

# METODE SINKRONISASI INVERTER SATU FASE DENGAN JARINGAN LISTRIK YANG TERDISTORSI

**Bambang Sujanarko**

Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Jember  
Jl. Slamet Riyadi 62, Jember 68121, Telp. +62-331-410242, Fax. +62-331-484977  
e-mail : bbsujanarko@yahoo.co.id

## **Abstract**

*DC power sources from renewable energy sources that would be connected to the electricity grid system require synchronization process. This process is implemented by controlling the inverter in a way to obtain instantaneous amplitude, phase and frequency according to the electricity network. This research discussed a method for synchronizing VSI PWM inverters connected with distorted single-phase power grid using a filter as a pure sine generator, and a compensator as the restorer of angle change due to the power filtering. Results of simulation using MATLAB show that this method can produce better synchronization compared to other synchronization methods, as it successfully produce similar phase and waveform with the grid's waveform.*

**Keywords:** synchronization, filter, compensator, VSI, PWM

## **Abstrak**

*Sumber listrik searah yang berasal dari sumber energi terbarukan yang dikoneksikan dengan sistem jaringan listrik membutuhkan proses sinkronisasi. Proses tersebut dilakukan dengan mengontrol kerja inverter sedemikian rupa sehingga diperoleh amplitudo sesaat, fase dan frekuensi yang sesuai dengan jaringan listrik. Pada penelitian ini dibahas suatu metode untuk proses sinkronisasi koneksi inverter PWM VSI dengan jaringan listrik satu fase yang terdistorsi, dengan menggunakan tapis untuk membangkitkan sinus murni, dan kompensator sebagai pemulih perubahan sudut akibat filter daya. Hasil simulasi dengan MATLAB menunjukkan bahwa metode ini dapat menghasilkan sinkronisasi yang lebih baik bila dibandingkan dengan metode sinkronisasi yang lain, karena menghasilkan fase dan bentuk gelombang sebagaimana bentuk gelombang pada jaringan.*

**Kata Kunci:** sinkronisasi, filter, kompensator, VSI, PWM

## **1. PENDAHULUAN**

Sistem interkoneksi pada tegangan ekstra tinggi telah menghasilkan sistem kelistrikan yang lebih handal dan lebih efisien [1]. Umumnya pembangkit yang masuk dalam sistem interkoneksi tersebut merupakan pembangkit besar, dengan energi primer berupa sumber energi tak terbarui seperti batu bara, minyak dan gas bumi [2]. Dengan alasan semakin berkurangnya cadangan energi yang berasal dari fosil tersebut, serta alasan lingkungan lainnya, maka pembangkit listrik dengan sumber energi terbarukan banyak diteliti sebagai pengganti pembangkit listrik dengan sumber energi fosil [3]. Sejumlah metode konversi telah banyak ditemukan, namun masih membutuhkan pengembangan. Sistem Fuel Cell, Foto Voltaik, dan lain-lain merupakan sistem konversi yang mulai banyak diterapkan. Sistem tersebut umumnya menghasilkan daya arus searah, sehingga membutuhkan sistem pengubahan ke dalam bentuk daya arus bolak-balik dengan menggunakan inverter agar bisa digunakan sebagaimana sumber listrik pada jaringan listrik.

*Voltage source inverter* (VSI) yang terdiri dari *voltage control* VSI (VCVSI) dan *current control* VSI (CCVSI), merupakan inverter yang paling banyak digunakan, termasuk untuk integrasi sistem pembangkit terdistribusi, karena VSI lebih efisien, kompak dan lebih murah, bila dibanding inverter lain [4]. Sementara Pulse Width Modulation (PWM) merupakan metode

yang cukup banyak digunakan untuk pengendalian sistem perubahan daya listrik, termasuk inverter.

