

PERANCANGAN KONTROLER UNTUK TURBIN ANGIN SKALA KECIL

Muhammad Rinaldy Robiansyah

Program Studi Teknik Elektro
Fakultas Teknik Elektro, Universitas Telkom, Bandung
E-mail : robiansyah24@gmail.com

Abstrak – Di Indonesia, upaya pengadaan energi listrik di daerah teringgal sudah dilakukan melalui penggunaan pembangkit listrik tenaga angin skala kecil. Pada sistem yang telah dibangun di beberapa daerah ini, digunakan generator TSD-500 dengan spesifikasi daya keluarannya adalah 500 watt, tegangan 180V AC tiga fasa, dan arus 3A. Sistem pembangkit listrik tenaga angin skala kecil terdiri dari beberapa komponen antara lain: turbin angin, generator, kontroler, data logger, sistem penyimpanan energi (baterai, pump storage), dan inverter. Energi keluaran generator TSD-500 berupa gelombang tegangan listrik AC (Alternating Current) tiga fasa dan digunakan baterai sebagai sistem penyimpanan energi listrik. Baterai bekerja pada tegangan listrik DC (Direct Current). Kontroler digunakan untuk mengatur proses penyimpanan energi hasil konversi kedalam baterai. Proses penyimpanan tersebut meliputi: penyearahan tegangan AC tiga fasa menjadi tegangan DC, pemantauan besar energi listrik keluaran generator, pemantauan besar arus dan tegangan keluaran kontroler, penyesuaian besar arus dan tegangan proses pengisian baterai, serta upaya pengamanan sistem dari overvoltage. Perangkat kontroler yang dirancang terdiri dari beberapa subsistem dan telah teruji melalui proses penyimpanan energi listrik dari keluaran generator (tegangan sekitar 90V DC) ke dalam baterai dengan tegangan dan arus sekitar 13V dan 2,5A.

Kata kunci: Generator, Buck Regulator, Three Phase Rectifier.

1 Pendahuluan

Keberlangsungan kehidupan manusia pada saat ini sangat tergantung pada ketersediaan energi, dalam hal ini adalah energi listrik. Energi listrik digunakan untuk menunjang berbagai kegiatan manusia seperti transportasi, operasional industri, pengolahan pangan, panggung hiburan, dan lain sebagainya. Di seluruh dunia terdapat 7 milyar lebih manusia, dan 70% hidup di negara berkembang, namun perlu diketahui bahwa 30% lebih, dari 7 milyar manusia ini masih belum menikmati kemajuan dunia yang bernama peradaban elektrik ini. Oleh karena itu, untuk membantu sebagian manusia yang masih belum merasakan adanya energi listrik ini dibutuhkan sebuah pembangkit listrik skala kecil. Karena yang tertinggal ini sudah jelas tidak akan mampu membeli atau membangun pembangkit listrik dengan skala besar.

Salah satu energi yang termasuk sumber energi terbarukan dan berpotensi sebagai sumber pembangkit listrik skala kecil adalah energi angin. Namun pada sistem pembangkit listrik energi angin terdapat kendala utama yaitu torsi yang dihasilkan dari putaran bilah kincir angin

cenderung kecil. Saat ini telah ditemukan sebuah teknologi generator pada turbin angin, yaitu *coggingless technology* (teknologi tanpa lendutan). *Coggingless technology* memungkinkan generator untuk berputar tanpa adanya *cogging* (lendutan) akibat adanya interaksi medan magnet yang dihasilkan oleh permanent magnet dengan inti dari solenoids (kumparan) sehingga putaran generator lebih ringan dan generator bisa berputar di torsi yang sangat kecil. Energi listrik maksimal yang dihasilkan dari generator skala kecil ini adalah 500 watt, dengan tegangan *line to netral* 160 volt tiga fasa dan arus 3 ampere.

Di Indonesia, terdapat sebuah pusat penelitian tentang pembangkit listrik tenaga angin skala kecil, yaitu PT. Lentera Angin Nusantara. Pada sistem pembangkit listrik tenaga angin skala kecil yang terdapat di PT. Lentera Angin Nusantara, energi yang dihasilkan tidak didistribusikan ke beban secara langsung, melainkan disimpan pada sistem penyimpanan energi dengan menggunakan baterai 24V. Sistem penyimpanan yang berupa baterai ini bekerja pada tegangan DC. Bentuk tegangan keluaran generator adalah AC tiga fasa sedangkan tegangan kerja baterai adalah DC sehingga pada

sistem pembangkit listrik tenaga angin skala kecil ini diperlukan sebuah kontroler yang berfungsi sebagai pengatur proses penyimpanan energi listrik keluaran turbin. Proses-proses yang terdapat pada kontroler antara lain adalah: pembacaan level tegangan keluaran generator, penyearahan gelombang AC tiga fasa, penyesuaian level tegangan dari rectifier dan memaksimalkan energi listrik yang dapat diekstrak dari energi angin. Perancangan kontroler untuk turbin angin skala kecil ini dimaksudkan untuk membantu upaya pengadaan energi listrik di daerah tertinggal yang sudah dilakukan oleh PT. Lentera Angin Nusantra dan sebagai generasi Indonesia, ini merupakan salah satu usaha untuk mewujudkan Indonesia mampu swasembada teknologi.

2 Landasan Teori

2.1. Deskripsi Kerja dan Konsep Solusi

Merujuk pada permasalahan yang ada, kerja dari kontroler turbin angin ini adalah sebagai berikut:

Penyesuaian tegangan keluaran generator dengan tegangan kerja baterai. Tegangan keluaran generator adalah tegangan AC tiga fasa, sehingga perlu adanya penyesuaian dengan tegangan kerja baterai yaitu tegangan DC. Pengaturan level tegangan keluaran kontroler, Karena besar tegangan keluaran generator yang fluktuatif (tergantung kecepatan angin) sehingga perlu adanya regulasi terhadap tegangannya untuk dapat disimpan kedalam baterai. Selain itu, pada kontroler juga terdapat sistem pengaman guna melindungi komponen dalam kontroler itu sendiri jika terjadi *overvoltage*.

