

Implementasi Sinkronisasi Jaringan dengan Inverter Berbasis SPWM Menggunakan ZCD

By Saidah Saidah

Implementasi Sinkronisasi Jaringan dengan Inverter Berbasis SPWM Menggunakan Zero Crossing Detector

Ervin Mey Hermawan¹ dan Saidah²
^{1,2} Universitas Bhayangkara Surabaya
Jl. Ahmad Yani 114, Surabaya 60231
e-mail: lunamamba96@gmail.com

Abstrak—Desain sinkronisasi inverter terhadap jaringan listrik PLN diharapkan sebagai sumber energi alternatif untuk penambahan daya pada suatu beban sistem satu fasa. Dalam proses sinkronisasi menggunakan metode *zero crossing* detektor untuk mendeteksi siklus dan sudut fasa sinyal sinusoidal pada sumber jaringan listrik PLN. Penelitian ini bertujuan merancang sebuah inverter berbasis pembangkit sinyal SPWM yang dikontrol arduino uno dengan pembacaan sinyal dari metode *zero crossing* detektor. Dari pembacaan *zero crossing* detektor tersebut agar inverter menghasilkan gelombang sinyal sinusoidal sesuai dengan keperluan sinkronisasi pada jaringan listrik PLN untuk menyuplai beban lampu pijar. Dari hasil perancangan, output inverter mengandung THD sebesar 3,85%, hasil sinkronisasi output inverter terhadap jaringan listrik PLN mengandung THD sebesar 4,1%, dan Perbedaan sudut fasa antara output inverter dengan jaringan listrik PLN sebesar 8,2°. Dari hasil pengujian tanpa sinkronisasi output inverter dapat menyuplai beban lampu pijar maksimum sebesar 55W, dan pada proses output inverter sinkronisasi dengan jaringan PLN setelah menggunakan transformator isolasi dapat menyuplai beban lampu pijar maksimum sebesar 100W.

Kata kunci: Sinkronisasi, Zero Crossing Detektor, Arduino Uno, Inverter, SPWM.

Abstract—Design of the inverter synchronization to the grid is expected as an alternative energy source for the addition of power in a single phase system load. In the process of synchronization using the *zero crossing* detector for detecting cycle and the phase angle of a sinusoidal signal at the source of the electricity network. This research aims to design an inverter-based SPWM signal generator controlled arduino uno with the reading of the signal from the *zero crossing* detector method. From the reading of the *zero crossing* detector so that the inverter generates a sinusoidal signal waveform in accordance with the purpose of synchronizing the electricity network to supply the incandescent lamp load. From the results of the design, the inverter output contains a THD of 3.85%, the result of synchronizing the inverter output to the grid contains a THD of 4.1%, and the phase angle difference between the inverter output to the grid of 8.2°. From the test results without synchronizing the inverter output can supply the maximum load of 55W incandescent bulbs, and in the process of synchronizing the inverter output to the grid after using an isolation transformer can supply a maximum load of 100W incandescent lamp.

Keywords: Synchronize, Zero Crossing Detector, Arduino Uno, Inverter, SPWM.

I. PENDAHULUAN

Kebutuhan Energi semakin meningkat seiring dengan perkembangan teknologi yang semakin meluas. PLN (Perusahaan Listrik Negara) sebagai penyedia listrik dituntut untuk menyalurkan daya yang cukup besar untuk memenuhi akan kebutuhan listrik. Dalam memenuhi keperluan daya listrik tersebut dapat digunakan daya listrik eksternal melalui serangkaian inverter yang terhubung dengan grid listrik PLN.

Inverter merupakan salah satu konversi mengubah sumber listrik DC menjadi sumber listrik AC dengan kemampuan daya dan frekuensi yang diinginkan. Beberapa inverter dapat mengeluarkan output gelombang *square wave*, *modified sine wave*, dan *pure sine wave*. Salah satu metode untuk mendapatkan gelombang *pure sine wave* adalah memodulasi gelombang DC dengan teknik *multiple pulse width modulation* (MPWM). Penelitian yang telah

menerapkan metode MPWM untuk menghasilkan output gelombang AC murni dengan sinkronisasi jaringan PLN yaitu pada penelitian [1], dimana output inverter dihasilkan oleh modulasi DC (PWM) dengan teknik MPWM dapat disinkronisasi dengan jaringan PLN dan dibantu oleh teknik *zero crossing* detektor yaitu mendeteksi persilangan nol pada jaringan listrik PLN.

Selain MPWM terdapat metode lain yaitu SPWM, SPWM adalah metode *Sinusoidal Pulse Width Modulation* merupakan metode yang tepat memodulasi inverter untuk menghasilkan output sinus murni dan dapat mengurangi harmonisa dibawah 10% [2].

Namun bentuk gelombang output inverter dengan metode modulasi MPWM, bentuknya tidak sama bila dibandingkan dengan gelombang sinus listrik jaringan PLN. Hal itu karena *zero crossing* detektor yang digunakan belum maksimal dan sudut fasa antara kedua sumber listrik masih berbeda. Untuk mengatasi hal itu dapat diatasi dengan