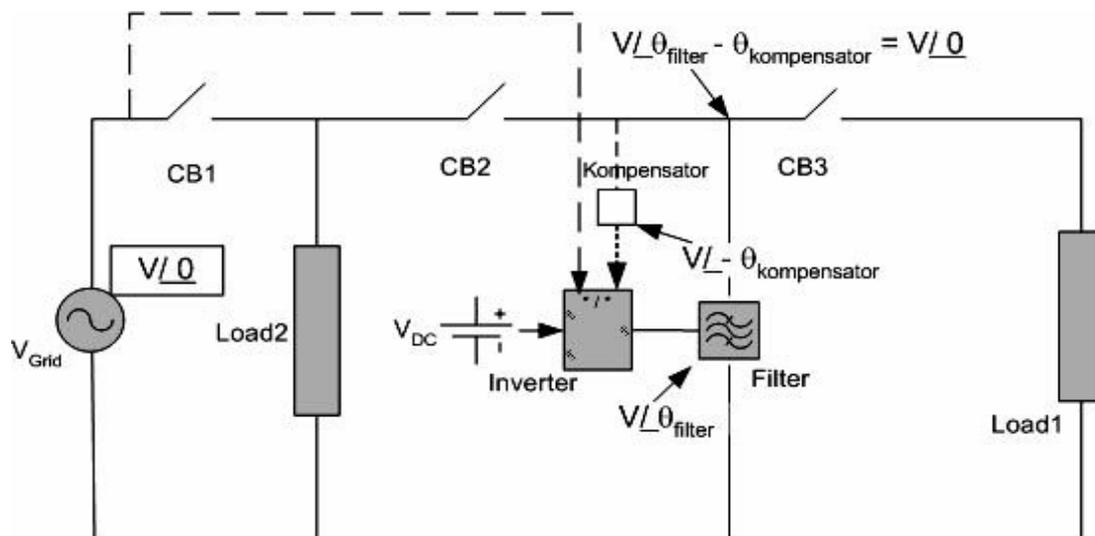
Kondisi sinkron, yaitu kondisi dimana amplitudo, frekuensi dan fase tegangan/arus sama pada dua atau lebih pembangkit, sangat diperlukan dalam pengoperasian paralel. Hal yang sama juga berlaku untuk inverter. Bila karakteristik daya listrik yang dihasilkan inverter tidak sinkron, dimungkinkan pengoperasian paralel akan mengakibatkan ketidakstabilan dan bahkan kegagalan. Teknik *zero crossing*, *pem-filter-an* tegangan jaringan listrik dan *Phase Locked Loop* (PLL) merupakan metode sinkronisasi yang telah banyak digunakan pada inverter [3]. Metode PLL mampu melakukan sinkronisasi pada jaringan yang memiliki daya listrik yang mengalami distorsi [5], walaupun memiliki sistem yang lebih rumit, berkebalikan dengan metode *zero crossing* yang memiliki konstruksi yang sederhana, namun tidak sesuai untuk kondisi daya yang terdistorsi. Sementara *pem-filter-an* tegangan jaringan listrik, memiliki kelemahan adanya pergeseran sudut fase. Penggunaan metode sinkronisasi yang lebih kompleks, disertai kemampuan sistem untuk mengkompensasi gangguan ketidakseimbangan dan *sag* pada sistem tiga fase, dilakukan dengan menggunakan *synchronous reference frame* (SRF) [6].

Sinkronisasi yang hanya melihat pada besaran amplitudo efektif, frekuensi dan fase belumlah cukup sebagai persyaratan untuk sinkronisasi inverter dengan daya listrik yang berasal dari sistem pembangkit konvensional (generator). Persyaratan lain yang juga harus dipenuhi adalah kesamaan bentuk gelombang atau dengan kata lain tegangan sesaat harus sama. Oleh karena itu dalam pada penelitian ini diusulkan metode baru untuk sinkronisasi Inverter PWM VSI satu fase dengan jaringan listrik yang terdistorsi, yang berbeda dengan metode yang diusulkan pada referensi [3-14]. Perbedaan terutama adalah dilakukannya kompensasi pergeseran sudut dengan rangkaian C-R dan tetap digunakannya tegangan jaringan asli untuk modulasi, sehingga bentuk tegangan masih bisa dipertahankan sama dengan aslinya. Metode sinkronisasi yang diajukan diverifikasi secara simulasi menggunakan perangkat lunak MATLAB versi 7.0.