Jadi, KMS adalah metode pengelolaan pengetahuan yang meningkatkan kualitas SDM organisasi, dengan mengoptimasi jalur komunikasi *knowledge* antar elemennya, sehingga pengetahuan SDM meningkat. KMS merupakan proses kompleks menggabungkan berbagai solusi menjadi satu. Institusi harus komprehensif dalam mengumpulkan, mengatur, menyebarkan, menganalisa pengetahuan untuk kebutuhan institusi kini dan di masa datang.

2.2. Pemilihan Konsep

Berdasarkan deskripsi kerja dan konsep solusi diatas, adapun konsep yang akan dirancang adalah sebagai berikut:

Untuk menyesuaikan tegangan keluaran generator dengan tegangan kerja baterai, diaplikasikan rangkaian penyearah tiga fasa yang merubah tegangan AC tiga fasa menjadi tagangan DC. Keluaran dari rectifier masih memiliki ripple yang sangat tinggi sehingga diperlukan adanya filter untuk mengurangi ripple tersebut. Tegangan DC hasil keluaran filter memiliki level tegangan yang fluktuatif dan cenderung tinggi karena tergantung pada tegangan keuluaran generator, oleh karena itu digunakan Buck Regulator yang akan mengatur level tegangan keluaran kontroler. Selain untuk mengatur level tegangan keluaran kontroler, penggunaan Buck Regulator juga ditujukan untuk mengatur besar arus yang masuk kedalam baterai, karena besar arus yang mengalir dipengaruhi oleh besar beda pontensial listrik antara kontroler dengan

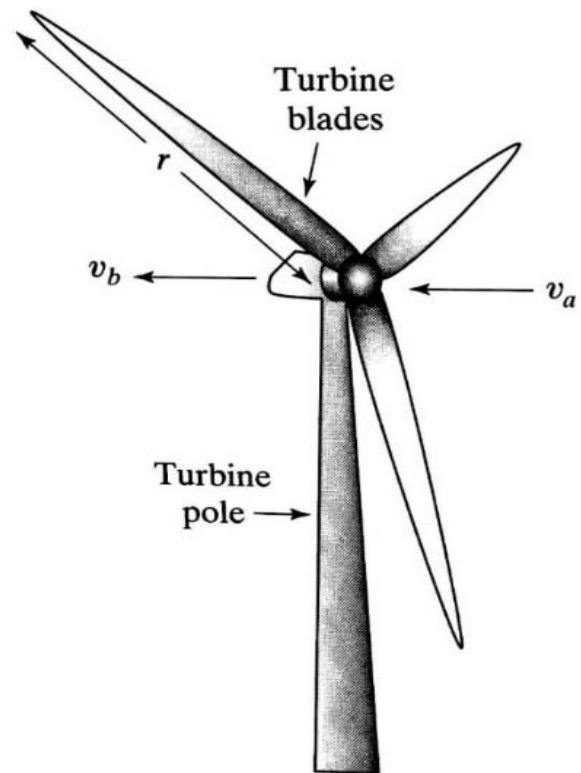
baterai. Pengaturan arus dan tegangan pada kontroler diaplikasikan pada metode MPPT (Maximum Power Point Tracking) guna meningkatkan efisiensi transfer dayanya. Untuk switching pada buck regulator digunakan sinyal PWM dengan frekuensi konstan. Untuk itu digunakan MCU (Micro Controller Unit) untuk mengatur proses switching pada buck regulator dan memonitoring tegangan keluaran kontroler, sehingga level tegangannya tetap stabil pada level arus yang berbeda-beda.

2.3. Pemilihan Konsep

Turbin angin adalah kincir angin yang digunakan untuk membangkitkan tenaga listrik dengan menggunakan tenaga angin. Perhitungan daya yang dapat dihasilkan oleh sebuah turbin angin dengan diameter kipas r adalah :

$$P = \frac{1}{2} \rho \pi r^2 v^3 \quad (1)$$

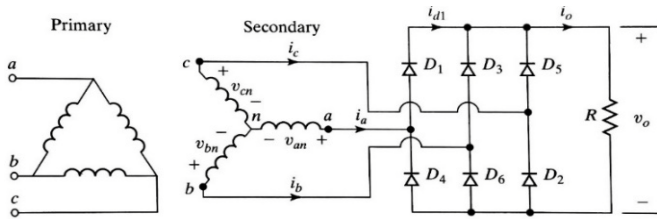
dengan ρ adalah kerapatan angin pada waktu tertentu dan v adalah kecepatan angin pada waktu tertentu. Umumnya daya efektif yang dapat diambil oleh turbin angin hanya sebesar 20%-30% dari daya estimasi diatas.



Gambar 1 Turbin angin[1].

2.4. Rectifier Tiga Fasa

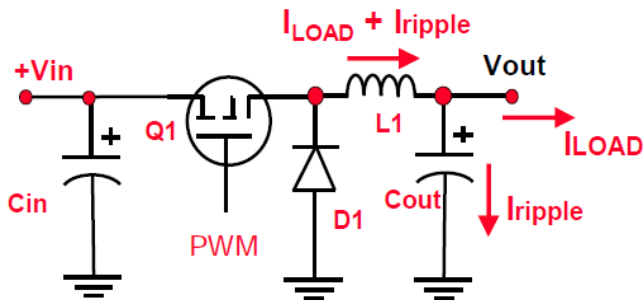
Rectifier atau *AC to DC Converter* berfungsi mengubah tegangan AC menjadi tegangan DC. Komponen utama yang digunakan pada proses *rectifier* yaitu dioda. Salah satu jenis *rectifier* yaitu *three phase bridge rectifier*.



Gambar 2 Rangkaian Three Phase Bridge Rectifier [1].

