



DOI: <https://doi.org/10.38035/jim.v4i3>
<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

Rancang Bangun Prototipe Sistem *Automatic Transfer Switch Zero Crossing* berbasis Metode Sinkronisasi Pembangkit Listrik Tenaga Surya Off-Grid dan PLN

Igo Ari Syahputra¹, I Wayan Kharismata Mone Ede², Ketut Gd Riski Dalem Mahotama³, Cokorde Gede Indra Partha⁴, I Wayan Sukerayasa⁵

¹Universitas Udayana, Bali, Indonesia, igo.ari089@student.unud.ac.id

²Universitas Udayana, Bali, Indonesia, kharismata.mone116@student.unud.ac.id

³Universitas Udayana, Bali, Indonesia, idadem.mahotama075@student.unud.ac.id

⁴Universitas Udayana, Bali, Indonesia, cokindra@unud.ac.id

⁵Universitas Udayana, Bali, Indonesia, wayansukerayasa@unud.ac.id

Corresponding Author: igo.ari089@student.unud.ac.id¹

Abstract: Power disruptions from the national electricity provider (PLN) have driven the need for alternative solutions such as Solar Power Plants (PLTS) to maintain the continuity of electrical energy. However, Off-Grid PLTS systems face challenges in battery energy storage and the risk of voltage spikes during switching. This study aims to design a prototype of an Automatic Transfer Switch (ATS) with Zero Crossing capability, utilizing a synchronization method between PLTS and PLN to ensure continuous power while minimizing voltage and current surges. The ATS uses an Arduino Nano microcontroller as the control center, implementing a zero crossing process with a synchronization method to detect phase angle alignment between the PLTS and PLN before transferring the power source. The results show that the zero crossing ATS prototype, by applying the synchronization method, successfully minimizes the risk of voltage spikes during automatic source switching, prevents flickering in the load, and keeps voltage fluctuations within the standard tolerance limit of $\pm 5\%$.

Keyword: Automatic Transfer Switch, Zero Crossing, Off-Grid PLTS, Synchronization, Arduino Nano.

Abstrak: Gangguan energi listrik dari PLN mendorong kebutuhan akan solusi alternatif seperti Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) untuk menjaga kontinuitas energi listrik. Namun, sistem PLTS *Off-Grid* menghadapi tantangan dalam penyimpanan energi baterai dan risiko lonjakan tegangan selama *switching*. Penelitian ini bertujuan merancang prototipe *Automatic Transfer Switch* (ATS) *Zero Crossing* yang menggunakan metode sinkronisasi antara PLTS dan PLN untuk memastikan kontinuitas daya dengan meminimalkan lonjakan tegangan dan arus. ATS ini menggunakan mikrokontroler Arduino Nano sebagai pusat pengendali melalui proses *zero crossing* dengan menerapkan metode sinkronisasi untuk mendeteksi perhimpitan sudut fase antara PLTS dan PLN sebelum melakukan perpindahan sumber daya. Hasil penelitian menunjukkan bahwa prototipe ATS *zero crossing* dengan menerapkan metode

sinkronisasi berhasil meminimalkan risiko lonjakan tegangan selama perpindahan sumber daya secara otomatis tanpa menimbulkan kedip pada beban dan menjaga lonjakan tegangan dalam batas toleransi standar $\pm 5\%$.

Kata Kunci: *Automatic Transfer Switch, Zero Crossing, PLTS Off-Grid, Sinkronisasi, Arduino Nano.*

PENDAHULUAN

Ketersediaan pasokan energi listrik dari pembangkit hingga ke konsumen tidak selalu dapat dijamin berlangsung secara terus-menerus. Gangguan pada pasokan listrik dapat disebabkan oleh pemadaman terjadwal untuk pemeliharaan jaringan, kerusakan pada sistem distribusi, serta bencana alam (Susanto, 2019). Selain itu, gangguan teknis seperti penurunan tegangan, lonjakan tegangan, perubahan frekuensi, dan hilangnya salah satu fasa juga kerap terjadi pada sistem kelistrikan PLN (Sudjoko & Hartono, 2018).

Gangguan listrik tersebut mendorong perlunya pengembangan sumber energi alternatif yang lebih stabil, salah satunya adalah pemanfaatan Energi Baru dan Terbarukan (EBT) seperti energi surya. Indonesia sebagai negara tropis memiliki potensi energi surya yang sangat besar, dengan intensitas radiasi matahari harian rata-rata mencapai 4,5 hingga 4,8 kWh/m², sehingga PLTS menjadi salah satu solusi yang menjanjikan (Bawalo, Rumbayan & Tulung, 2021).

Sistem PLTS *on-grid* memiliki keunggulan dalam hal efisiensi biaya investasi dan potensi penghematan energi melalui ekspor daya ke jaringan PLN. Namun, berdasarkan Peraturan Menteri ESDM Nomor 2 Tahun 2024, energi listrik yang diekspor dari sistem PLTS atap ke jaringan PLN tidak diperhitungkan dalam pengurangan tagihan listrik pelanggan. Selain itu, sistem *on-grid* tidak dapat beroperasi saat terjadi pemadaman listrik dari PLN karena bergantung penuh pada ketersediaan daya dari jaringan utama.

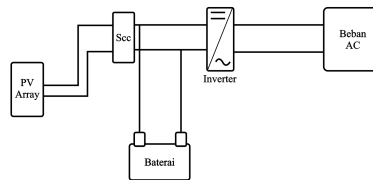
PLTS *off-grid* menawarkan kemandirian energi, terutama di wilayah terpencil yang belum terjangkau jaringan listrik. Meskipun demikian, sistem ini sangat bergantung pada baterai sebagai media penyimpanan energi. Saat produksi energi surya menurun, seperti pada malam hari atau saat cuaca mendung, kontinuitas pasokan energi dapat terganggu tanpa adanya sistem manajemen *switching* yang andal.