## 2. METODE PENELITIAN

### 2.1. Konfigurasi Sistem

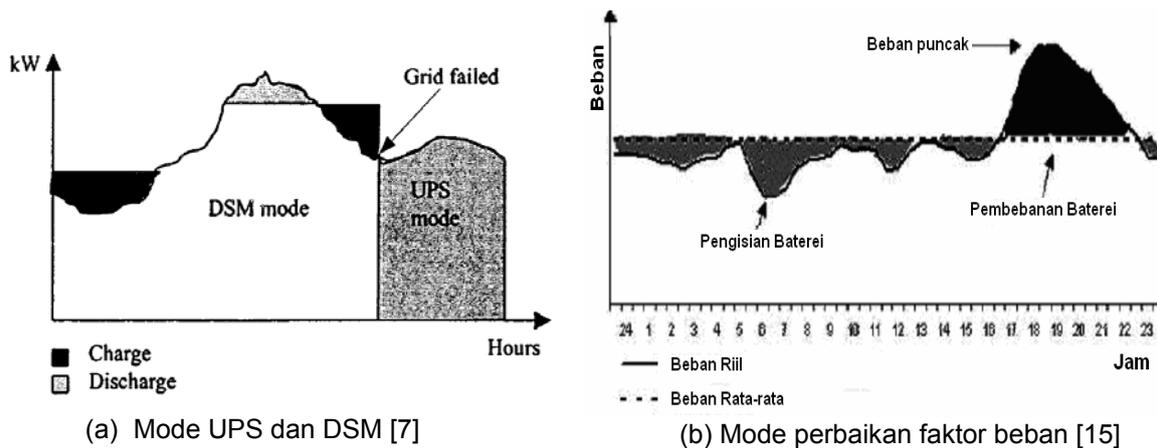
Sistem yang digunakan dalam penelitian terdiri dari sumber arus searah (DC), inverter, sistem kontrol sinkronisasi dan pembangkit pulsa gerbang, sistem kelistrikan satu fase dan beban, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 1. Daya listrik arus searah (DC) pada blok sumber DC dapat berupa baterai, penyearah, generator DC dan sistem konversi lain yang menghasilkan DC, akan diubah menjadi daya arus bolak-balik (AC) melalui inverter. Keluaran daya listrik inverter diatur sedemikian rupa oleh sistem sinkronisasi dan pembangkit pulsa sehingga daya listrik yang dikeluarkan oleh inverter dapat sinkron dengan daya di jaringan.



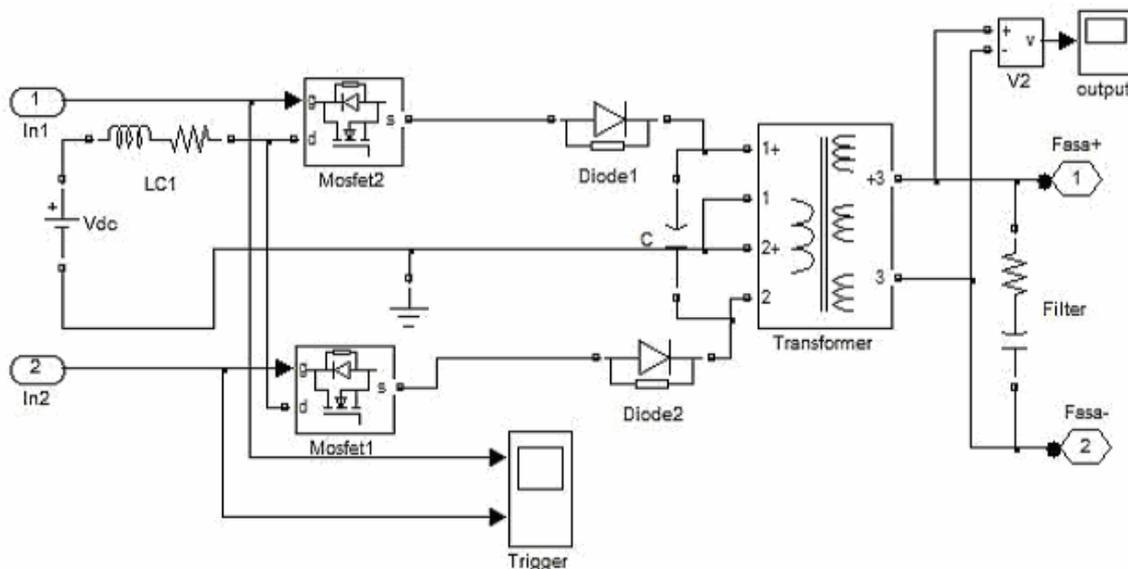
Gambar 1. Konfigurasi sistem

Pengaturan sistem sinkronisasi dan pembentuk gelombang dilakukan dengan tegangan jaringan sebagai acuan. Bila tegangan sesaat jaringan turun, maka tegangan sesaat keluaran inverter juga harus mengikuti, begitu sebaliknya. Demikian pula bila frekuensi pada jaringan listrik turun/naik, maka frekuensi keluaran AC inverter juga harus dapat mengikutinya.

Konfigurasi paralel inverter dengan jaringan listrik sebagaimana Gambar 1, memungkinkan sistem bekerja dalam beberapa mode, yaitu mode sebagai *Uninterruptible Power Supply* (UPS), mode penambah daya pada sistem bila daya sistem grid terbatas atau *Demand Side Management System* (DSM) bila inverter merupakan *bi-directional* inverter yang mampu sebagai inverter sekaligus rectifier [7] atau mode perbaikan faktor beban bila pengisian/pembebanan baterai (sumber DC) didasarkan pada pembebanan yang merata pada sistem grid, sebagaimana dijelaskan dalam Gambar 2.