2.5. Buck Converter

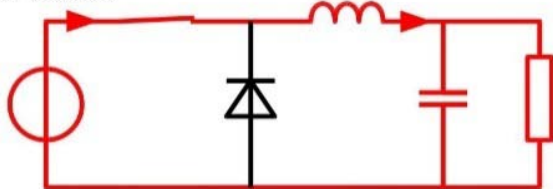
Buck Converter adalah rangkaian yang nilai tegangan keluaran lebih rendah daripada nilai tegangan masukan. Rangkaian buck converter terdiri dari induktor, kapasitor dan komponen pensaklaran berupa MOSFET.



Gambar 3. Rangkaian Buck Converter [8]

Prinsip kerja dari rangkaian buck converter terbagi atas dua kondisi yaitu kondisi saklar on dan kondisi saklar off. Ketika pada kondisi saklar on, arus mengalir dari sumber menuju induktor sehingga terjadi proses penyimpanan arus pada induktor. Pada waktu yang sama kapasitor akan menyimpan energi dalam bentuk tegangan.

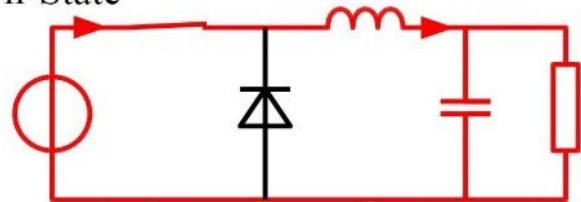
On-State



Gambar 4 Rangkaian Buck Converter Kondisi Saklar On [8]

Kondisi kedua adalah ketika kondisi saklar off seperti pada Gambar 5 dan tidak ada sumber tegangan maka arus yang disimpan pada induktor dikeluarkan menuju ke beban. Pada proses ini, induktor melakukan pengosongan energi yang tersimpan ke seluruh rangkaian. Jika kondisi saklar on lagi sebelum induktor habis sepenuhnya, tegangan pada beban akan selalu lebih besar dari nol. [8]

On-State



Gambar 5 Rangkaian Buck Converter Kondisi Saklar Off [8]

Persamaan antara masukan dan keluaran pada buck converter dapat dituliskan seperti:

$$\frac{V_o}{V_s} = D \tag{1}$$

dengan :

- V_o = tegangan keluaran
- V_s = tegangan masukan
- D = duty cycle

Penentuan nilai induktor dan kapasitor bergantung pada frekuensi switching (F_{sw}) dan $I_{ripple}(\Delta I)$ yang telah ditentukan.

Induktor:

$$L = V \times \frac{\Delta T}{\Delta I} \tag{2}$$

$$L = (V_{in} - V_{out}) \times \frac{D}{F_{sw} \times I_{ripple}} \tag{3}$$

Dengan :

- L = nilai induktansi
- V_{in} = tegangan input
- V_{out} = tegangan output

Kapasitor output:

$$\Delta V = \Delta I \times \left(ESR + \frac{\Delta T}{C} \right) \tag{4}$$

$$C_{out} = \frac{(\Delta I \times \Delta T)}{\Delta V - (\Delta I \times ESR)} \tag{5}$$

Dengan :

- C = kapasitor
- V_{out} = tegangan output
- ΔI = I_{ripple}
- ΔV = tegangan ripple
- ESR = Effective Series Resistance

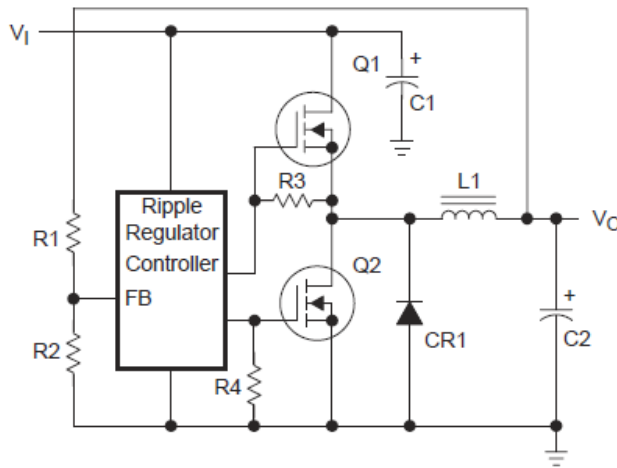
Kapasitor input:

$$C_{input} = \frac{\Delta T}{\frac{V_{ripple}}{I_{ripple}} - ESR} \quad (6)$$

2.6. Synchronous Buck Converter

Pada topologi *synchronous buck converter*, sebuah *power MOSFET* menggantikan *commutating diode output-stage* dari *buck converter* tradisional. Perbaikan ini mengurangi tipikal *drop* dioda 0.5-V-sampai-1-V hingga sekitar 0.3 V atau kurang, menghasilkan perbaikan efisiensi rangkaian sekitar 5% atau lebih besar.

Rangkaian dasar *synchronous buck converter* terdiri dari sepasang *MOSFET*, sebuah filter *output*, and sebuah kontroler yang menghasilkan fungsi *synchronous switching*. Berikut ini merupakan gambar diagram skematik sederhana dari sebuah *synchronous buck converter*.