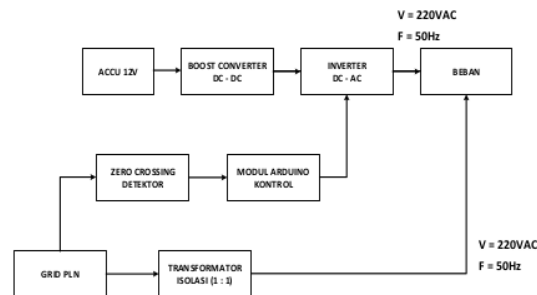
mengolah metode modulasi MPWM dengan SPWM agar *output inverter* tidak berubah ketika *output inverter* disinkronisasi dengan jaringan PLN. Pada pembangkit sinyal SPWM memiliki beberapa perbedaan terhadap pembangkit sinyal MPWM diantaranya pembangkit SPWM memiliki perbedaan Sinyal referensi diambil sebagai bentuk gelombang sinusoidal sedangkan sinyal pembawa diambil sebagai bentuk gelombang segitiga dalam metode ini, Lebar pulsa dalam SPWM tidak sama karena sinyal referensi diambil sebagai bentuk gelombang sinusoidal, Amplitudo bentuk gelombang sinusoidal juga tidak konstan, Lebar pulsa gerbang ditentukan oleh titik potong dari bentuk gelombang sinusoidal dan segitiga, Frekuensi referensi output SPWM bergantung pada frekuensi sinyal referensi (sinyal segitiga), Frekuensi dasar output SPWM bergantung pada frekuensi sinyal fundamental (sinyal sinusoidal), Jumlah pulsa setiap setengah siklus ketika amplitudo bentuk gelombang segitiga menjadi maksimum dan bentuk gelombang sinusoidal menjadi nol, Jumlah pulsa setiap setengah siklus ketika amplitudo bentuk gelombang segitiga dan sinusoidal menjadi nol pada saat yang sama. Sedangkan pembangkit sinyal MPWM memiliki perbedaan pada lebih dari satu pulsa setiap setengah siklus dalam MPWM, Gerbang pulsa digunakan untuk mengontrol tegangan output inverter serta mengurangi harmonisa, Besar tegangan dan lebar pulsa sama dalam metode MPWM, Sinyal referensi dan sinyal pembawa frekuensi yang lebih tinggi dibandingkan dalam metode ini untuk menghasilkan lebih dari satu pulsa penggerak, Jumlah pulsa gerbang tergantung pada frekuensi pembawa sedangkan tegangan output tergantung frekuensi sinyal referensi.

Penelitian ini merancang sebuah *inverter* satu fasa berbasis SPWM yang dikontrol arduino dengan metode *zero crossing* detektor sebagai pendeteksi titik nol. *Output* dari *zero crossing* digunakan sebagai pemicu PWM untuk membentuk sinyal sinusoidal PWM. Sinyal tersebut diolah *inverter* untuk menghasilkan *output* menyerupai sumber listrik PLN berupa gelombang sinus dengan tegangan dan frekuensi yang sama. *Output* dari *inverter* tidak menghasilkan perbedaan fasa ketika dilakukan sinkronisasi dengan sumber jaringan listrik PLN. Hasil dari sinkronisasi kedua sumber listrik AC dilakukan pengujian terhadap beban.

II. METODE PENELITIAN

Perancangan sistem kontrol sinkronisasi jaringan (*grid connected*) dengan *inverter* berbasis SPWM menggunakan metode *zero crossing* detektor pada sistem satu fasa adalah kemampuan pengaturan sinkronisasi *output inverter* terhadap jaringan listrik PLN dalam menyalurkan daya listrik ke beban. Konfigurasi sistem dapat ditunjukkan pada Gambar 1.

Pada tahap pengaturan *output inverter*, mikrokontroler arduino mengatur sinkronisasi dengan cara membaca *input* dari sinyal gelombang kotak yang dihasilkan oleh *zero crossing* detektor. *Zero crossing* detektor mendeteksi peralihan siklus positif dan negatif dari sinusoidal listrik PLN. Dalam proses mendeteksi peralihan siklus sinusoidal PLN, operasional *amplifier* bertindak sebagai pembanding



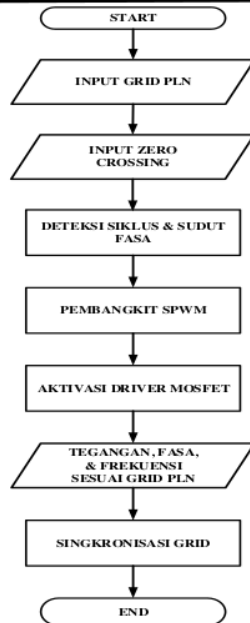
Gambar 1. Blok Diagram Seluruh Sistem Inverter Grid Connected

antara kedua *input* tegangan yaitu *input* peralihan setengah siklus sinusoidal pln dan *input* tegangan referensi. Ketika *output* dari *zero crossing* detektor bernilai *high* (5V) maka mikrokontroler arduino akan mengaktifkan sinyal SPWM pada inverter. Sinyal SPWM digunakan untuk mengaktifkan rangkaian *full bridge mosfet* kemudian dilakukan proses LCL Filter guna menghasilkan gelombang listrik menyerupai sinusoidal.

Mengacu blok diagram gambar 1, pada bagian *accu* berperan sebagai suplai utama dari inverter yang sebelumnya tegangan dinaikan oleh *boost converter*. Pada blok *boost converter* digunakan untuk menaikkan tegangan rendah (12Vdc) ke tegangan tinggi (360Vdc). Blok inverter merupakan penyaklaran sinyal SPWM menggunakan komponen mosfet tegangan tinggi dengan topologi *full bridge*. Pada blok *grid PLN* merupakan sample data dari *input* rangkaian *zero crossing* detektor dan digunakan untuk menyuplai beban. *Zero crossing* detektor digunakan untuk mengambil sample dari sinyal sinusoidal jaringan listrik PLN kemudian *output* dari rangkaian *zero crossing* berupa sinyal data PWM yang dapat dibaca oleh *input* analog dari arduino.

Modul arduino merupakan pusat kontrol untuk mengolah data dari hasil pembacaan rangkaian *zero crossing* dan digunakan menghasilkan sinyal SPWM untuk menggerakkan *full bridge mosfet* pada blok inverter. Pada bagian blok transformator isolasi digunakan mengisolasi perangkat *fullbridge mosfet inverter* terhadap ground rangkaian dan netral grid secara langsung. Pada blok beban merupakan beban lampu pijar dengan beberapa ukuran daya sebesar 5Watt hingga 100Watt. Beban digunakan menguji kemampuan inverter ketika dilakukan sinkronisasi terhadap *output inverter* dengan *grid PLN* atau tidak dilakukan sinkronisasi hanya menguji kemampuan inverter dalam menyuplai beban.