Gambar 2. Mode Pengoperasian Inverter



Gambar 3. Sistem Inverter

Menurut literatur dikenal beberapa konfigurasi inverter satu fase [8]. Pada penelitian ini digunakan topologi inverter dorong-tarik (*push-pull*). Sistem inverter menggunakan transformator *center tap*, serta dirancang bekerja pada frekuensi yang relatif tinggi. Dengan jenis seperti itu, maka kebutuhan komponen *switching* menjadi lebih sedikit dan transformator dan *filter* menjadi lebih ringan. Gambar 3 menyajikan skema inverter yang digunakan dalam

penelitian. *Gate* pada MOSFET1 MOSFET akan mendapat sinyal masukan dengan pola tertentu yang berasal dari rangkaian sinkronisasi dan rangkaian pembangkit pulsa *gate*. Sinyal *gate* tersebut membuat kondisi MOSFET ON-OFF dan tegangan hasilnya kemudian dinaikkan dengan perbandingan  $n$  oleh trafo. Tegangan maksimum keluaran inverter ( $V_o$ ) tersebut sebelum di-*filter* adalah [8]:

$$V_o = \frac{4}{\pi\sqrt{2}} \frac{V_{dc}}{n} \quad (1)$$

$n$  adalah perbandingan lilitan trafo primer/sekunder

Jika tegangan keluaran inverter berbentuk sinus murni ( $V_{inv}$ ), maka besarnya sama dengan:

$$V_{inv} = \frac{4}{\pi\sqrt{2}} \frac{V_{dc}}{n} \sin(\omega_1 t + \phi_1) \quad (2)$$

sedangkan tegangan jaringan listrik ( $V_{grid}$ ) adalah:

$$V_{grid} = V\sqrt{2} \sin(\omega_2 t + \phi_2) \quad (3)$$

$V$  adalah tegangan efektif

Kondisi sinkronisasi terjadi bila tegangan ( $V_{inv}$  dan  $V_{grid}$ ), frekuensi ( $\omega_1$  dan  $\omega_2$ ) dan sudut fase ( $\phi_1$  dan  $\phi_2$ ) adalah sama, sehingga dari (2) dan (3) untuk tegangan didapat:

$$\frac{4}{\pi\sqrt{2}} \frac{V_{dc}}{n} = V\sqrt{2} \quad (4)$$

$$\text{atau } V = \frac{4 V_{dc}}{2 \pi n} \quad (5)$$

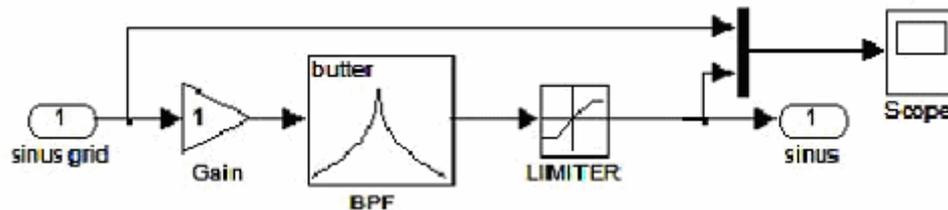
Pada penelitian ini, sinkronisasi tegangan sesaat, frekuensi, dan fase tersebut dilakukan dengan teknik *zero crossing* pada tegangan yang telah di-*filter* pada orde yang cukup dan juga telah dikompensasi untuk mengeliminasi pergeseran sudut ( $\theta_{filter} + \theta_{kompensator} = 0$ ), yang dilanjutkan dengan penggunaan tegangan jaringan (asli tanpa *filter*) yang dimodulasi dengan teknik PWM dengan batas-batas fase positif dan negatif mengacu pada hasil *zero crossing*.