Gambar 6. Konfigurasi rangkaian synchronous buck converter.[13]

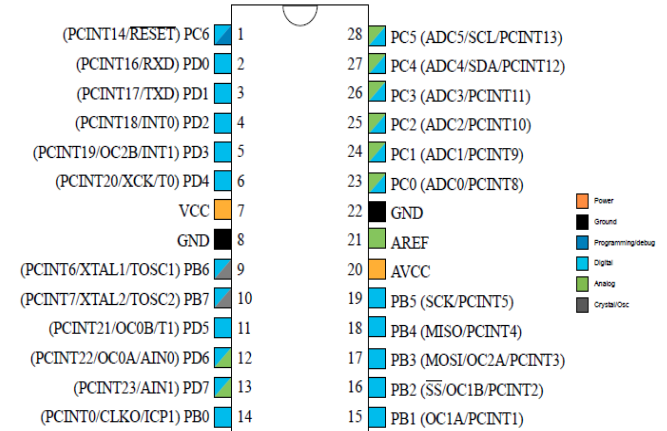
Pada *synchronous buck converter* yang ditunjukkan pada Gambar 6, kontroler *ripple regulator* mengendalikan tegangan *output*. Jika tegangan *output* turun dibawah level regulasi, kontroler menghidupkan MOSFET Q1 dan mematikan Q2; hal ini sekaligus mengisi inductor L1 dan menyuplai *output* beban. Ketika tegangan *output* melebihi level regulasi, kontroler mematikan Q1 dan menghidupkan Q2, dengan begitu menghasilkan sebuah jalur pengganti melewati Q2 untuk menghantarkan arus pada inductor L1 ke beban; hal ini menjaga pengahntaran daya yang kontinu selama kondisi hidup dan mati pada Q1. Kontroler memastikan bahwa power MOSFETs Q1 dan Q2 tidak pernah hidup secara bersamaan, sebuah kondisi yang akan sesaat menempatkan hubung singkat pada sambungan daya *input*, menghasilkan efisiensi yang sangat rendah dan berpotensi kerusakan pada perangkat *switching*^[13].

2.7. Atmel® ATmega328

Atmel® *picoPower®* ATmega328/P adalah sebuah mikrokontroler *low - power* CMOS 8-bit berbasis AVR® dengan arsitektur RISC (*Reduced Instruction Set Computing*) yang sudah ditingkatkan. Dengan mengeksekusi instruksi secara kuat, ATmega328/P mencapai *throughputs* mendekati 1MIPS per MHZ. perbaikan sistem ini bertujuan untuk mengoptimalkan perangkat dari segi konsumsi daya terhadap kecepatan^[9].

Pin-out

Figure 5-1. 28-pin PDIP



Gambar 7 Konfigurasi pin ATmega328/P PDIP. ^[9]

Tabel 1. Spesifikasi ATmega328/P[9].

Features	ATmega328/P
Pin Count	28/32
Flash (Bytes)	32K
SRAM (Bytes)	2K
EEPROM (Bytes)	1K
General Purpose I/O Lines	23
SPI	2
TWI (I ² C)	1
USART	1
ADC	10-bit 15kSPS
ADC Channels	8
8-bit Timer/Counters	2
16-bit Timer/Counters	1

3 Perancangan Sistem

3.1. Desain Sistem

Kontroler pada sistem pembangkit listrik tenaga angin digunakan sebagai pengatur proses penyimpanan energi listrik yang dihasilkan generator kedalam sistem penyimpanan energi (baterai, *pump storage*). Sistem kontroler turbin angin terdiri dari beberapa bagian, antara lain:

A. Rectifier tiga fasa

Penyearah Tiga Fasa digunakan untuk menyearahkan gelombang tegangan *output* generator turbin angin yang berupa gelombang tegangan AC tiga fasa menjadi tegangan DC.

B. Kontak relay

Relay kontak berfungsi sebagai penghubung antara generator dengan system kontroler. Generator akan dihubungkan ke system jika kecepatan angin pada turbin angin lebih dari 3m/s dan jika dibawah itu maka generator tidak dihubungkan dengan sistem. Tegangan keluaran generator ketika kecepatan angin 3 m/s adalah sekitar 30V, tegangan ini disebut *cut-in voltage*.

C. Sensor tegangan tiga fasa

Subsistem ini digunakan untuk memantau tegangan keluaran generator turbin angin. Data hasil pantauan ini digunakan untuk mengatur proses penghubungan sistem melalui kontak relay.

D. Buck regulator

Buck regulator berfungsi untuk menurunkan tegangan keluaran generator berdasarkan sinyal pwm (*pulse width modulation*) sebelum disalurkan ke beban. Melalui subsistem ini sistem kontroler melakukan pengontrolan terhadap besar tegangan dan arus keluaran yang akan disalurkan ke beban. *Buck regulator* yang dirancang pada sistem kontroler ini memiliki spesifikasi sebagai berikut:

Tabel 2 spesifikasi buck regulator hasil perancangan.

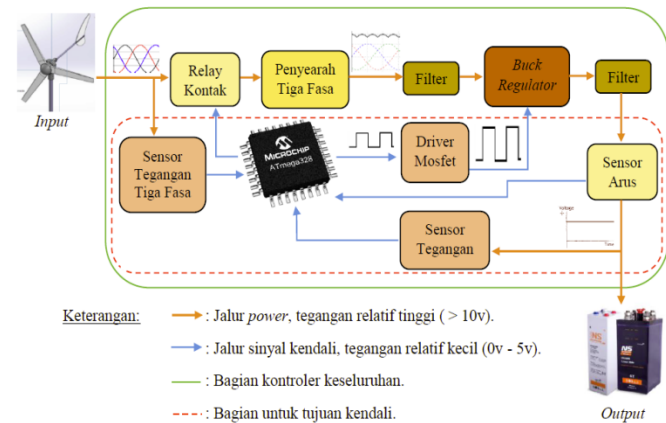
Tegangan <i>input</i> maksimum	200 V
Tegangan <i>output</i> maksimum	45 V
Arus <i>output</i> maksimum	20 A
Frekuensi <i>switching</i> maksimum	25.641 kHz

E. Driver MOSFET

Driver MOSFET digunakan untuk menyesuaikan level tegangan sinyal control dari mikrokontroler dengan level tegangan yang dibutuhkan untuk *switching* (pensaklaran) *power* MOSFET pada *buck regulator*.