Flowchart sinkronisasi dijelaskan pada Gambar 2 *Input grid pln* merupakan sinyal sinusoidal mempunyai nilai tegangan sebesar 220VAC diturunkan menggunakan transformator menjadi 5VAC. Kemudian setelah tegangan diturunkan sinyal sinusoidal tersebut digunakan sebagai *input zero crossing* detektor. *Zero crossing* detektor dalam mengolah *input* sinusoidal melakukan proses perbandingan dengan sinyal referensi sebesar 5VAC. Proses perbandingan sinyal *zero crossing* detektor dalam mendeteksi persilangan nol volt pada sinyal sinusoidal, ketika peralihan siklus positif menuju negatif dan dari siklus negatif menuju siklus positif.



Gambar 2. Flowchart Singkronisasi Grid Connected Inverter dengan PLN

Dari proses perbandingan perubahan siklus sinusoidal tersebut zero crossing menghasilkan serangkaian output sinyal gelombang kotak (square wave) sesuai siklus dan sudut fasa sinyal sinusoidal grid pln.

Dalam pembangkit SPWM, arduino membaca sinyal output zero crossing untuk mengetahui data sudut fasa dan urutan siklus sinusoidal. Hal ini bertujuan untuk mengaktifkan sinyal SPWM sesuai sinyal sinusoidal grid PLN. Setelah proses pembacaan data zero crossing, arduino membangkitkan sinyal SPWM untuk menyaklarkan driver mosfet yang terdiri rangkaian isolasi optocoupler dan rangkaian fullbridge mosfet.

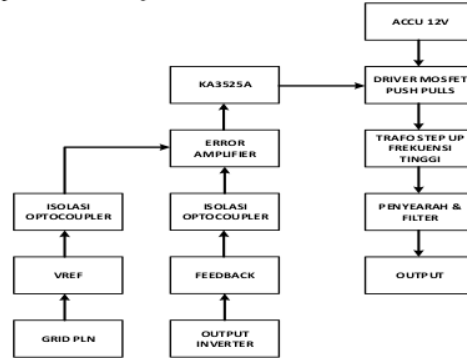
Sinyal SPWM masih berupa sinyal PWM dengan frekuensi tinggi, maka memerlukan filter untuk mengurangi frekuensi tinggi dan meloloskan frekuensi rendah. Proses filter sinyal SPWM tersebut akan didapatkan bentuk output sinyal sinusoidal. Output sinyal sinusoidal yang dihasilkan sudah mempunyai kesamaan data sinusoidal pln seperti tegangan, sudut fasa, siklus, dan frekuensi. Sebelum dilakukan singkronisasi output inverter dan sinoidal grid PLN, harus dilakukan pencocokan sinyal melalui osiloskop dan melakukan pengukuran tegangan menggunakan alat ukur voltmeter.

III. DESAIN SISTEM KONTROL SINGKRONISASI

Desain Perancangan perangkat keras dalam membangun desain singkronisasi inverter grid connected meliputi perangkat keras inverter dan perangkat keras boots converter. Pada bagian ini rangkaian Inverter menghasilkan gelombang sinusoidal dan boots converter menghasilkan tegangan tinggi searah (DC) untuk menyuplai inverter agar output inverter mempunyai tegangan puncak sesuai tegangan grid PLN.

1. Boost Converter

Boost converter berfungsi untuk menaikkan sumber tegangan 12 Volt DC berasal dari Accu menjadi 320 Volt DC. Proses penyaklarkan mosfet menggunakan topologi push pull untuk menyaklarkan sisi rendah mosfet dengan tipe sinyal pembangkit square wave pwm. Perancangan perangkat keras dari boost converter dijelaskan pada blok diagram gambar 3. Rangkaian boost converter membutuhkan tegangan kerja sebesar 12V DC. Driver mosfet boost converter menggunakan topologi push pulls, dimana driver mosfet sisi rendah ganda tidak memerlukan kapasitor bootstrap.



Gambar 3. Blok Diagram Perangkat Keras Dari Boost Converter

Boost converter menggunakan transformator step up frekuensi tinggi dengan berinti ferite. Frekuensi yang digunakan untuk menginduksi transformator step up sebesar 50KHz. Untuk menentukan jumlah kumparan primer pada transformator menggunakan persamaan [3] :

$$N_{pri} = \frac{V_{in(nom)} \cdot 10^8}{4 \cdot F \cdot B_{max} \cdot A_c} \quad (1)$$

Keterangan :

N_{pri} = Banyaknya kumparan primer yang dibutuhkan (turn)

$V_{in(nom)}$ = Nominal input sumber tegangan DC (Volt)

F = Frekuensi kerja transformator (Hz)

B_{max} = kerapatan fluks transformator (gauss)

A_c = Area Effective Cross Sectional transformator (Cm²)

Kemudian menentukan kumparan bagian sekunder dengan persamaan :

$$N_{skunder} = N \cdot N_{pri} \quad (2)$$

Keterangan :

$N_{skunder}$ = Kumparan skunder

N = Rasio tegangan skunder dan primer

N_{pri} = Banyaknya kumparan primer yang dibutuhkan (turn)

Kontrol pada boost converter menggunakan modulator IC KA3525A sebagai mengatur frekuensi dan lebar siklus pulsa pwm. Untuk mengatur frekuensi pada modulator IC KA3525A dapat menggunakan persamaan (3) [4] :

$$F = \frac{1}{C_T(0.7 R_T + 3 R_D)} \quad (3)$$

Keterangan :