## 2.2. Rangkaian Sinkronisasi dan Pembangkit Pulsa

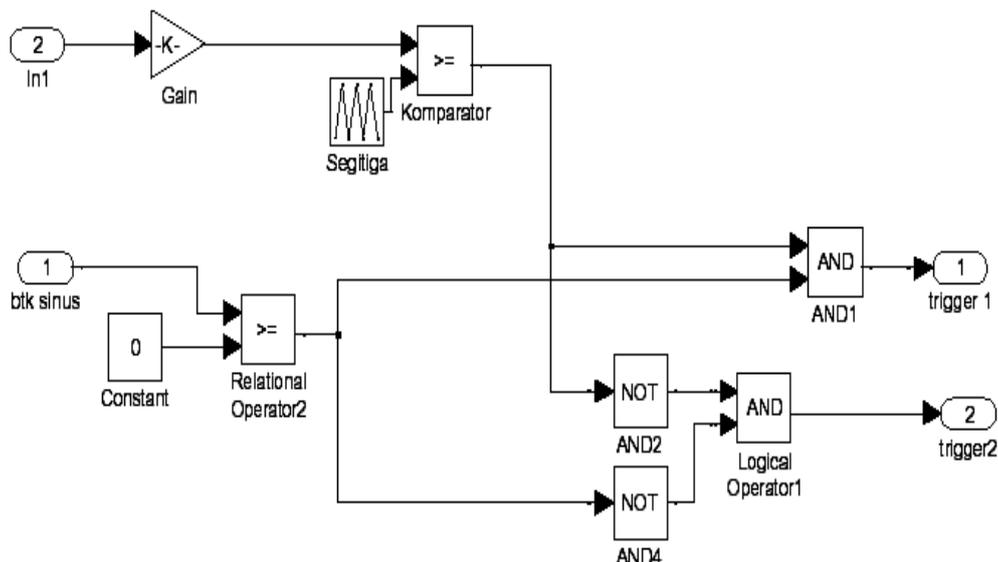
Inverter PWM umumnya memerlukan pembentuk sinus untuk proses sinkronisasi yang baik. Rangkaian pembentuk sinus yang digunakan dalam penelitian ini diperlihatkan pada Gambar 4(a). Sedangkan model pensaklaran pada inverter PWM satu fase, pada dasarnya dapat dikelompokkan dalam tiga kategori, yaitu: *naturally sampled PWM*, *regular sampled PWM* dan *direct PWM* [10]. Pada penelitian ini digunakan *regular sampled PWM* dengan pencuplikan tak simetri (*unsymmetrical sampling*) menggunakan sinyal pembawa (*carrier signal*) gelombang segitiga, seperti ditunjukkan pada Gambar 4(b).

Metode yang diajukan merupakan metode baru, dan berbeda bila dibandingkan metode sinkronisasi yang ada di referensi [3-14]. Perbedaan terutama adalah dilakukannya kompensasi pergeseran sudut dengan rangkaian C-R dan tetap digunakannya tegangan jaringan asli untuk modulasi, sehingga bentuk tegangan masih bisa dipertahankan sama dengan aslinya. Blok diagram metode ini diperlihatkan pada Gambar 5(a). Jadi pada prinsipnya sinyal atau

gelombang dari jaringan listrik yang terdistorsi akan di-*filter* dahulu menjadi sinus. Hasil *filter* kemudian akan dikompensasi untuk dipulihkan sudut fasenya dari pergeseran fase akibat *filter* daya. Hasil kompensasi kemudian akan diproses menjadi pulsa positif atau negatif untuk fase positif dan negatif di *zero crossing*. Pulsa-pulsa ini kemudian dinormalisasi dan kemudian akan di-AND-kan dengan hasil PWM sinyal asli dari grid. Hasilnya adalah pulsa-pulsa *trigger* pada komponen saklar inverter yang sinkron dengan tegangan pada jaringan listrik yang mengalami distorsi.



(a) Pembentuk Sinus



(b) Sinkronisasi dan Pembangkit Pulsa

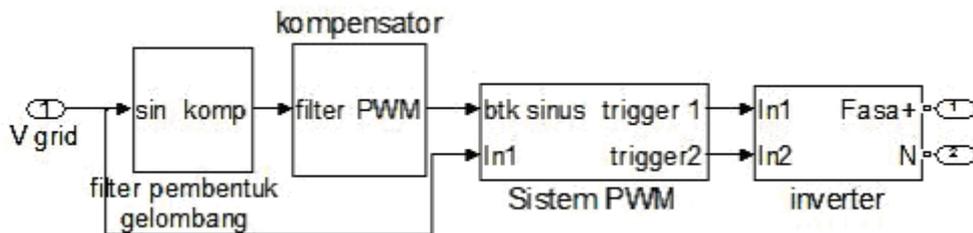
Gambar 4. Rangkaian Pembentuk Sinus, Sinkronisasi dan Pembangkit Pulsa.