F. MCU (Micro Controller Unit)

Mikrokontroler pada sistem kontroler ini berperan sebagai pusat pemrosesan. Proses-proses seperti



Gambar 8 Diagram blok sistem kontroler turbin angin.

konversi sinyal analog hasil pembacaan sensor menjadi sinyal digital, *switching* (pensaklaran) pada buck regulator, pemrosesan sinyal-sinyal kontrol pada kontroler, serta pengamanan sistem dilakukan pada subsistem ini. Karakter dari kontroler juga tergantung pada algoritma program yang ditanamkan pada mikrokontroler. Karena mikrokontroler memiliki peran yang sangat penting dan juga bisa disebut sebagai pusat koordinasi dari perangkat sistem kontroler.

G. Sensor tegangan

Sensor tegangan digunakan untuk memantau tegangan keluaran kontroler. Sinyal tegangan listrik dari sensor tegangan ini akan diubah menjadi sinyal digital pada mikrokontroler.

H. Sensor arus

Sensor arus digunakan untuk memantau arus keluaran kontroler yang disalurkan ke beban. Melalui subsistem ini, besar arus keluaran kontroler diubah menjadi besar sinyal tegangan listrik yang akan diubah menjadi sinyal digital oleh mikrokontroler.

I. Filter

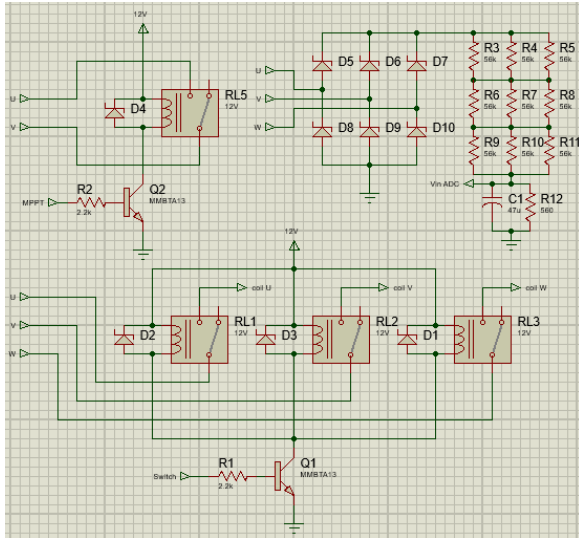
Filter berfungsi untuk mengurangi tingkat ripple tegangan. Filter yang berfungsi untuk mengurangi *ripple* tegangan adalah berupa rangkaian kapasitor dan resistor. Dalam sistem kontroler ini terdapat dua filter yang terpasang pada masukan dan keluaran *buck regulator*. Filter yang terpasang pada masukan *buck regulator* berfungsi untuk mengurangi *ripple* tegangan keluaran generator yang sudah disearahkan menjadi tegangan DC sebelum masuk ke *buck regulator*. Filter yang terpasang pada keluaran *buck regulator* berfungsi untuk mengurangi *ripple* tegangan keluaran sistem kontroler yang akan disalurkan ke beban.

3.2. Perancangan Perangkat Keras

Pada perancangan ini, sistem perangkat kontroler dibagi menjadi beberapa subsistem, hal ini dimaksudkan agar mempermudah *tracing* dan perbaikan jika terjadi *malfunction*

atau kerusakan. Adapun sub-sub sistem tersebut adalah sebagai berikut:

A. Kontak relay dan pendeteksi tegangan generator

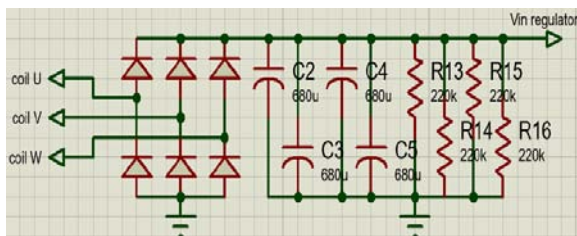


Gambar 9 skematik subsistem kontak relay dan pendeteksi tegangan keluaran generator.

Subsistem ini digunakan sebagai saklar penghubung antara perangkat kontroler dengan generator turbin angin melalui tiga buah relay kontak yang terpasang. Pensaklaran diatur berdasarkan hasil *monitoring* tegangan keluaran generator. Proses *monitoring* dilakukan dengan cara mengkonversi data analog keluaran dari *rectifier* tiga fasa dan *voltage divider* melalui mikrokontroler. Jika tegangan keluaran generator telah melewati batas *cut-in* (30V) maka sistem akan terhubung dengan generator, tetapi jika tegangan keluaran generator terlalu besar dan melewati batas *cut-off* (180V) maka kontak relay akan dibuka sehingga sistem tidak terhubung dengan generator.

B. Rectifier tiga fasa dan RC input filter

Subsistem ini digunakan untuk menyearahkan tagangan listrik tiga fasa keluaran generator menjadi tegangan DC. Tegangan DC hasil penyearahan memiliki ripple yang relatif tinggi sehingga diaplikasikan rangkaian filter RC guna mengurangi tingkat ripple-nya.



Gambar 10 skematik subsistem rectifier tiga fasa dan RC input filter.

