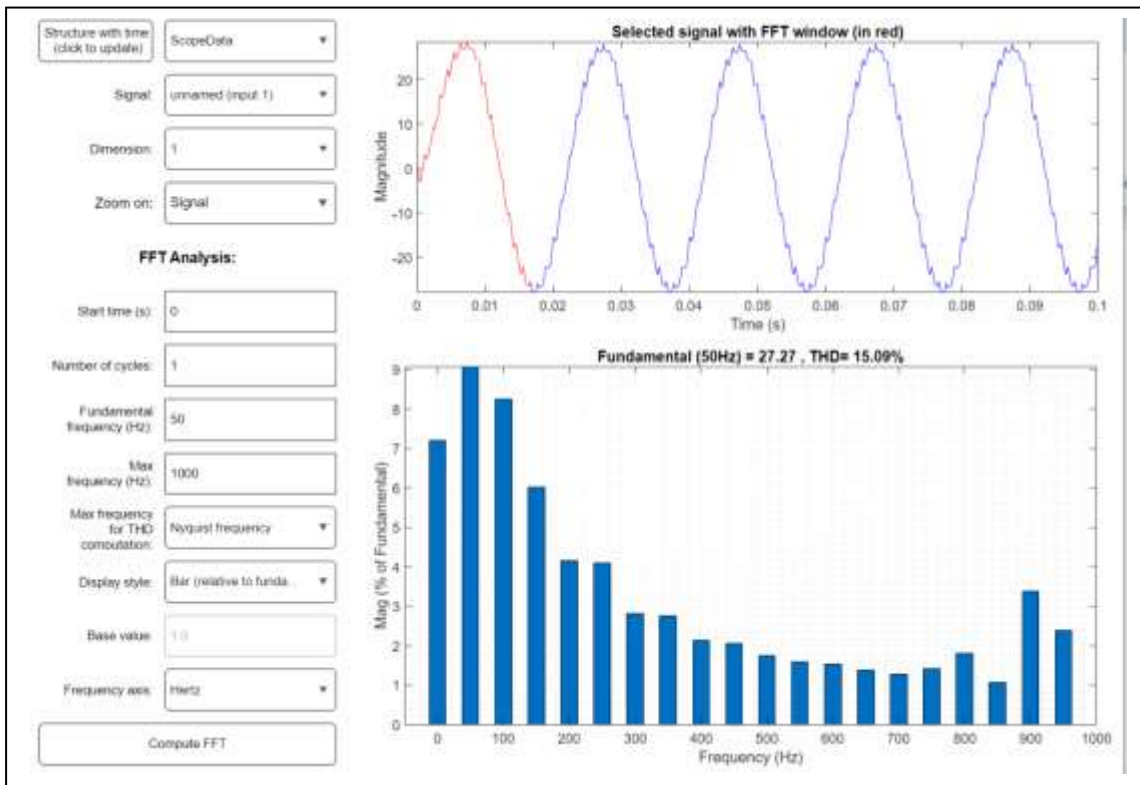
Gambar 6  
Bentuk gelombang keluaran tegangan rata-rata

Gambar 6 memperlihatkan bentuk gelombang tegangan keluaran inverter tiga fasa (warna biru muda) dan rata-rata gelombang tegangan keluaran inverter tiga fasa (warna biru tua). Dari bentuk gelombang tegangan rata-rata dapat dilihat bahwa sudah mendekati sinusoidal sempurna. Spektrum harmonisa untuk keluaran gelombang tegangan seperti pada Gambar 7. Dalam spektrum ini terlihat adanya nilai tegangan pada frekwensi nol (0) yang merupakan komponen DC. Komponen DC ini terjadi akibat adanya asimetri pada tegangan keluaran disebabkan oleh inyal keluaran rangkaian kontrol untuk menyalakan komponen transistor. Komponen DC yang timbul ini hanya sekitar 1.2 % dari tegangan fundamental. THDv dari gelombang keluaran inverter ialah sebesar 3.32 %. Nilai ini sudah memenuhi standard yaitu di bawah 5 % dan bentuk gelombang yang dihasilkan sudah mendekati sinusoidal sempurna