### 2.3 Pengujian

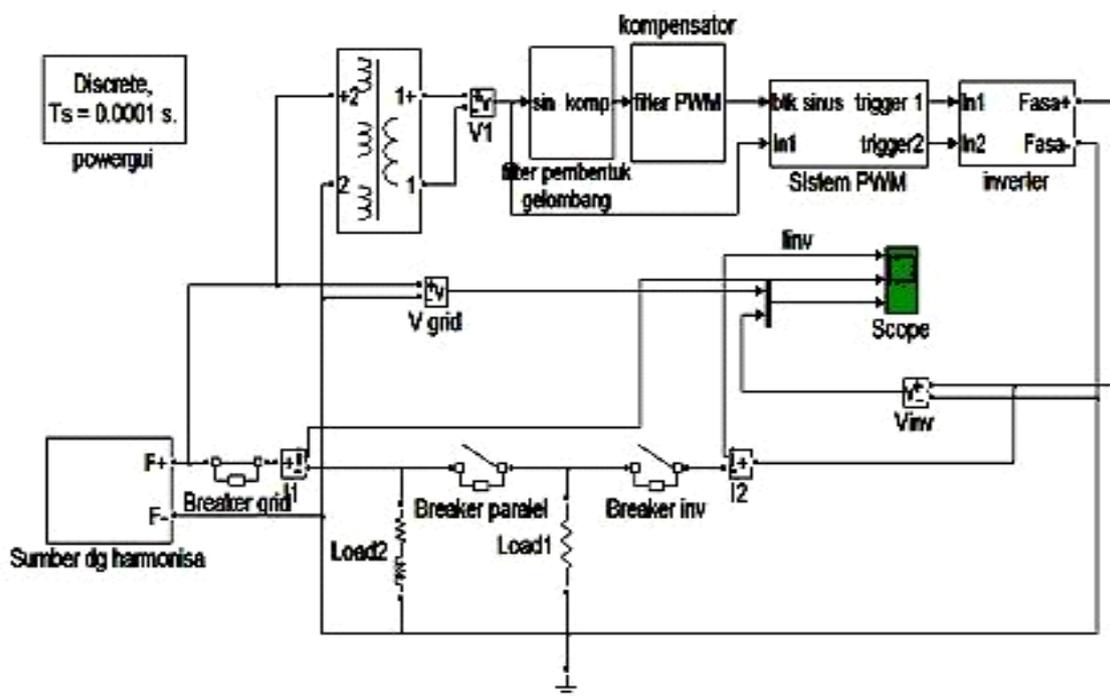
Pengujian dilakukan melalui perbandingan kinerja sistem yang diajukan dengan kinerja metode sinkronisasi *zerocrossing*, pem-*filter*-an dan PLL. Gambar 5(b) memperlihatkan rangkaian Matlab Simulink untuk pengujian. Pada gambar tersebut sistem sinkronisasi yang digunakan adalah sistem sinkronisasi yang diajukan, sedangkan untuk metode yang lain, tinggal mengganti rangkaian kompensasi, pembentuk gelombang dan pembangkit pulsa, dengan rangkain yang sesuai, sebagaimana dijelaskan dalam [3].

Pengujian dilakukan untuk mendapatkan ketepatan sudut fase dan bentuk gelombang antara tegangan pada jaringan (*grid*) dengan tegangan yang terjadi pada inverter. Jika sudut fasenya antara tegangan jaringan dan inverter tidak ada perbedaan, maka sistem dikategorikan sebagai sistem yang baik, tapi jika terdapat perbedaan, maka sistem dikategorikan dalam sistem yang jelek. Semakin besar perbedaan yang terjadi, kategorinya juga akan semakin jelek. Begitu pula dengan bentuk gelombang, jika bentuk gelombang amat mirip maka sistem akan dikategorikan dalam sistem yang sangat baik, begitu juga jika ketidaksamaan yang terjadi

cukup besar, sistem dikategorikan dalam sistem yang sangat jelek. Pengujian dilakukan dengan membagi kondisi operasional dalam empat jenis, yaitu pada sistem bekerja terpisah, sistem bekerja paralel, pada saat jaringan (*grid*) padam dan pada saat jaringan (*grid*) pulih kembali.