C. Buck regulator

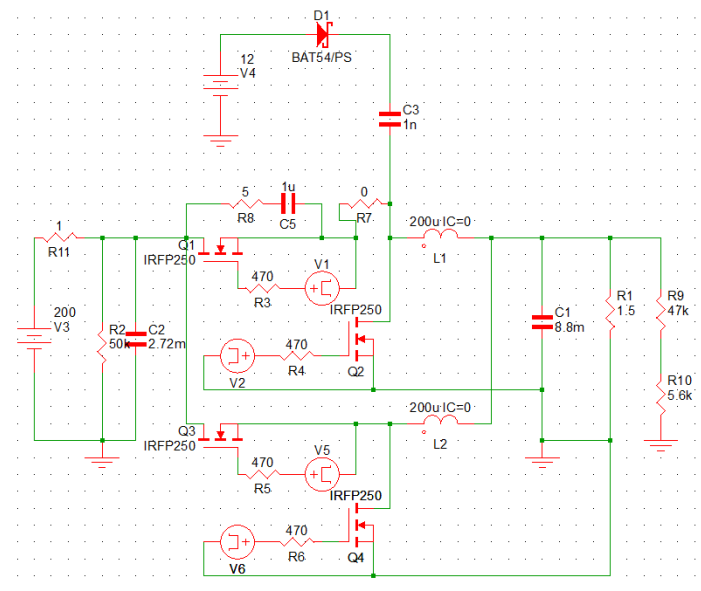
Buck regulator digunakan untuk mengatur besar tegangan dan arus keluaran kontroler. Efisiensi *buck regulator* (dari segi rugi daya dan penggunaan ukuran komponen penyusun) dipengaruhi oleh besar frekuensi *switching* yang digunakan. Tingginya frekuensi yang digunakan berbanding lurus dengan efisiensi sistem. Namun besar kecepatan *switching* yang akan digunakan dibatasi oleh kemampuan *respon time* dari tiap komponen penyusunnya. Besar frekuensi *switching* (pensaklaran) yang digunakan pada *buck regulator* didapat dari perhitungan *switching time* MOSFET dan MOSFET driver, lalu diambil komponen dengan *switching time* paling lama. *Switching time* merupakan waktu yang dibutuhkan perangkat untuk transisi dari keadaan OFF ke ON atau sebaliknya. Besar *switching time* didapat dari penjumlahan durasi *time delay* (waktu tunda) dan *rise time/fall time*.

Tabel 3 perbandingan switching time.

Komponen	Maximum swtiching time
IRFP250 (power mosfet)	220 nS
IR2101 (mosfet driver)	390 nS

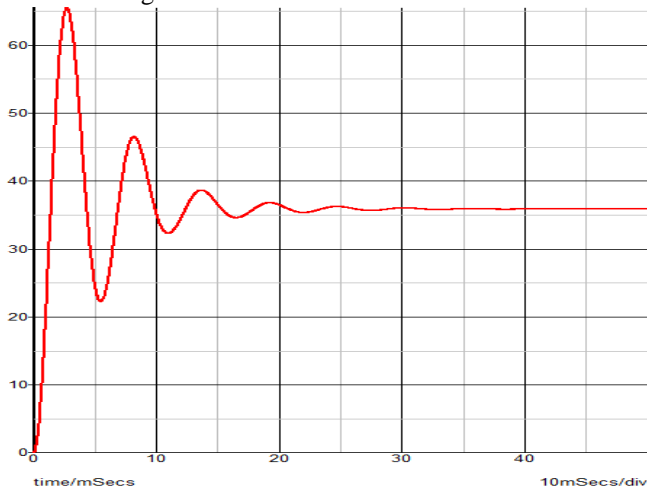
Dari perhitungan *switching time* diatas, dilakukan pengujian melalui simulator untuk melihat kinerja dari sistem yang telah dirancang. Simulasi dilakukan dengan spesifikasi sebagai berikut:

- $V_{in} = 200V$
- Hi – side MOSFET Duty Cycle = 22,5 %
- Lo – side MOSFET Duty Cycle = 75 %
- Switching period = $4 \times 10^{-5}s$



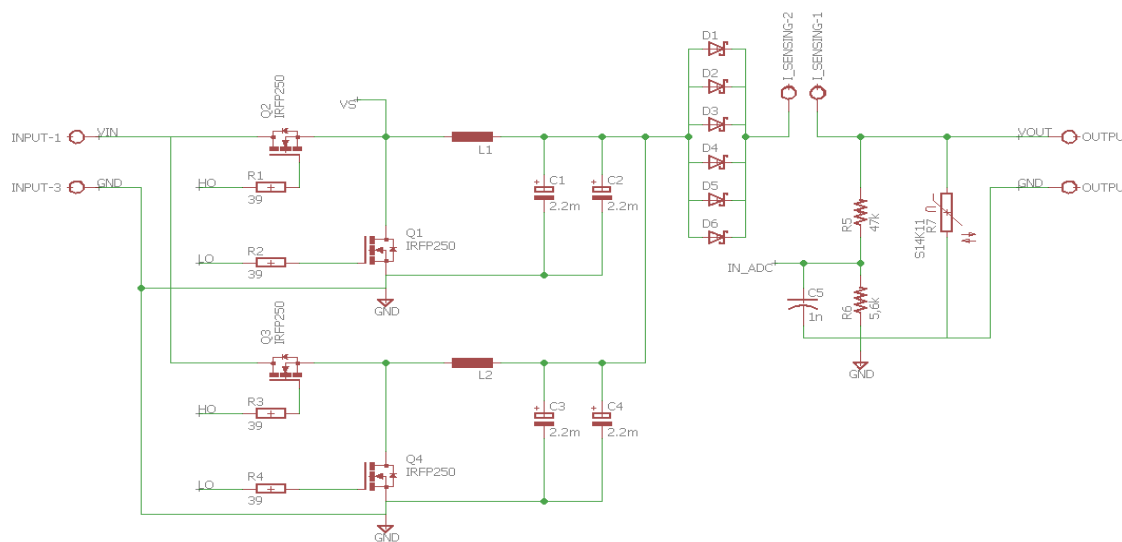
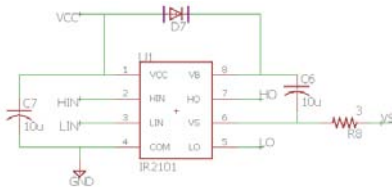
Gambar 11 skematik perancangan buck regulator pada software SIMETRIX.

Pada simulasi ini, digunakan sebuah resistor dengan nilai resistansi 1.5 ohm sebagai beban sistem, dan didapat tegangan keluaran sebagai berikut:



Gambar 12 respon tegangan buck regulator

Pada gambar respon tegangan diatas, terlihat bahwa rancangan skematik sistem telah bekerja dengan baik pada simulasi nilai.



Gambar 13 Skematik hasil perancangan buck regulator.