F = Frekuensi

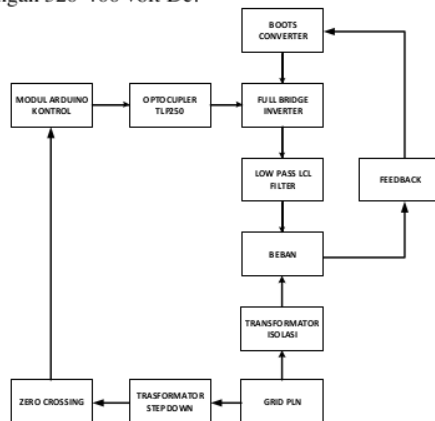
C_T = Waktu Kapasitor

R_T = Waktu Resistor

R_D = Deadtime Resistor

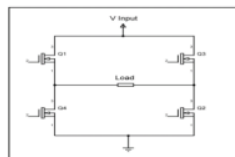
2. Inverter

Inverter berfungsi untuk menghasilkan gelombang sinusoidal dengan rating output sebesar 220-230VAC dan frekuensi 50 Hz. Topologi yang digunakan adalah fullbridge inverter dibantu IR2110 sebagai driver sisi tinggi dan sisi rendah mosfet agar dapat bekerja pada input sumber tegangan 320-400 volt Dc.



Gambar 4. Blok Diagram Perangkat Keras Dari Inverter

Perancangan perangkat keras dari inverter dijelaskan pada blok diagram gambar 4. Output dari boost converter digunakan untuk menyuplai input dari power inverter yang menggunakan tegangan kerja sebesar 230-400VDC. Sumber tegangan tinggi DC tersebut akan diolah pada proses penyaklaran mosfet dengan topologi rangkaian full bridge. Topologi full bridge inverter merupakan topologi penyaklaran mosfet memiliki empat buah swiching device yang terbagi dua bagian, salah satu bagian swiching device harus aktif secara bergantian.



Gambar 1 Topologi Full Bridge Inverter

Tabel 1. Pola Pensaklaran Topologi Full Bridge

Q1	Q2	Q3	Q4	V _o
SPWM	SPWM	SPWM	SPWM	
ON	ON	OFF	OFF	+V _o
ON	OFF	ON	OFF	0
OFF	OFF	ON	ON	-V _o
OFF	ON	OFF	ON	0

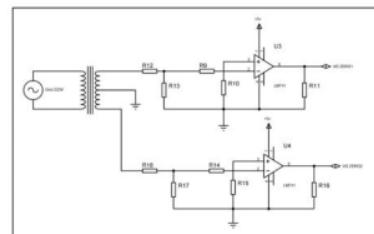
Output rangkaian full bridge kemudian akan di filter menggunakan LCL filter yang bekerja menyaring frekuensi tinggi dari sinyal SPWM dan meloloskan frekuensi rendah. Dari proses filter sinyal SPWM akan menghasilkan bentuk sinyal baru yaitu sinyal sinusoidal dengan frekuensi dan amplitudo yang sama sesuai grid PLN. Beban yang digunakan adalah lampu pijar yang terpasang pada kedua sumber listrik AC, yaitu sumber dari output inverter dan sumber grid PLN yang di isolasi menggunakan transformator. Transformator isolasi digunakan untuk mengisolasi output inverter terhadap netral grid PLN, karena output dari inverter masih terhubung ground pada rangkaian full bridge mosfet.

Zero crossing detektor digunakan mendeteksi peralihan siklus pada grid pln agar output pada inverter mempunyai kesamaan frekuensi, siklus, dan sudut sinusoidal seperti grid PLN. Transformator step down digunakan untuk menurunkan tegangan grid PLN dan memberikan isolasi terhadap rangkaian zero crossing. Setelah tegangan diturunkan kemudian sinyal diproses menggunakan operasional amplifier untuk mengkonversi sinyal yang bisa dibaca pada analog input arduino. Arduino bertugas membaca analog input dari output sinyal zero crossing detektor kemudian membangkitkan sinyal SPWM yang digunakan pada penyaklaran full bridge mosfet.

1

3. Zero Crossing Detektor

Zero Crossing Detektor adalah rangkaian yang digunakan untuk mendeteksi gelombang sinus saat melewati area tegangan nol. Perseberangan area nol yang dideteksi merupakan peralihan siklus dari positif menuju negatif dan peralihan negatif menuju positif. Pada gambar 6, merupakan rangkaian dari zero crossing detektor menggunakan operational amplifier sebagai komparator non inverting untuk membandingkan input 9 volt ac yang terlebih dahulu diturunkan menggunakan transformator dengan tegangan refrensi.



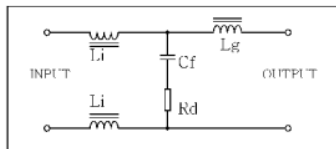
Gambar 6. Rangkaian Zero Crossing Detektor

4. Driver Isolasi Mikrokontroller Arduino

Arduino merupakan pusat kontroller pada blok inverter untuk megolah sinyal SPWM 19 KHz, dan mengolah data dari output zero crossing detektor untuk mengatur sudut dan siklus output inverter. Sehingga memerlukan isolasi untuk melindungi arduino ketika inverter mengalami kerusakan fatal. Pada prototype ini menggunakan isolasi optocoupler TLP 250 dengan kemampuan data input maksimal 33KHz sehingga pada output isolasi tidak merubah bentuk sinyal SPWM.

5. Low Pass LCL Filter

Low pass LCL filter digunakan untuk menyaring frekuensi tinggi yang dihasilkan spwm dan meloloskan frekuensi rendah sebesar 50Hz sehingga bentuk dari spwm dapat membentuk menyerupai sinusoidal. Pada Gambar 7, merupakan rangkaian dari low pass LCL filter dimana kumparan yang diletakkan secara seri dengan sumber tegangan akan meredam frekuensi tinggi dan meneruskan frekuensi rendah, komponen rangkaian low pass LCL filter berupa komponen induktor(L) dan kapasitor(C). Rangkaian ini juga berfungsi sebagai filter harmonisa pada sistem distribusi yang menjaga agar gelombang tegangan atau arus tetap sinusoidal.