Sistem *switching* otomatis seperti *Automatic Transfer Switch* (ATS) berfungsi menjaga kontinuitas suplai daya dalam kondisi gangguan pasokan dari sumber utama. Namun, perpindahan sumber energi sering kali menimbulkan lonjakan arus dan tegangan akibat perbedaan sudut fasa, tegangan, maupun frekuensi antara dua sumber. Lonjakan tersebut dapat menyebabkan arus transien berbahaya pada komponen listrik, terutama beban induktif dan kapasitif seperti motor listrik dan peralatan elektronik (Bawalo, Rumbayan & Tulung, 2021).

Penelitian ini mengembangkan prototipe sistem ATS berbasis *zero crossing* yang mengintegrasikan PLTS dan PLN. Sistem ini dirancang untuk mendeteksi momen *zero crossing* sebagai indikator perhimpitan sudut fasa antara dua sumber daya sebelum melakukan perpindahan suplai. Proses ini bertujuan untuk menghindari lonjakan arus maupun tegangan. Sistem dikendalikan oleh mikrokontroler Arduino Nano yang berfungsi sebagai pusat pengendali, dengan dukungan sensor dan aktuator yang terintegrasi untuk memastikan perpindahan daya berlangsung secara otomatis dan aman.

Pembangkit Listrik Tenaga Surya Off-Grid

Pembangkit Listrik Tenaga Surya *OffGrid* merupakan sistem pembangkit listrik tenaga surya yang beroperasi secara mandiri tanpa terhubung ke jaringan listrik seperti PLN. Energi matahari akan diserap oleh panel surya lalu dikonversi menjadi energi listrik yang disimpan dalam baterai.



Gambar 1. Sistem PLTS Off-Grid

Sistem *off-grid* pada gambar 1 dijelaskan bahwa komponen utama dalam sistem ini berupa *solar panel*, *Solar Charge Controller* (SCC), Baterai, dan Inverter (Ri' Ayatullah & Waluyo, 2013).

Zero Crossing

Metode *zero crossing* digunakan untuk mendeteksi titik nol pada sinyal periodik, yang penting dalam pengukuran fase dan frekuensi untuk sinkronisasi kontrol. Metode ini melibatkan identifikasi titik-titik di mana sinyal beralih dari positif ke negatif atau sebaliknya (Boxwell, M. 2017). Beberapa teknik dalam metode ini meliputi:

1. Pre-Detection Filtering

Sinyal disaring dengan *low-pass* filter untuk menghilangkan frekuensi tak relevan dan mempermudah deteksi titik nol. Namun filter ini dapat menimbulkan pergeseran fase yang perlu dikompensasi secara matematis, terutama saat menggunakan komponen fisik seperti resistor dan kapasitor yang kurang stabil.

2. Post-Processing Signal Conditioning

Dalam teknik ini, pengolahan sinyal secara digital memungkinkan diskriminasi berdasarkan aturan atau filter digital, misalnya dengan *Phase-Locked Loop* (PLL). Dengan PLL, *zero crossing* dapat diperbaiki untuk menghindari kesalahan fase akibat kebisingan dan sinyal harmonik.

3. Hysteresis Dinamis

Metode ini menggunakan komparator dengan umpan balik kapasitif yang menghasilkan hysteresis besar setelah titik nol pertama terdeteksi, sehingga mengurangi deteksi berlebih akibat noise. Pendekatan ini Memberikan zona hysteresis yang bervariasi di sekitar titik nol, meningkatkan stabilitas dan menekan gangguan harmonisa (Wall, R. W. 2003). Dalam ATS *zero crossing*, metode ini diterapkan untuk meningkatkan akurasi dan keandalan deteksi titik nol.

Transformator (Trafo) 220 / 12 V

Transformator 220 / 12 V adalah perangkat listrik yang digunakan untuk menurunkan tegangan dari 220 Volt AC menjadi 12 Volt AC. Jenis transformator ini disebut sebagai transformator *step-down*, yang berfungsi untuk mengubah level tegangan agar sesuai dengan kebutuhan perangkat elektronik tertentu, seperti lampu LED, charger, dan peralatan lainnya yang memerlukan tegangan rendah.



Gambar 2. Trafo Feedback 220 /12 V.

Transformator bekerja berdasarkan prinsip induksi elektromagnetik untuk mengubah tegangan bolak-balik. Arus pada kumparan primer menghasilkan medan magnet berosilasi yang menginduksi arus pada kumparan sekunder. Perbandingan tegangan sebanding dengan jumlah lilitan pada masing-masing kumparan. Pada transformator *step-down*, lilitan primer lebih banyak dari sekunder sehingga tegangan keluar lebih rendah (Haifeng Wang, dkk. 2021).

Rangkaian *Voltage Divider*

Rangkaian pembagi tegangan (*voltage divider*) merupakan rangkaian elektronik yang digunakan untuk menurunkan level tegangan dari sumber yang lebih tinggi menjadi tegangan yang lebih rendah (Utomo, M. S. D., dkk. 2021). komponen ini menggunakan dua resistor untuk menentukan tegangan output dengan persamaan:

$$V_{out} = \frac{R2}{R1 + R2} \times V_{in} \quad (1)$$

Keterangan :

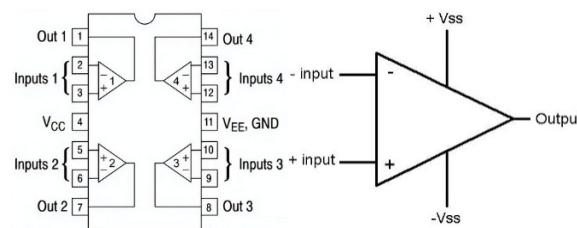
R1 dan R2 = nilai resistor.