Gambar 7 Bentuk keluaran gelombang tegangan dan spektrum harmonisa dari gelombang tegangan keluaran dari inverter tiga fasa

Bentuk Gelombang Keluaran Arus



Gambar 8 Bentuk gelombang arus dan spektrum harmonisa dari inverter tiga fasa





## 5. KESIMPULAN

Pemodelan dan simulasi terhadap inverter tiga fasa dengan teknik pengontrolan pensaklaran sudah dilakukan dengan menggunakan software MathLab Simulink. Hasil simulasi menunjukkan bahwa Total Harmonisa Tegangan (THDv) yang dihasilkan oleh inveter sebesar 2.69 %. Ini berarti bentuk gelombang keluaran dari inverter ini sudah sangat mendekati sinusoidal sempurna.

## 6. SARAN

Sebaiknya perlu dipertimbangkan lebih lanjut implementasi inverter tiga fasa ini untuk mendapatkan hasil yang jauh lebih baik.

## 7. DAFTAR PUSTAKA

- Ogbomo OO, Amalu EH, Ekere NN, Olagbegi, PO., "A review of photovoltaic module technologies for increased performance in tropical climate", *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 2017;75:1225-1238.
- Ishaque K, Salam Z, Shamsudin A, Amjad M., "A direct control based maximum power point tracking method for photovoltaic system under partial shading conditions using particle swarm optimization algorithm", *Applied Energy*, 2012;99: 414-422.
- Nisja, I., Idris, M. H., M. Syafrudin, Hardi, S., Isa, M., "The Effect of Harmonic Distortion on the Performance of Differential Relay for Distribution Transformer Protection", *Applied Mechanics and Materials* Vol. 793 pp 182-186 Trans Tech Publications, Switzerland (2015)
- Nagaraj, C. and K. M. Sharma, "Improvement of harmonic current compensation for grid integrated PV and wind hybrid renewable energy system", 2016 IEEE 6th Int. Conf. Power Systems (ICPS), New Delhi, 2016, pp. 1–6.
- M. Madrigal, E. Muljadi and V. Gevorgian, "Harmonics in a Wind Power Plant", V. Preciado and Instituto Tecnológico de Morelia, Mexico, National Renewable Energy Laboratory, IEEE Power and Energy Society General Meeting Denver, Colorado, 2015.
- G Shafiullah dan Aman T O, 2015, "Analysis of Harmonics with Renewable Energy Integration into the Distribution Network", Conference Paper · IEEE Innovative Smart Grid Technologies - Asia (ISGT ASIA) November 2015.
- M. Irwanto1, N.Gomesh, B. Ismail, H. Alam, M. Masri1, B. S. Kusuma, "Performance of Nine-Level Transformerless Photovoltaic Powered Inverter (TPVPI) Using Technique of Equal Maximum Phase Delay Time", *Journal of Physics: Conference Series* 1529 (2020).
- Indra Nisja, "Performance of current transformer operate under harmonic condition and their effects on transformer differential protection", *MATEC Web of Conferences* 159, 02075 2018.
- John Cheng, Application Of IEEE Std 519 Harmonic Limits, "IEEE Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems", (2014).
- M. Calais, J. Myrzik, and T. Spooner, "Inverters for Single-phase Grid Connected Photovoltaic Systems – An Overview", in *Proc. IEEE, PESC'02*, vol. 2 pp. 1995–2000, 2002
- S. B. Kjaer, J. K. Pedersen, and F. Blaabjerg, "A Review of Single-Phase Grid-Connected Inverters for Photovoltaic Modules", *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 41, no. 5, 2005.
- L. Hassaine, E. Olías, J. Quintero, and V. Salas, "Overview of Power Inverter Topologies and Control Structures for Grid connected Photovoltaic Systems", *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, vol. 30, pp. 796–807, Feb. 2014.