Gambar 7. Rangkaian Low Pass LCL Filter

Untuk mengetahui frekuensi yang akan difilter dengan menetapkan resonan frekuensi cut-off dari desain LCL filter menggunakan persamaan (4) [5] :

$$F_{res} = \frac{1}{2\pi} \times \sqrt{\frac{L_i + L_g}{L_i \times L_g \times C_f}} \quad (4)$$

Keterangan :

F_{res} = Resonan Frekuensi cut-off (Hz)

π = phi (3,14)

L_i = nilai dari komponen induktor (H)

L_g = nilai dari induktor grid (H)

C_f = nilai dari komponen kapasitor (F)

6. Transformator Isolasi

Transformator Isolasi digunakan mengisolasi perangkat fullbridge inverter terhadap netral grid secara langsung. Dalam Transformator isolasi terdapat gulungan primer dan skunder dengan jumlah yang sama atau perbandingan yang sama. Untuk menentukan jumlah gulungan primer dan skunder dapat menggunakan persamaan satuan jumlah gulungan setiap satu volt yaitu pada persamaan (5) [6] :

$$Gpv = \frac{F}{O} \quad (5)$$

Keterangan :

Gpv = Jumlah kumparan setiap satu volt (turn)

F = Frekuensi kerja transformator (Hz)

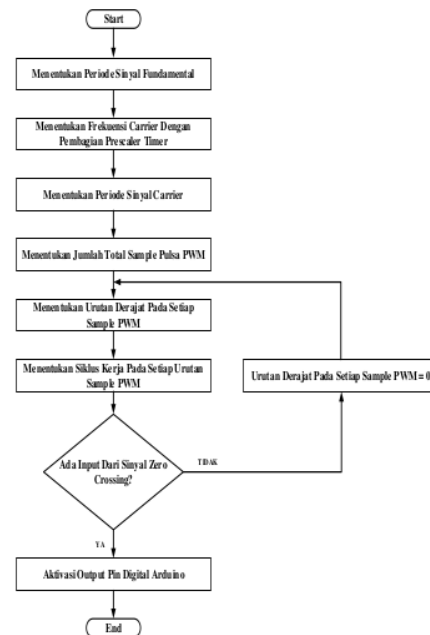
O = Luas penampang inti (cm)

7. Perancangan Software

Perancangan *software* meliputi Pembuatan perangkat lunak konfigurasi program arduino yang menggunakan bahasa pemrograman C++, pengaturan pada program arduino meliputi konfigurasi pembangkit SPWM pada inverter.

Flowchart pembangkit spwm secara digital dapat dijelaskan pada gambar 8. konfigurasi program pembangkit SPWM ditentukan melalui periode waktu gelombang dasar dari sinyal sinusoidal dengan frekuensi 50Hz.

Gelombang dasar merupakan sinyal fundamental sinusoidal mempunyai periode waktu sebesar 20 mili detik, karena spwm dibangkitkan secara digital maka dibutuhkan dua output spwm dengan perbedaan siklus 180° dan memiliki periode waktu sebesar 10 mili detik pada setiap output SPWM. Setelah menentukan periode waktu fundamental, kemudian dilakukan pembagian prescaler timer internal yang dihasilkan oleh kristal osilator mikrokontroler. Dari hasil pembagian prescaler timer untuk menghasilkan frekuensi carrier (pembawa) kemudian menentukan jumlah total sample dan menentukan periode waktu setiap sample pulsa pwm. Sample pulsa pwm merupakan pwm frekuensi tinggi dengan lebar siklus pulsa yang sudah ditentukan sesuai pada urutan derajat sinusoidal.



Gambar 8. Flowchart Pembangkit Spwm Secara Digital

Setelah menentukan urutan derajat sinusoidal pada setiap sample pulsa pwm kemudian menentukan lebar siklus kerja (duty cycle) pada semua sample pwm.

Dalam konfigurasi aktivasi output pin digital arduino dibutuhkan pembacaan dari sinyal zero crossing detektor dengan logika jika arduino membaca output zero crossing maka sample spwm akan aktif sesuai urutan derajat sample terkecil (0°) hingga derajat sample terbesar (180°). Sebaliknya jika arduino tidak membaca output dari zero crossing detektor maka sample spwm berada pada urutan terkecil (0°) secara terus menerus.

Konfigurasi pembangkit Sinusoidal PWM dengan cara mengubah setengah periode gelombang sinus menjadi beberapa sample pulsa yang memiliki lebar sample pulsa mengikuti besar dari amplitudo gelombang sinus.

- Untuk menentukan periode dari frekuensi gelombang fundamental dan frekuensi pwm (sample) menggunakan persamaan (6) [7].

$$T_f = \frac{1}{F_f} \quad (6)$$

Keterangan :

T_f = Periode waktu fundamental (s).

F_f = Frekuensi fundamental (Hz).

- Berikut persamaan pembagi (prescaler) untuk kebutuhan pembangkit Frekuensi sinyal carrier :

$$\text{Frekuensi carrier} = \frac{F_{xtal}}{(\text{Prescaler} \times F_{interrupt})} \quad (7)$$

Keterangan :

F_{xtal} = Frekuensi kristal osilator.

Prescaler = Pembagi Frekuensi.

$F_{interrupt}$ = Target frekuensi yang dibutuhkan.

- Menentukan periode setiap sample pulsa pwm, dengan menggunakan persamaan berikut:

$$T_{pwm} = \frac{1}{\text{Frekuensi carrier}} \quad (8)$$

Keterangan :

T_{pwm} = Periode waktu pwm (s).

Frekuensi carrier = Frekuensi pwm (Hz).

- Menentukan jumlah total sample untuk setengah periode gelombang sinus menggunakan persamaan :

$$T_s = \frac{1}{2} \left(\frac{T_f}{T_{pwm}} \right) \quad (9)$$

Keterangan :

T_s = Jumlah total (sample) pwm.

T_f = Periode waktu fundamental (s).

T_{pwm} = Periode waktu pwm (s).