V_{in} = tegangan input.

V_{out} = tegangan output.

OP Amplifier (LM324)

Op-amp merupakan sebuah IC yang berfungsi untuk menguatkan sinyal listrik atau tegangan. Penguatan dari sebuah rangkaian op-amp ditentukan oleh nilai tahanan atau resistor yang dipasang dalam rangkaian tersebut. Salah satu tipe IC op-Amp yang sering digunakan adalah LM324 yang terdiri dari empat op-amp (*operational amplifier*) dalam satu paket karena pada IC tersebut dapat digunakan untuk catu daya *simetri* maupun *non simetri* (Rachmat, H. H., & Say, M. M. L., 2023).

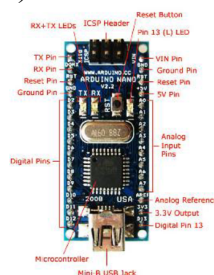


Gambar 3. IC LM324

IC LM324 berfungsi sebagai pembanding dengan catu daya tunggal. Pin *non-inverting* (+) menerima sinyal fasa, sedangkan pin *inverting* (-) terhubung ke GND. Jika terdapat perbedaan potensial, output menghasilkan sinyal logika 1 atau *high*, jika tidak, menghasilkan sinyal logika 0 atau *low*. Hasilnya berupa gelombang digital untuk input deteksi *zero crossing* pada Arduino.

Mikrokontroler Arduino Nano

Arduino nano merupakan board mikrokontroler berbasis Atmega328P. Arduino nano berfungsi sebagai alat kendali yang dapat diprogram dengan mudah dan cepat, terdapat berbagai pin input dan output yang memungkinkan pengguna untuk menghubungkan berbagai sensor dan perangkat (Kurniawan, 2019).



Gambar 4. Mikrokontroler Arduino Nano

Relay

Relay adalah alat yang dioperasikan dengan listrik yang secara mekanis mengontrol penghubungan rangkaian listrik. Relay banyak digunakan dalam sistem kontrol jarak jauh dan pengontrolan alat tegangan dan arus tinggi dengan sinyal kontrol tegangan dan arus rendah (Lestari and Harnoko, 2022). Relay dapat didefinisikan sebagai perangkat proteksi yang berfungsi untuk mendeteksi adanya gangguan atau kondisi abnormal dalam sistem tenaga listrik dan kemudian memberikan sinyal untuk memutuskan aliran listrik guna melindungi peralatan atau sistem dari kerusakan. Adapun beberapa relay yang digunakan pada penelitian ini:

1. Solid State Relay (SSR)

Solid State Relay merupakan saklar elektronik yang menggunakan komponen semikonduktor untuk mengontrol aliran listrik. Relay ini tidak memiliki sistem magnetik sehingga tidak ada pemicu percikan api antar kontak dan memiliki kecepatan *switching* lebih cepat <10 ms dibandingkan relay elektromagnetik sehingga meningkatkan daya tahan dan keandalan sistem (Kustiawan ST,MT, 2018).



Gambar 5. Relay SSR 10 DA

2. Solid State Relay Low Level 5V

Relay *ssr low level* bekerja dengan tegangan input pada terminal kontrolnya berada pada level rendah, biasanya mendekati *ground* atau 0 Volt. Relay ini mampu bekerja dalam waktu <1 ms (Sussi et al., 2022).



Gambar 6. Relay SSR *low level* 5V

3. Relay MY4

Relay MY4 merupakan komponen elektromekanik yang termasuk dalam kategori relay miniatur yang memiliki konfigurasi 4 *pole double throw* (4PDT) dengan total 14 pin terminal, yang memudahkan fleksibilitas dalam pengkabelan. Relay MY4 mempunyai konfigurasi kontak yang terdiri dari 4 *Normally Open* (NO) dan 4 *Normally Closed* (NC) yang dapat mengalirkan arus yang berasal dari sumber tegangan 220 V, serta dapat menangani arus maksimum sebesar 10A dengan tegangan hingga AC 250V / DC 125V (Muktiarsa and Yuandari, 2020) .



Gambar 7. Relay MY4 Omron 220 V

METODE

Penelitian ini dilaksanakan di Laboratorium Konversi Energi, Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknik Universitas Udayana, Kampus Bukit Jimbaran. Waktu pelaksanaan dimulai dari bulan Oktober 2024 sampai dengan April 2025. Analisis Data dapat dilihat pada Gambar 8 :



Gambar 8. Diagram alir penelitian

Berikut penjelasan pada Gambar 8 :

Langkah 1. Identifikasi Masalah

Penelitian ini diawali dengan identifikasi masalah terkait *Automatic Transfer Switch* (ATS) pada PLTS dan PLN karena adanya lonjakan tegangan dan kurangnya sistem deteksi perhimpitan sudut fasa gelombang kedua sumber.

Langkah 2. Studi Literatur

Melakukan studi literatur untuk memahami mekanisme kerja komponen utama sistem *Automatic Transfer Switch* (ATS), sistem *zero crossing*, termasuk relay, dan mikrokontroler. Studi ini juga mencakup analisis berbagai metode *Automatic Transfer Switch* yang telah dikembangkan sebelumnya, dengan fokus pada sistem berbasis mikrokontroler untuk mempelajari algoritma pengendalian *switching* yang efisien dan otomatis.

Langkah 3. Pengumpulan Data

Data teknis yang relevan dikumpulkan secara sistematis, meliputi spesifikasi relay seperti tegangan kerja dan waktu operasional. Selain itu, parameter sistem seperti frekuensi, tegangan, maupun sudut fase operasi. Jenis beban dikaji untuk memastikan perancangan sistem sesuai dengan kebutuhan operasional.