Nilai *duty cycle* (D), *inductor continuous current mode* (L) dan *output capacitor* (C_{out}) yang digunakan pada *synchronous buck converter* didapat melalui perhitungan sebagai berikut:

$$Duty\ cycle\ (D) = \frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{24}{180} = 0.1333 \quad (8)$$

$$L = \frac{V_{out} (V_{in} - V_{out})}{f \times \Delta I \times V_{in}} \quad (9)$$

Dengan nilai $V_{out} = 24V$, $V_{in} = 180V$, $f = 25,8\ kHz = 4,031\ A$, maka didapat nilai induktansi sebesar $200\ \mu H$.

$$C_{out} = \frac{1 - D}{16 \times L \times f^2} \quad (10)$$

Dari persamaan (10) didapat nilai kapasitansi dari kapasitor *output* adalah sebesar $1,302\ mF$, tetapi pada perancangan ini digunakan kapasitor dengan kapasitansi sebesar $8,8\ mF$.

Dari perhitungan di atas didapat nilai perancangan awal untuk nilai komponen *synchronous buck converter* pada perangkat kontroler. Nilai induktor sebesar $200\ \mu H / 20A$ dan kapasitor output sebesar $8800\ \mu F / 50\ Volt$.

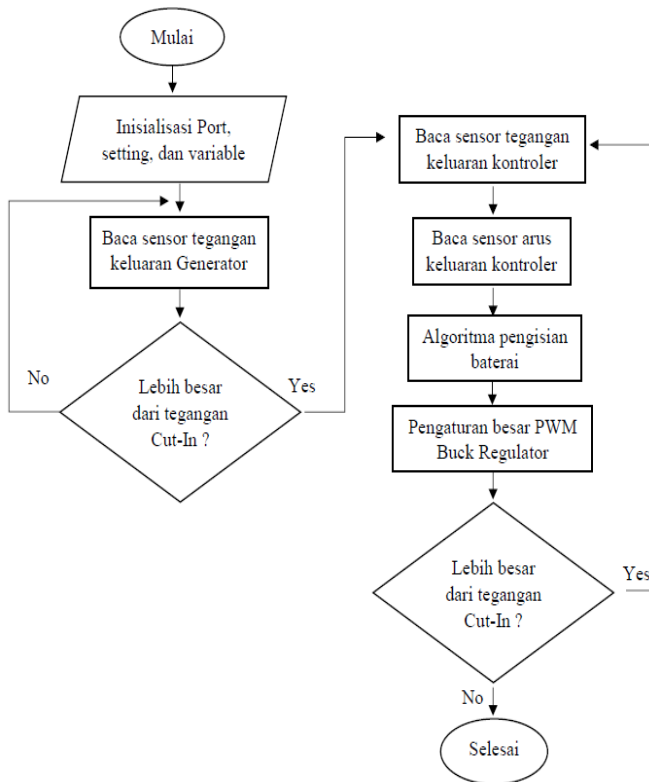
D. Power supply

Subsistem ini berperan sebagai penyedia daya untuk beberapa komponen seperti: relay kontak, sensor arus, *MCU (Micro Controller Unit)*, dan driver MOSFET. *Power supply* yang telah dirancang mempunyai dua level tegangan teregulasi yaitu $12V$ dan $5V$. tegangan tersebut dihasilkan melalui penggunaan dua buah regulator, untuk menghasilkan tegangan $12v$ teregulasi digunakan regulator tegangan tipe *switching* dengan kode *LM2576* fix $12v$, sedangkan untuk menghasilkan tegangan $5V$ teregulasi digunakan regulator tegangan tipe *linear* dengan kode *LM7805*.

E. Mikrokontroler

Pada sistem kontroler yang telah dirancang, digunakan mikrokontroler Atmel® picoPower® ATmega328/P dengan Frekuensi *clock* mikrokontroler sebesar 16MHz.

3.3. Diagram Alir



Gambar 12. Desain diagram alir program.

4 Implementasi dan Pengujian

Implementasi dan pengujian dari sistem kontroler yang sudah dibuat, dilakukan melalui tahap-tahap sebagai berikut:

4.1. Pengujian terhadap kinerja dari subsistem relay kontak dan pendeteksi tegangan generator

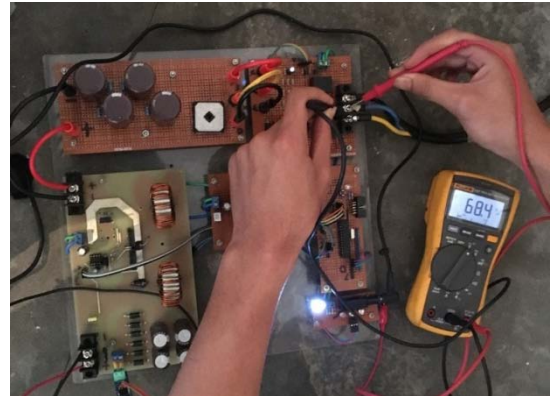
Pengujian ini dilakukan untuk mengetahui apakah proses pembacaan tegangan keluaran generator dan switching pada relay kontak dapat berjalan sesuai dengan yang dirancang.

Alat-alat Pengujian:

- Subsistem relay kontak dan pendeteksi tegangan generator.
- System minimum mikrokontroler Atmega 328
- Subsistem *power supply*
- Multimeter dan adaptor 19,3V
- Generator TSD-500 dan kincinr angin.

Hasil dan analisis:

Pengujian subsistem relay kontak dan pendeteksi tegangan generator dilakukan dengan memasang kabel keluaran generator pada terminal input subsistem dan dilakukan pengukuran besar tegangan keluaran generator secara *line to line*. Dari hasil pengukuran tersebut, didapat tegangan sebesar 68,4V AC.



Gambar 13 Pengukuran tegangan line-to-line keluaran generator.