- Menentukan tingkat derajat dalam setengah periode sinus untuk masing-masing sample menggunakan persamaan :

$$\text{Sudut} = \frac{\text{Sample } N \cdot \left(\frac{180}{T_s} \right) \cdot \pi}{180} \quad (10)$$

Keterangan :

Sudut = Nilai derajat pada setiap (sample) pwm.

Sample N = Urutan sample pwm dari jumlah total sample pwm.

T_s = Jumlah total (sample) pwm.

π = phi (3,14).

- Menentukan duty cycle dari masing – masing sample menggunakan persamaan :

$$x = \sin(\text{Sudut}) \quad (11)$$

Keterangan :

x = Lebar siklus kerja (duty cycle) dari masing-masing sample.

sin = derajat dalam radian untuk membentuk sinus.

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

Pengujian dilakukan pada inverter dengan SPWM pada Gambar 9. dengan melihat hasil gelombang harmonisa yang terdapat pada output inverter tanpa menggunakan filter dan output inverter menggunakan filter. Pengukuran persentase THD dilakukan menggunakan fitur FFT dengan

mengumpulkan orde dari setiap komponen harmonik yang ditampilkan setelah proses FFT pada osiloskop. Berikut perhitungan persentase THD menggunakan fitur FFT sesuai dengan persamaan [8],[9] :

$$\text{DBV} = 10^{\text{DBC} / \text{skala DB per div}} \quad (12)$$

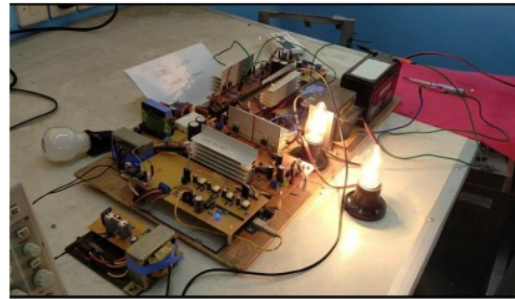
$$\text{THD} = 100 \times \sqrt{\text{DBV}_1 + \text{DBV}_2 + \dots + \text{DBV}_n} \quad (13)$$

Dimana :

DBC = Nilai rms dari pembacaan orde harmonik (DB)

DBV = Tegangan rms dari konversi DB ke Volt (V)

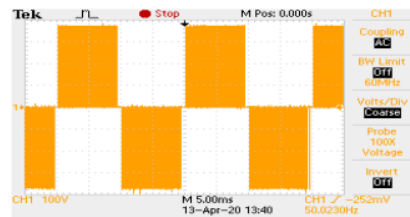
THD = Persentase dari Total Harmonik Distorsi (%)



Gambar 9. Inverter berbasis SPWM

1. Output Inverter Tanpa Menggunakan Filter

Output inverter tanpa menggunakan filter dapat ditunjukkan pada gambar 10., pengamatan dilakukan dengan osiloskop digital untuk mengetahui bentuk sinyal SPWM tegangan tinggi pada rangkaian penyaklaran fullbridge mosfet sebelum dilakukan proses low pass LCL filter.



Gambar 10. Tegangan Output Inverter Tanpa Menggunakan Filter.

Tabel 2, menunjukan data hasil pengukuran FFT untuk mengetahui komponen harmonik dari distorsi sinyal SPWM tegangan tinggi. Persentase dari data komponen harmonik distorsi pada sinyal SPWM tegangan tinggi menunjukan sebesar 32%.

Tabel 2. Komponen Harmonik Dari Tegangan Output Inverter Tanpa Menggunakan Filter

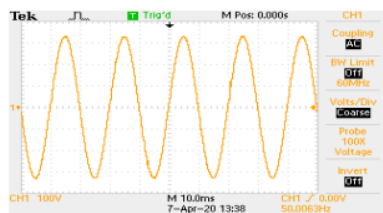
Orde Harmonik	DBC (DB)	DBV (V)	Frekuensi (KHz)
Fund	- 8,4	$14,454 \times 10^{-2}$	19
2	- 11,6	$69,183 \times 10^{-3}$	38
3	- 17,6	$17,378 \times 10^{-3}$	57
4	- 22,4	$57,543 \times 10^{-4}$	76
5	- 24,8	$33,113 \times 10^{-4}$	95
6	- 27,2	$19,054 \times 10^{-4}$	114

7	- 28,8	$13,182 \times 10^{-4}$	133
8	- 30	0,001	152
9	- 31,6	$69,183 \times 10^{-5}$	171
10	- 32,8	$52,480 \times 10^{-5}$	190
11	- 33,6	$43,651 \times 10^{-5}$	209
12	- 34,4	$36,307 \times 10^{-5}$	228
13	- 35,6	$27,542 \times 10^{-5}$	247
14	- 36,4	$22,908 \times 10^{-5}$	266

$$\begin{aligned} \text{THD} &= 100 \times \sqrt{DBV_1 + DBV_2 + \dots + DBV_n} \\ \text{THD} &= 100 \times \sqrt{69,183 \times 10^{-3} + 17,378 \times 10^{-3} + \dots + 22,908 \times 10^{-5}} \\ \text{THD} &= 100 \times \sqrt{0.10237091} \\ \text{THD} &= 32 \% \end{aligned}$$

2. Output Inverter Menggunakan Filter

Output inverter menggunakan filter dapat ditujukan pada gambar 11, pengamatan dilakukan dengan osiloskop digital untuk mengetahui bentuk sinyal SPWM tegangan tinggi pada rangkaian penyaklaran fullbridge mosfet sesudah dilakukan proses low pass LCL filter, dari proses tersebut didapatkan sinyal fundamental (dasar) pada sinyal SPWM, sinyal tersebut berupa sinyal sinusoidal.