Langkah 4. Perancangan dan Realisasi Sistem

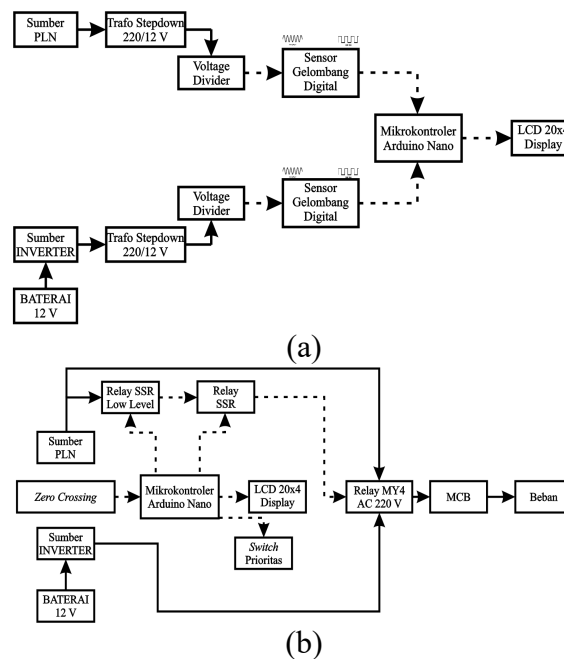
Tahap perancangan meliputi desain rangkaian dan implementasi sistem *Automatic Transfer Switch* (ATS) *zero crossing*. Proses realisasi sistem dilanjutkan dengan pengujian dan kalibrasi menyeluruh untuk memastikan fungsi sistem *Automatic Transfer Switch* (ATS) *zero crossing*.

Langkah 5. Pengujian Sistem

Pengujian sistem dilakukan untuk mengevaluasi kinerja *Automatic Transfer Switch* (ATS) *zero crossing* pada berbagai kondisi operasional, seperti pembacaan mikrokontroler untuk membaca perhimpitan kedua sudut sumber, perpindahan sumber utama Inverter ke sumber cadangan PLN begitu juga sebaliknya, dan melihat respon lonjakan tegangan dan arus pada beban resistif dan induktif. Analisis meliputi akurasi sistem dalam membaca kondisi saat *switching*, pemilihan sumber yang tersedia, dan respon sistem terhadap berbagai skenario beban. Acuan standar hasil pengujian yang digunakan adalah SPLN tahun 2012 yaitu standar tegangan grid $\pm 5\%$ dari 230 Voltase (Kartaca & Abbasov, 2019).

Blok Diagram ATS Zero Crossing

Perangkat keras yang digunakan disesuaikan dengan kebutuhan guna mengatasi permasalahan. Rangkaian secara umum ditunjukkan dalam blok diagram sebagai berikut:



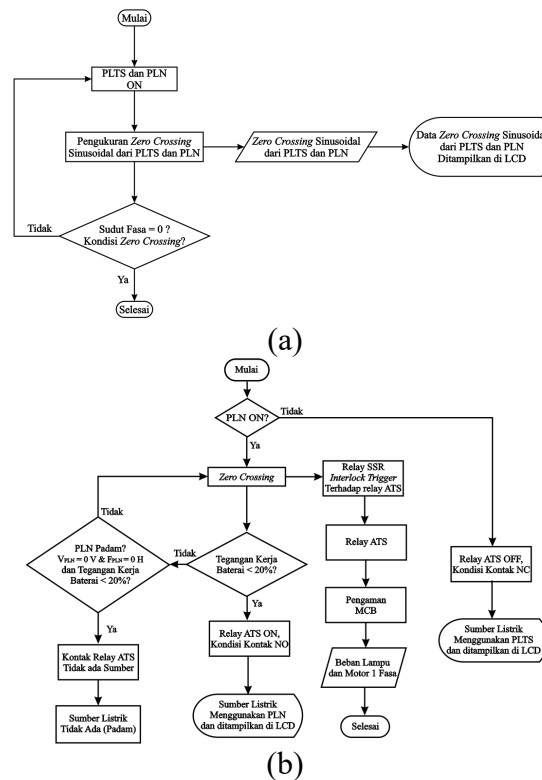
Gambar 9. Blok Diagram (a) Sistem Zero Crossing (b) Sistem Automatic Transfer Switch

Gambar (a) merupakan Blok Diagram Sistem *Zero Crossing* yaitu menggunakan dua trafo *step down* 220 / 12 V untuk menurunkan tegangan Inverter dan PLN. Lalu tegangan 12 V diturunkan hingga 2V menggunakan rangkaian *voltage divider*. Tegangan hingga 2V ini menjadi tegangan masukan yang dapat diterima oleh pin *input* mikrokontroler arduino nano, yaitu dalam rentang 0-5V. Karena sinyal *input* masih berbentuk sinusoidal, maka sistem *zero crossing* ini menerapkan metode hysteresis dinamis dimana komparator mengkonversi sinyal sinusoidal menjadi sinyal digital dengan menggunakan IC LM324 agar dapat dibaca oleh arduino nano. Selanjutnya, sistem *zero crossing* di program menggunakan arduino IDE untuk mendeteksi sudut fasa sebagai informasi status sinkron. Data hasil pengolahan ini ditampilkan pada LCD sebagai informasi real-time yang kemudian di kirim ke sistem *Automatic Transfer Switch* (ATS).