(a) Metode sinkronisasi yang diajukan

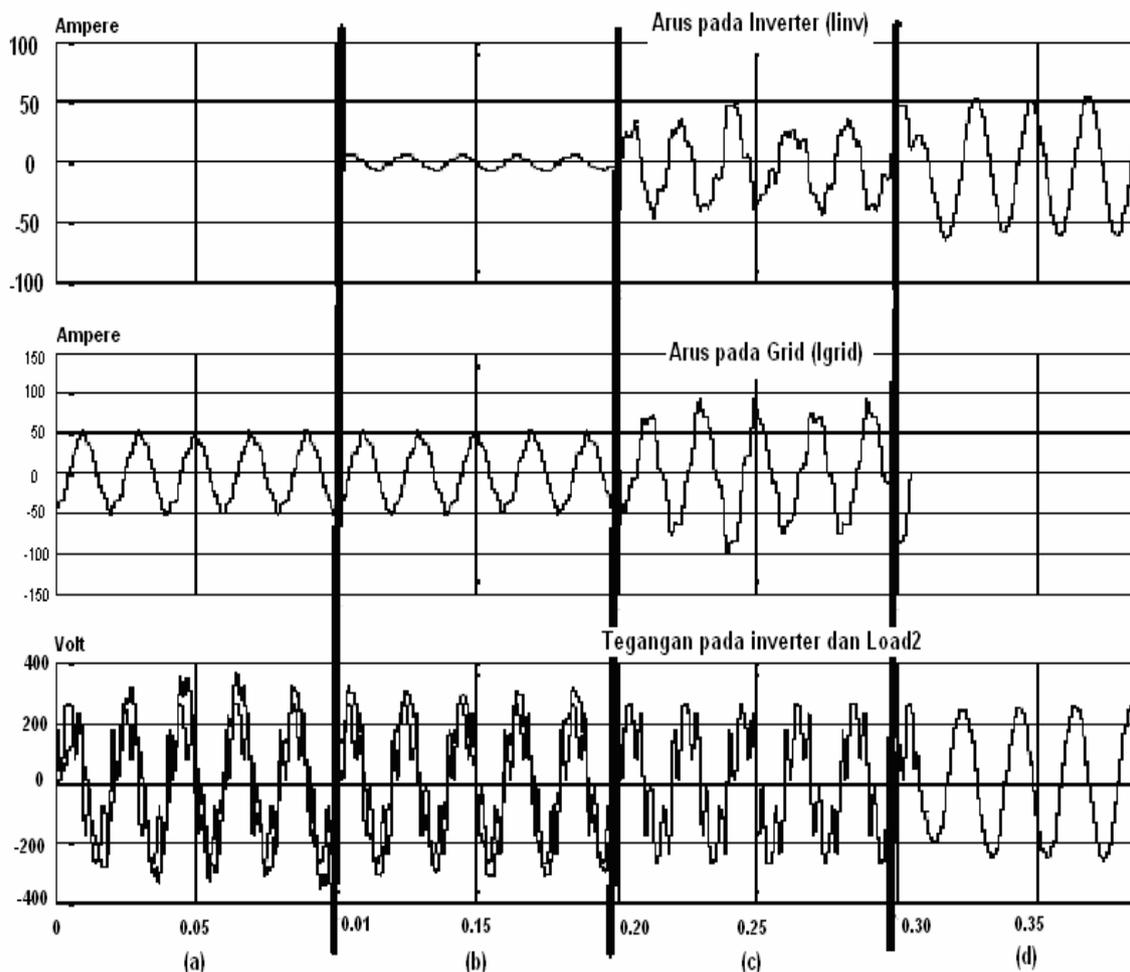


(b) Rangkaian Simulasi

Gambar 5. Sistem Pengujian menggunakan simulasi Matlab Simulink.

### 3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Gambar 6 memperlihatkan hasil simulasi pada semua kondisi operasional yang digunakan dalam pengujian sistem. Gambar 6(a) adalah hasil simulasi pada waktu 0 sampai dengan 0,1 detik, yaitu pada kondisi sistem jaringan bekerja sendiri, sementara inverter dan beban Load1 belum bekerja. Pada saat ini inverter telah menggunakan tegangan jaringan yang terdistorsi sebagai referensi untuk proses sinkronisasi dan pembentukan pulsa gerbang. Sedangkan pada Gambar 6(b) menunjukkan hasil simulasi pada waktu 0,1 sampai dengan 0,2 dengan kondisi sistem bekerja terpisah, sistem jaringan mencatu beban Load2 dan inverter mencatu beban Load1. Pada Gambar 6(c) ditunjukkan hasil simulasi untuk waktu dari 0,2 sampai 0,3, dengan kondisi sistem bekerja paralel, yaitu sumber daya jaringan dan inverter bekerja bersamaan untuk mencatu beban Load1 dan Load2. Gambar 6(d) adalah hasil simulasi pada periode waktu 0,3 sampai dengan 0,4, dengan kondisi jaringan listrik lepas atau padam dan semua daya disulang oleh inverter. Sedangkan Gambar 6(e) adalah hasil simulasi pada waktu lebih dari 0,4 detik, dengan kondisi jaringan pulih dan dapat mencatu kembali ke sistem.