Gambar 11. Tegangan Output Inverter Setelah Menggunakan Filter

Tabel 3. Komponen Harmonik Dari Tegangan Output Inverter Menggunakan Filter

Orde Harmonik	DBC (DB)	DBV (V)	Frekuensi (Hz)
Fund	- 23,6	$43,651 \times 10^{-4}$	50
3	- 28,4	$14,454 \times 10^{-4}$	150
5	- 44,4	$36,307 \times 10^{-6}$	250
7	- 55,2	$30,199 \times 10^{-7}$	350
9	- 64,8	$33,113 \times 10^{-8}$	450

$$\begin{aligned} \text{THD} &= 100 \times \sqrt{DBV_1 + DBV_2 + \dots + DBV_n} \\ \text{THD} &= 100 \times \sqrt{14,454 \times 10^{-4} + 36,307 \times 10^{-6} + \dots + 33,113 \times 10^{-8}} \\ \text{THD} &= 100 \times \sqrt{14,850 \times 10^{-4}} \\ \text{THD} &= 3,85\% \end{aligned}$$

Tabel 3, menunjukkan data hasil pengukuran FFT untuk mengetahui komponen harmonik dari distorsi sinyal SPWM tegangan tinggi setelah dilakukan proses *low pass* LCL filter. Persentase dari data komponen harmonik distorsi pada sinyal SPWM tegangan tinggi setelah dilakukan proses *low pass* LCL filter menunjukkan sebesar 3,85%.

3. Output Inverter Menggunakan Filter Dengan Sinkronisasi

Output inverter menggunakan filter dengan sinkronisasi merupakan sinkronisasi output inverter

dengan jaringan listrik PLN pada sistem satu fasa. Sinkronisasi dilakukan untuk menguji proses penyaluran daya pada kedua sumber output inverter dan jaringan listrik PLN untuk menyuplai beberapa variasi beban lampu pijar.

Tabel 4. Komponen Harmonik dari Tegangan Output Inverter Ketika Sinkronisasi

Orde Harmonik	DBC (DB)	DBV (V)	Frekuensi (Hz)
fund	- 20,8	$83,176 \times 10^{-4}$	50
3	- 28	$15,848 \times 10^{-4}$	150
5	- 47,2	$19,054 \times 10^{-6}$	250
7	- 41,6	$69,183 \times 10^{-6}$	350
9	- 52,2	$60,256 \times 10^{-7}$	450

$$\begin{aligned} \text{THD} &= 100 \times \sqrt{DBV_1 + DBV_2 + \dots + DBV_n} \\ \text{THD} &= 100 \times \sqrt{15,848 \times 10^{-4} + 19,054 \times 10^{-6} + \dots + 60,256 \times 10^{-7}} \\ \text{THD} &= 100 \times \sqrt{16,790 \times 10^{-4}} \\ \text{THD} &= 4,1 \% \end{aligned}$$

Tabel 4, menunjukan data hasil pengukuran FFT untuk mengetahui komponen harmonik dari proses sinkronisasi berlangsung pada kedua sumber listrik AC berupa output inverter dengan jaringan listrik PLN. Persentase dari data komponen harmonik distorsi pada proses sinkronisasi menunjukan sebesar 4,1%.

4. Hasil Pengujian Output Inverter Terhadap Beban

Pengujian output inverter tanpa sinkronisasi dilakukan untuk mengetahui kemampuan maksimum inverter dalam menyuplai beberapa variasi beban lampu pijar seperti ditujukan pada tabel 5.

Tabel 5. Hasil Pengujian Tanpa Sinkronisasi Perubahan Tegangan Dan Arus Ketika Penggantian Beban Lampu Pijar

No	Beban Lampu (W)	Tegangan Beban (V)	Arus Beban (A)	Daya (W)	PF
1.	5	224	0,06	13,51	0,99
2.	10	225	0,08	18,52	0,99
3.	15	225	0,07	15,38	0,99
4.	25	227	0,15	34,05	0,99
5.	40	227	0,17	38,90	0,99
6.	55	220	0,23	51,42	0,99

Pengujian output inverter dengan sinkronisasi jaringan listrik PLN dilakukan untuk mengetahui maksimum penambahan daya yang terjadi ketika kedua sumber listrik AC sinkronisasi secara paralel dalam menyuplai beberapa variasi beban lampu pijar seperti ditujukan pada tabel 6.

Tabel 6. Hasil Pengujian Sinkronisasi Perubahan Tegangan dan Arus ketika Penggantian Beban Lampu Pijar

No	Beban Lampu (W)	Tegangan Beban (V)	Arus Beban (A)	Daya (W)	PF
1	5	224	0,06	13,44	0,99
2	10	226	0,08	18,60	0,99
3	15	226	0,07	15,10	0,99
4	25	224	0,15	33,40	0,99
5	40	224	0,16	35,93	0,99
6	55	224	0,23	51,18	0,99
7	80	222	0,33	72,86	0,99
8	100	222	0,43	94,35	0,99

5. Hasil Pengujian Perbedaan Sudut Fasa

perbedaan fasa dapat diketahui dengan menggunakan metode Lissajouse melalui tampilan X-Y pada osiloskop, untuk mengetahui perbedaan fasa dapat menggunakan persamaan (14) dan (15) [10]:

- Bila posisi ellips lissajouse miring kekiri maka menggunakan persamaan :

$$\theta = \sin^{-1} \left(\frac{A}{B} \right) \quad (14)$$

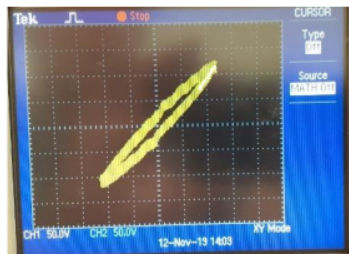
- Bila posisi ellips lissajouse miring kekanan maka menggunakan persamaan :

$$\theta = 180^\circ - \sin^{-1} \left(\frac{A}{B} \right) \quad (15)$$

Dimana :

A = pengukuran sumbu X pada pola elips mulai memotong sumbu Y.

B = pengukuran Tinggi elips diukur dari sumbu X.