Gambar (b) merupakan Blok Diagram Sistem *Automatic Transfer Switch* yang dimana pada sistem ini menggunakan *relay SSR* 10A untuk mengontrol *on* dan *relay SSR low level* 5V untuk mengontrol *off* dari relay MY4. Relay MY4 dilengkapi dengan satu kumparan (koil) dan beberapa pin NO dan NC sehingga dapat berfungsi sebagai sistem perpindahan menggunakan dua sumber berbeda dan mengintegrasikan sistem *interlock* melalui NO dan NC tersebut sehingga dapat menyuplai beban dengan dua sumber berbeda secara bergantian. Sistem *interlock* menggunakan relay SSR sebagai *trigger* yang dikendalikan oleh mikrokontroler arduino nano.

Algoritma ATS Zero Crossing

Algoritma sistem kerja *zero crossing* dan *Automatic Transfer Switch* ditunjukkan dalam flowchart pada Gambar 10 berikut:



Gambar 10. Algoritma (a) Sistem Zero Crossing (b) Sistem Automatic Transfer Switch

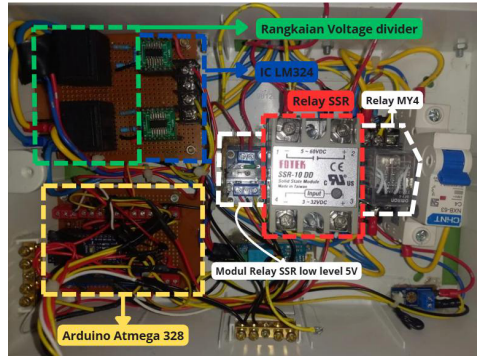
Gambar (a) merupakan Algoritma Sistem Kerja *Zero Crossing* yaitu dimulai dengan memastikan kedua sumber daya, yaitu PLTS dan PLN dalam keadaan aktif (ON) untuk proses mendeteksi kondisi sinkron, sistem akan mengukur titik zero crossing dari sinyal sinusoidal yang datang dari kedua sumber, yaitu Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) dan PLN. Jika titik zero crossing dari kedua sumber sudah didapatkan maka sistem akan melakukan pengukuran sudut fasa antara sinyal dari PLTS dan PLN. Sudut fasa ini menjadi indikator penting untuk menentukan kondisi sinkronisasi antara kedua sumber daya. Kondisi sinkron dapat terdeteksi ketika sudut fasa antara kedua sinyal adalah 0° atau mendekati nol. Jika belum, maka sistem akan terus mengukur ulang hingga sistem zero crossing dapat mendeteksi kondisi sinkron tercapai. Ketika kondisi sinkron sudah terpenuhi, proses akan dinyatakan selesai, dan data hasil pengukuran Zero Crossing dari PLTS dan PLN ini akan ditampilkan pada layar LCD untuk menunjukkan status pendeteksi zero crossing kedua sumber listrik.

Gambar (b) merupakan Algoritma Sistem Kerja Automatic Transfer Switch yang dimulai dengan kondisi PLN menyala (ON) dan telah melalui proses pendeteksi zero crossing sebagai syarat/trigger secara interlock kepada relay ATS untuk memastikan hanya satu sumber yang terhubung ke beban dalam satu waktu, hal ini guna mencegah adanya benturan arus dari PLN dan PLTS. Setelah proses Zero Crossing berhasil, sistem akan mengevaluasi kondisi lebih lanjut. Apabila baterai PLTS sudah mencapai batas tegangan kerja bawah $<20\%$, maka relay ATS on peralihan kontak Normally Open dan sumber akan beralih ke PLN lalu ditampilkan pada layar LCD. Pada kondisi ini sistem PLTS akan melakukan charging. Apabila baterai PLTS memiliki kapasitas yang cukup yaitu 80% , sistem akan menggunakan PLTS sebagai sumber utama dengan relay ATS PLTS off peralihan kontak Normally Closed dan sumber akan beralih ke baterai/PLTS. Pada kondisi PLN mengalami gangguan atau padam, dengan tegangan dan frekuensi yang terdeteksi sama dengan nol, dan baterai PLTS juga habis kontak Normally Open dan Normally Closed tidak teraliri arus, kondisi ini akan dianggap sebagai keadaan darurat dan bahwa tidak ada sumber listrik yang tersedia. Dalam kondisi di mana PLN tidak menyala sejak awal, sistem akan langsung menggunakan PLTS sebagai sumber daya utama.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil Perancangan Sistem ATS *Zero Crossing*

Prototipe ATS *Zero Crossing* terdiri dari komponen utama: Arduino Nano ATmega328, rangkaian *voltage divider*, IC LM324, modul relay SSR *low level* 5V, Relay SSR 10A, relay MY4, MCB 4A, dan LCD I2C 20x4.



Gambar 11. Rangkaian Sistem ATS *Zero Crossing*

Hasil Perancangan Perangkat Lunak Sistem ATS *Zero Crossing*

Pemrograman pada deketksi zero crossing dilakukan dengan pengenalan terhadap arduino pada gambar 12 berikut:

```
// Zero Crossing Detector
if (time1 != 0 && time2 != 0) {
  unsigned long deltaTime = abs((long)(time2 - time1));
  // Perbedaan waktu (mikrodetik)
  phaseAngle = (deltaTime / period) * 360.0;
  // Konversi ke sudut fasa
  // Pastikan sudut berada dalam rentang 0-360 derajat
  if (phaseAngle > 360.0) {
    phaseAngle = fmod(phaseAngle, 360.0);
  }
}
```

Gambar 12. Program Pendeteksi *Zero Crossing* Pada *Software* Arduino Uno

Program pendeteksi titik *Zero Crossing* dalam bentuk sudut fasa diprogram melalui *software* Arduino IDE yang melakukan kalkulasi periode (dalam mikrodetik) dari sumber Listrik PLN dibandingkan dengan sumber Listrik Inverter (PLTS) (Musa Mohammed Gujja, 2024). Berikut perhitungan yang digunakan dalam program pendeteksi zero crossing:

$$Period = \frac{1}{freq} = \frac{1}{50} = 0,02 \text{ detik}$$

$$Period = 0,02 \times 1000000 = 20000 \mu s$$

Data periode dikalikan 1000000 untuk mengubah satuan detik ke mikrodetik, karena Arduino bekerja dalam μs untuk presisi tinggi.

$$\Delta T = time1 - time2$$

$$phaseAngel = \frac{\Delta T}{period} \times 360 \quad (2)$$

Data *delta time* (*time1* dan *time2*) dalam merupakan data waktu periode gelombang Listrik dari PLN maupun Inverter yang dibandingkan dengan periode referensi dan dikalikan 360 untuk mengkonversi data periode yang telah dikalkulasi menjadi data sudut fasa sebagai syarat untuk mencapai *zero crossing*.