Gambar 6. Hasil simulasi bentuk arus dan tegangan

Hasil tersebut menunjukkan bahwa sistem telah dapat bekerja sebagaimana tinjauan teori yang dikemukakan, mengingat pada semua kondisi dihasilkan tegangan yang memiliki sudut fase dan bentuk gelombang yang tepat. Dan jika dilakukan perbandingan ketepatan sudut dan bentuk gelombang hasil simulasi sistem yang diajukan dengan simulasi pada sistem sinkronisasi yang lain, maka akan didapatkan hasil seperti tampak pada Tabel 1.

Tabel 1. Perbandingan metode Sinkronisasi

Metode sinkronisasi	Ketepatan sudut fase	Ketepatan bentuk tegangan
Zero crossing [3]	kurang	kurang
Pem-filter-an [3]	sangat kurang	kurang
PLL [3, 5]	baik	kurang
Metode yang diajukan	baik	Baik

4. SIMPULAN

Suatu metode baru untuk sinkronisasi inverter PWM satu fase yang terhubung dengan jaringan (*grid*) yang mengandung distorsi telah diajukan dalam penelitian ini. Verifikasi melalui simulasi dengan perangkat lunak MATLAB telah menunjukkan bahwa metode yang diusulkan dapat menyinkronisasikan inverter satu fase dengan jaringan yang terdistori, dengan ketepatan sudut fase dan bentuk gelombang yang lebih baik dibandingkan dengan sistem sinkronisasi yang telah dikembangkan sebelumnya.

**DAFTAR PUSTAKA**

- [1]. Hutahuruk. Transmisi Daya Listrik. Jakarta: Erlangga. 1985.
- [2]. Pabla. 1981. Sistem Distribusi Tenaga Listrik. Abdul Hadi. Jakarta: Erlangga. 1994.
- [3]. Blaabjerg F, Teodorescu R, Liserre M, Timbus AV. Overview of Control and Grid Synchronization for Distributed Power Generation Systems. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2006; 53(5): 1398-1409.
- [4]. Ko SH, Lee SR, Dehbonei H, Nayar CV. Application of Voltage- and Current-Controlled Voltage Source Inverters for Distributed Generation Systems. *IEEE Transactions on Energy Conversion*. 2006; 21(3): 782-792.
- [5]. Pavljasevic S, Dawson F. Synchronization to Disturbed Utility-Network Signals Using a Multirate Phase-Locked Loop. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2006; 53(5): 1410-1417.
- [6]. Li Y, Vilathgamuwa DM, Loh PC. Microgrid Power Quality Enhancement Using a Three-Phase Four-Wire Grid-Interfacing Compensator. *IEEE Transactions on Industry Applications*. 2005; 41(6): 1707-1719.
- [7]. Ashari M, Keerthipala WWL, Nayar CV. A Single Phase Parallely Connected Uninterruptible Power Supply/Demand Side Management System. *IEEE Transactions on Energy Conversion*. 2000; 15(1): 97-102.
- [8]. Mohan N, Undeland TM, Robbins WP. Power Electronics. New York: John Wiley & Sons. 1995.
- [9]. Holmes G, Lipo TA. Pulse Width Modulation For Power Converter. New York: John Wiley and Sons Inc Publication—IEEE Press. 2003.
- [10]. Carrasco JM, Franquelo LG, Bialasiewicz JT, Galván E, Guisado RCP, Prats MAM, et al. Power-Electronic Systems for the Grid Integration of Renewable Energy Sources: A Survey. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2006; 53(4): 1002-1016.
- [11]. Chung SK. A Phase Tracking System for Three Phase Utility Interface Inverters. *IEEE Transactions on Power Electronics*. 2000; 15(3): 431-438.
- [12]. Kjaer SB, Pedersen JK, Blaabjerg F. A Review of Single-Phase Grid-Connected Inverters for Photovoltaic Modules. *IEEE Transactions on Industry Applications*. 2005; 41(5): 1292-1306.
- [13]. Papathanassiou SA, Papadopoulos MP. Harmonic Analysis in a Power System with Wind Generation. *IEEE Transactions on Power Delivery*. 2006; 21(4): 2006-2016.
- [14]. Xu L, Cartwright P. Direct Active and Reactive Power Control of DFIG for Wind Energy Generation. *IEEE Transactions on Energy Conversion*. 2006; 21(3): 750-758.
- [15]. Sujanarko B, Ashari M, Purnomo MH. *Kerja Paralel Sistem Konverter Berbasis Komputer Pribadi dengan Jaringan Listrik Untuk Perbaikan Faktor Beban*. Simposium Nasional Rapi VI. Surakarta. 2007: 101:107.