Gambar 12. Perbedaan Sudut Fasa Antara Tegangan Inverter Dan Jaringan Listrik PLN Sebesar 8,2°

Pada Gambar 12., karena posisi elips Lissajouse miring ke kiri maka menggunakan persamaan (14) sehingga:

$$\theta = \sin^{-1} \left(\frac{16,67}{116,67} \right)$$

$$\theta = \sin^{-1} (0,143)$$

$$\theta = 8,2^\circ$$

Perbedaan fasa output inverter dengan jaringan listrik pln yang telah diisolasi menggunakan transformator isolasi sebesar 8,2°.

V. KESIMPULAN

Dari hasil pengujian output inverter tanpa menggunakan filter mengandung THD sebesar 32%, hal ini disebabkan karena output inverter masih berupa sinyal SPWM dengan frekuensi tinggi sebesar 19KHz, kemudian dilakukan pengujian output inverter menggunakan LCL filter untuk mendapatkan sinyal dasar (fundamental) berupa bentuk gelombang sinyal sinusoidal dengan frekuensi sebesar 50Hz. Sinyal sinusoidal dari output inverter mengandung THD sebesar 3,85%, kemudian sinkronisasi dilakukan

output inverter dengan jaringan listrik PLN mengandung THD sebesar 4,1%, dan mempunyai perbedaan sudut fasa output inverter dengan jaringan listrik PLN sebesar 8,2°.

Dari hasil pengujian terhadap beban tanpa sinkronisasi, inverter sanggup menyuplai beban lampu pijar maksimal 55W dengan drop tegangan sebesar 220VAC dan arus 0,23A. Suplai Boost converter untuk menyuplai inverter menggunakan input Accu jenis VRLA 12V & kapasitas 7.2AH (86W). Arus Stanby ketika inverter berkerja sebesar 0,7A (8,4W). Terdapat daya yang hilang dari total kapasitas accu 86W akibat Stanby inverter sebesar 8,4W, daya yang hilang tersebut akibat konversi disipasi komponen swiching yang merubah listrik menjadi panas sebesar 22,6W.

Dari hasil pengujian sinkronisasi, inverter berhasil menyuplai beban lampu pijar sebesar 100W dengan drop tegangan sebesar 222VAC dan arus sebesar 0,43A. Hal ini disebabkan karena penambahan daya terjadi dari proses sinkronisasi pada kedua sumber AC untuk saling menyuplai beban lampu pijar yang terpasang.

VI. DAFTAR PUSTAKA

- [1] Muhamad Irfan, Erwin Susanto, ST, MT, PhD, Budi Setiadi, ST, MT, 2015, "Rancang bangun dan implementasi sistem kendali grid connected pada sumber listrik satu fasa", Prodi S1 Teknik Elektro, Fakultas Teknik Elektro, Universitas Telkom, Bandung.
- [2] Khairul Azmi, Ira Devi Sari, Syahrizal, 2017, "Desain dan Analisis Inverter Satu Fasa dengan menggunakan Metode SPWM Berbasis Arduino", KITEKTRO, Jurnal Online Teknik Elektro, Teknik Elektro dan Komputer, Universitas Syiah Kuala, Banda Aceh.
- [3] "Ferrite Transformer Turns Calculation", Tahmid's blog, 2012, [Online] Available: <http://tahmidmc.blogspot.com/2012/12/ferrite-transformer-turns-calculation.html>, [Diakses 29 juli 2019].
- [4] "Using SG3525 PWM Controller Explanation", Tahmid's blog, 2013, [Online]. Available: <http://tahmidmc.blogspot.com/2013/01/using-sg3525pwm-controller-explanation.html>, [Diakses 28 Juli 2019].
- [5] A.E.W.H. Kahlane, L. Hassaine, M. Kherchi, 2014, LCL filter design for photovoltaic grid connected systems, Ghadata, Centre de Développement des Energies Renouvelables, Algeria. Hlm. 227-231.
- [6] "Cara Menghitung Jumlah Lilitan Primer dan Sekunder Trafo", bagi ilmu elektronika, 2015, [Online] Available: <http://bagi-ilmu-elektronika.blogspot.com/2015/09/cara-menghitung-jumlah-lilitan-primer-sekunder-trafo.html> [Diakses 10 Oktober 2019].
- [7] "SPWM generation using PIC16F877A microcontroller", B. Malik, Microcontrollers Lab, 2014, [Online]. Available: <http://microcontrollerslab.com/spwm-generation-usingpic16f877a-microcontroller/>. [Diakses 13 Mei 2019].
- [8] "Measuring Total Harmonic Distortion THD using an FFT on an oscilloscope", w2aew, 2015, [Online] Available: https://www.qsl.net/w2aew/THD_with_FFT.pdf [Diakses 1 November 2019].
- [9] Rigolna, Rigol inc, Oscilloscope Signal Analysis Using FFTs, RIGOL TECHNOLOGIES USA INC, Oakwood Village, America. Hlm. 2-5.
- [10] Anita Ayu S, Ekky Novanto, Giant Syafil F, Mahendra Cahya L, Pengukuran Rangkaian Listrik Beda Fasa, POLITEKNIK NEGERI MALANG, Malang. Hlm. 13-15.

Implementasi Sinkronisasi Jaringan dengan Inverter Berbasis SPWM Menggunakan ZCD

ORIGINALITY REPORT

3%

SIMILARITY INDEX

PRIMARY SOURCES

1	core.ac.uk Internet	71 words — 1%
2	tahmidmc.blogspot.com Internet	21 words — < 1%
3	repository.tudelft.nl Internet	17 words — < 1%
4	doku.pub Internet	15 words — < 1%
5	library.universitaspertamina.ac.id Internet	13 words — < 1%
6	docplayer.info Internet	11 words — < 1%
7	ejournal.st3telkom.ac.id Internet	10 words — < 1%

EXCLUDE QUOTES ON

EXCLUDE MATCHES

< 10 WORDS

EXCLUDE BIBLIOGRAPHY ON