Setelah menentukan perhitungan untuk memperoleh *zero crossing*, dilakukan pemrograman pada Arduino dengan memasukkan perhitungan tersebut dalam mode program yaitu “*unsigned long deltaTime = abs((long)(time2 - time1));*” agar sistem dapat mendeteksi titik *zero crossing* yang diinginkan yaitu dalam rentang 0-360° dengan syarat *zero crossing* tercapai jika data sudut fasa yang terdeteksi mendekati sudut 0° (*phaseAngle < 0-1°*).

Hasil Pengujian Sistem ATS Zero Crossing

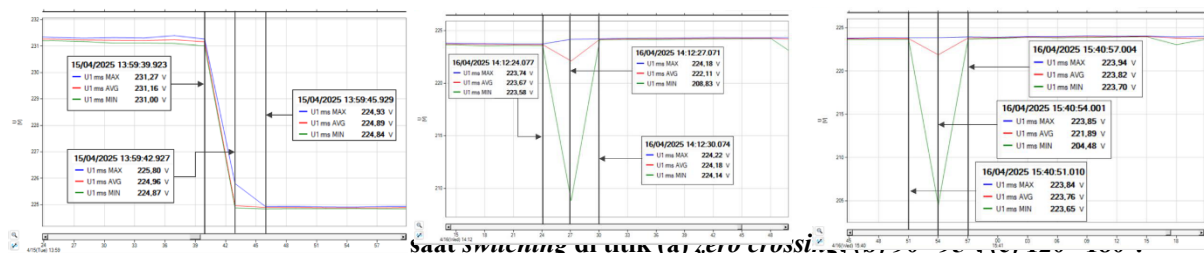
Pengujian dilakukan pada kondisi pembebanan resistif berupa lampu pijar 40W dan beban induktif berupa kipas 40W. Pengujian sistem ATS *Zero Crossing* bertujuan untuk mengevaluasi efektivitas mekanisme deteksi titik nol (*zero crossing*) dan proses perpindahan sumber daya listrik di dalam sistem ATS ketika menggunakan beban resistif dan induktif (I Wayan Sutaya, dkk. 2020).

Pengujian ini dirancang untuk menganalisis sejumlah parameter penting, termasuk tegangan, arus, frekuensi, dan waktu *switching* dalam sistem ATS *zero crossing*. Proses pengujian dilakukan pada dua kondisi: *switch* prioritas penggunaan sumber PLN maupun Inverter (PLTS).

Tabel 1. Pengujian ATS *Zero Crossing* kondisi beban lampu (resistif)
Kondisi Beban resistif (Lampu Pijar 40W)

Kondisi baterai	Perhimpitan Sudut	Tegangan Beban (V)	Arus Beban (A)	Frekuensi Beban (Hz)	t (s) <i>Switching</i>
PLN-Inverter	0-1°	224.96	0.16	49.934	6.005
Inverter-PLN	0-1°	226.13	0.16	49.968	5.998
PLN-Inverter	90-95°	224.36	0.16	49.917	6.006
Inverter-PLN	90-95°	222.11	0.17	50.089	5.997
PLN-Inverter	120-180°	221.80	0.17	50.031	6.00
Inverter-PLN	120-180°	221.89	0.16	50.153	5.994
Rata-Rata		223.5	0.16	50.015	6.00

Hasil pengujian menunjukkan bahwa sistem ATS *Zero Crossing* dapat bekerja untuk melakukan peralihan daya (*switching*) dari PLN ke Inverter dan sebaliknya Inverter ke PLN. Data tegangan, arus dan frekuensi rata-rata yang terukur pada beban lampu (resistif) juga menunjukkan hasil yang sesuai standar SPLN tahun 2012 yaitu $\pm 5\%$ dari 230V berarti tidak melebihi 241,5V dan tidak berkurang dari 218,5V. Namun hasil pengujian menunjukkan perubahan drastis saat *switching* menggunakan sudut perhimpitan 90°-95° dan 120°-180° dari pada saat *zero crossing* (0°-1°) pada beban lampu, terlihat dalam gambar data *PQ Analyzer* berikut:



Pengujian juga dilakukan dengan alat uji *PQ Analyzer* untuk melihat seberapa besar terjadi lonjakan tegangan maupun *flicker* (penurunan tegangan) secara sesaat *switching* terjadi (Peraturan SPLN, 2012). Hal ini bertujuan untuk melihat kemampuan sistem *zero crossing* dalam meminimalisir kondisi tegangan tersebut saat ATS bekerja.

Data respon tegangan beban R pada *PQ Analyzer* menunjukkan bahwa ketika ATS bekerja pada kondisi (a) *zero crossing*, terjadi proses *switching* peralihan sumber tegangan (U1

AVG) dari level tegangan 231,16 V ke level tegangan 224,89 V yang berarti peralihan sumber (tegangan rms) dari penggunaan PLN ke Inverter.

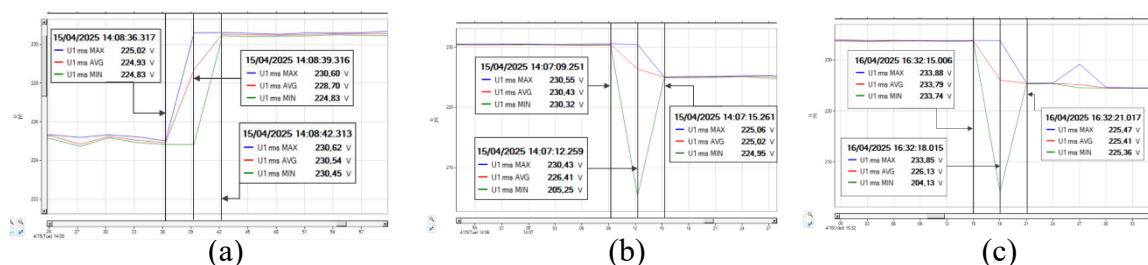
Switching dengan kondisi beban resistif, tegangan maksimum (U1 MAX) yang terukur yaitu 225,80 V dan tegangan minimum (U1 MIN) yang terukur yaitu 224,87 V dengan waktu switching yang tercatat dalam PQ Analyzer yaitu 6.005 ms (milidetik). Hal ini berarti ketika ATS bekerja (switching), lonjakan tegangan hanya mencapai 0,87 V diatas tegangan rms (224,96 V) dan flicker tegangan mencapai 0,06 V dibawah tegangan rms (224,96 V) pada sisi beban. Nilai-nilai tegangan yang terukur pada pengujian ATS pada beban R, masih berada di batas aman tegangan yang ditetapkan SPLN.

Kondisi (b) dan (c) menunjukkan perubahan yang sama pada sisi beban R saat switching yaitu terjadi penurunan tegangan secara signifikan (flicker) yaitu 208,83V (saat sudut perhimpitan 90°-95°) dan 204,48V (saat sudut perhimpitan 120°-180°) yang dimana data ini sudah melewati batas toleransi tegangan dari SPLN.

Tabel 4.2 Pengujian ATS Zero Crossing kondisi beban kipas (induktif).

Kondisi Beban Induktif (Kipas 40W)						
Kondisi Switching	Perhimpitan Sudut	Tegangan Beban (V)	Arus Beban (A)	Frekuensi Beban (Hz)	t Switching (ms)	Cos ϕ
PLN-Inverter	0-1°	226.41	0.15	50.017	6.011	0.94
Inverter-PLN	0-1°	228.70	0.15	49.869	5.996	0.94
PLN-Inverter	90-95°	223.87	0.15	49.964	6.005	0.94
Inverter-PLN	90-95°	222.29	0.15	50.106	5.996	0.94
PLN-Inverter	120-180°	226.13	0.17	50.169	6.011	0.94
Inverter-PLN	120-180°	230.43	0.16	50.212	5.986	0.94
Rata-Rata		226.305	0.15	50.056	6.00	0.94

Hasil pengujian menunjukkan bahwa sistem ATS *Zero Crossing* dapat bekerja untuk melakukan peralihan daya (*switching*) dari PLN ke Inverter dan sebaliknya Inverter ke PLN. Data tegangan, arus dan frekuensi rata-rata yang terukur pada beban kipas (induktif) juga menunjukkan hasil yang sesuai standar SPLN tahun 2012 yaitu $\pm 5\%$ dari 230V berarti tidak melebihi 241,5V dan tidak berkurang dari 218,5V. Namun hasil pengujian menunjukkan perubahan drastis saat *switching* menggunakan sudut perhimpitan 90°-95° dan 120°-180° dari pada saat *zero crossing* (0°-1°) pada beban kipas, terlihat dalam gambar data *PQ Analyzer* berikut.



Gambar 14. Respon beban induktif saat switching di titik (a) zero crossing, (b) 90°-95°, (c) 120°-180°

Pengujian dengan alat uji PQ Analyzer bertujuan untuk melihat seberapa besar terjadi lonjakan tegangan maupun fliker (penurunan tegangan) pada beban kipas (induktif) secara

sesaat switching terjadi. Hal ini bertujuan untuk melihat kemampuan sistem zero crossing dalam meminimalisir kondisi tegangan tersebut saat ATS bekerja (Paula Remigio, 2022).

Data respon tegangan beban L pada PQ Analyzer menunjukkan bahwa ketika ATS bekerja pada kondisi (a) zero crossing, terjadi proses switching peralihan sumber tegangan (U1 AVG) dari level tegangan 224,93 V ke level tegangan 230,54 V yang berarti peralihan sumber (tegangan rms) dari penggunaan Inverter ke PLN.

Switching dengan kondisi beban induktif, tegangan maksimum (U1 MAX) yang terukur yaitu 230,60 V dan tegangan minimum (U1 MIN) yang terukur yaitu 224,83 V dengan waktu switching yang tercatat dalam PQ Analyzer yaitu 5.996 ms (milidetik). Hal ini berarti ketika ATS bekerja (switching), lonjakan tegangan hanya mencapai 1,9 V diatas tegangan rms (228,70 V) dan flicker tegangan mencapai 3,87 V dibawah tegangan rms (228,70 V) pada sisi beban induktif. Nilai-nilai tegangan yang terukur pada pengujian ATS zero crossing pada beban L, masih berada di batas aman tegangan yang ditetapkan SPLN.

Kondisi (b) dan (c) menunjukkan perubahan yang sama pada sisi beban L saat switching yaitu terjadi penurunan tegangan secara signifikan (flicker) yaitu mencapai 205,25V (saat sudut perhimpitan 90°-95°) dan 204,13V (saat sudut perhimpitan 120°-180°) yang dimana data ini sudah melewati batas toleransi tegangan dari SPLN.

Hal ini juga terbukti saat pengujian di laboratorium, yaitu beban induktif maupun beban resistif, mengalami kedip/redup sesaat switching terjadi di titik selain zero crossing (0°-1°) atau 90°-95° dan 120°-180°.

KESIMPULAN

Berdasarkan analisa dari Prototipe Sistem *Automatic Transfer Switch Zero Crossing*, dapat disimpulkan bahwa prototipe ATS zero crossing yang dirancang berhasil membaca titik zero crossing dengan membandingkan sudut fase antara Inverter dan PLN. Prototipe yang dirancang berhasil melakukan perpindahan sumber daya secara otomatis dengan mikrokontroler arduino nano sebagai pusat pengendali.

REFERENSI

- Bawalo, J., Rumbayan, M., & Tulung, N. M. (2021). Perencanaan Pembangkit Listrik Tenaga Surya Di Rumah Kebun
- Boxwell, M., 2017. *The Solar Electricity Handbook – 2017 Edition: A simple, pratical guide to solar energy – designing and installing solar photovoltaic system*. Greenstream Publishing.
- Haifeng Wang, Xinzhen Wu, Xiaoqin Zheng, Xibo Yuan. (2021) *An improved hysteresis current control scheme during grid voltage zero-crossing for grid-connected three-level inverters*. *Research Paper IET Power Electronics*. <https://doi.org/10.1049/pel2.12161>.
- Kartaca, K., & Abbasov, T. (2019). *Modeling And Investigation Of Ferrofluid Micro Transformer And Industrial Type Transformer*. *The International Journal of Energy and Engineering Sciences*, 3(3), Article 3.
- Peraturan SPLN D3.022-2: 2012, Inverter Untuk Pembangkitan Tenaga Listrik Surya. (PLTS) Persyaratan dan Metode Uji.
- RI' Ayatullah, A.Z., Waluyo, W., 2013. Analisis Arus Transien Transformator Setelah Penyambungan Beban Gedung Serbaguna PT "X." REKA ELKOMIKA 1.
- Sudjoko, R., & Hartono, H. (2018). Rancang Bangun Sistem Proteksi Generator Sinkron 3 Fasa Terhadap Arus Beban lebih dan Drop Tegangan Berbasis Mikrokontroler Arduino. *Jurnal Penelitian*, 3(2), Article 2. <https://doi.org/10.46491/jp.v3i2.32>.
- Susanto, N. H. (2019). *Sistem Automatic Transfer Switch Berbasis Arduino*. Universitas Teknologi Yogyakarta.

- Wall, R. W. (2003). *Simple methods for detecting zero crossing*. *IECON'03. 29th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society* (IEEE Cat. No.03CH37468), 3, 2477-2481 Vol.3. <https://doi.org/10.1109/IECON.2003.1280634>.
- Utomo, M. S. D., Fuada, S., Liu, C., Asri, H. N., Alwan, M. F., Kinanti, K. A., & Pratiwi, W. (2021). Analisis perhitungan teori dengan menggunakan variasi simulator online pada rangkaian pembagi tegangan. *Telecommunications, Networks, Electronics, and Computer Technologies (TELNECT)*, 1(2), 61-70.
- Rachmat, H. H., & Say, M. M. L. (2023). EVALUASI RESISTANSI SENSITIVITAS MODUL GALVANIC SKIN RESPONSE BERBASIS ARDUINO NANO. *Jurnal Media Elektro*, 57-65.
- Kurniawan, A. (2019) *Arduino Nano A Hands-on Guide for Beginner*. PE press. Kusumafikri, D.G., Muid, A. dan Sanubary, I. (2019) 'Rancang Bangun Alat Pendeteksi Bakso Mengandung Boraks Menggunakan Sensor Resistansi', *PRISMA FISIKA*, 7(2).
- Lestari, S., Harnoko, S., (2022). *Proteksi Sistem Tenaga Listrik*. Penerbit Andi, Yogyakarta.
- Kustiawan ST,MT, E. (2018). Meningkatkan Efisiensi Peralatan Dengan Menggunakan Solid State Relay (SSR) Dalam Pengaturan Suhu Pack Pre- Heating Oven (PHO). 9(1).
- Sussi, S., Sofia, S., Nurwulan, N., Dede, D., Rika, R., Muhammad, M., Amri, A., (2022). Agrotech: Penyiraman Tanaman dan Pemantauan Kadar Air dalam Tanah Berbasis Internet Of Things. *JUPITER* 14, 441845.
- Muktiarsa, P., & Yuandari, A. (2020). Penggerak Rak Pada Integrated Storage System. *IMDeC*, 166–172.
- I Wayan Sutaya, Ketut Udy Ariawan, I Gede Nurhayata. (2021). *Analysis and Simulation of Current Zero CrossingTime Interval Under Different Loads*. 4th International Conference on Innovative Research Across Disciplines (ICIRAD 2021).
- Paula Remigio, C., Juan Jose, G., Olivia, F., Jose, M., Javier, F., Manuel, J., Agustin, A., P., Jose, C. P. S. (2022). *Current Status and Future Trends of Power Quality Analysis*. Research Group PAIDI-TIC-168, Department of Automation Engineering, Electronics, Architecture and Computers Networks, University of Cádiz, E-11202 Algeciras, Spain.
- Mus, M. G., Dahaman, I., Muhammad, N. H., Mohamed, S., Mohamad, N. A., & Khalil, A. (2024). *Rounding function-based zero crossing detection for a sensorless BLDC motor control*. *International Journal of Power Electronics and Drive Systems (IJPEDS)*, Vol. 16, No. 1, March 2025, pp. 106~116.