Berikutnya dilakukan percobaan pada rangkaian pendeteksi tegangan (*voltage detector*). Percobaan dilakukan dengan mengukur besar tegangan titik positif rangkaian *rectifier* tiga fasa pada rangkaian pendeteksi tegangan dan diukur terhadap ground.

Tabel 4. Hasil pengukuran tegangan keluaran *rectifier* tiga fasa pada pendeteksi tegangan.

Pengukuran ke	Tegangan keluaran pendeteksi tegangan (V)
1	75,6
2	85,5
3	79,2
4	80,8

Dari hasil pengujian terlihat bahwa subsistem subsistem relay kontak dan pendeteksi tegangan generator mampu bekerja sesuai rancangan. Rangkaian pedeteksi tegangan mampu mengkonversi tegangan AC tiga fasa keluaran generator menjadi tegangan DC dan membagi tegangannya melalui *voltage divider* untuk dikonversi menjadi data digital pada mikrokontroler.

4.2. Pengujian terhadap kinerja dari subsistem *rectifier* tiga fasa dan RC input filter.

Pengujian subsistem ini dilakukan untuk melihat bagaimana performa subsistem *rectifier* tiga fasa dan *RC input filter*,

apakah tegangan keluaran generator mampu dikonversi menjadi tegangan DC.

Alat-alat Pengujian:

- Subsistem relay kontak dan pendeteksi tegangan generator.
- Subsistem *rectifier* tiga fasa dan *input RC filter*
- Subsistem *power supply*
- Sistem minimum mikrokontroler Atmega328
- Multimeter digital dan adaptor 19,3V
- Generator TSD-500 dan kincinr angin.

Hasil dan analisis:

Percobaan dilakukan dengan mengukur besar tegangan keluaran subsistem *three phase rectifier and input RC filter* dengan menggunakan multimeter pada mode DC.

Tabel 5. Hasil pengukuran tegangan keluaran Subsistem *rectifier* tiga fasa dan *input RC filter*.

Pengukuran ke	Tegangan keluaran (V)
1	82,1
2	85,1
3	87
4	88,7
5	88,1
6	90,4

Dari data diatas, dapat dilihat bahwa tegangan keluaran subsistem merupakan tegangan DC yang merupakan hasil penyearahan gelombang AC tiga fasa yang sudah dikurangi ripple nya melalui rangkaian filter RC. Besar tegangan yang dihasilkan cenderung berubah-ubah mengikuti besar tegangan keluaran generator.

4.3. Pengujian sistem kontroler secara keseluruhan melalui proses pengisian baterai.



Gambar 14 Perangkat baterai 12V 100Ah yang digunakan dalam pengujian.

Pengujian ini dilakukan untuk melihat bagaimana kinerja dari perangkat kontroler secara keseluruhan yang disusun dari beberapa subsistem.

Alat-alat Pengujian:

- Perangkat kontroler turbin angin
- Multimeter digital
- Generator TSD-500 dan kincinr angin.
- NS accelerate, Baterai 12V 100Ah.

Hasil dan analisis:

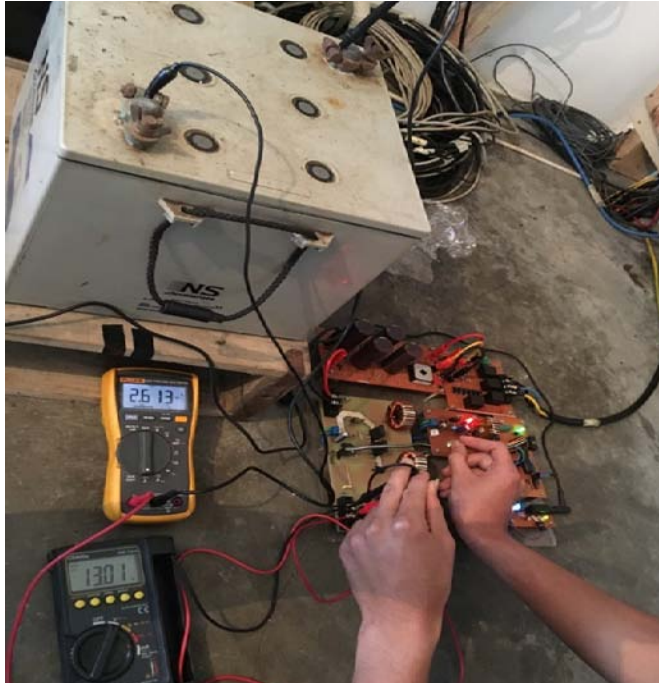
Percobaan dilakukan dengan melakukan proses penyimpanan energi listrik keluaran generator kedalam baterai. Karena menggunakan baterai dengan kapasitas 12V 100Ah, maka secara program besar arus dan besar tegangan keluaran dibatasi masing-masing sebesar 13,5V dan 3A. Pembatasan arus dan tegangan ini dilakukan dengan pengaturan besar *duty cycle* gelombang PWM pada *buck regulator*.

Pada percobaan pertama dilakukan tanpa pemasangan beban baterai, hal ini bertujuan untuk memastikan bahwa tegangan keluaran kontroler sudah dengan perancangan dan keseluruhan sistem dalam kondisi aman. Pada percobaan ini didapat tegangan yang sesuai yaitu sebesar 12.90V, tetapi pada Hi-side mosfet timbul panas mosfet. Mosfet yang timbul panas ini adalah mosfet yang terpasang dengan kondisi terminal source-nya tidak tersambung dengan *High side floating supply offset voltage* pada driver mosfet sehingga kemungkinan tegangan Vgs pada mosfet tersebut melebihi batas maksimumnya. Setelah dibiarkan beberapa saat, Hi-side mosfet tersebut terbakar, sehingga pengujian selanjutnya hanya dilakukan dengan hanya terdapat satu mosfet pada bagian Hi-side. Dari pengujian tersebut didapat tegangan keluaran kontroler sekitar 13V, dan tidak timbul panas pada hi-side mosfet seperti pengujian pertama.

Pengujian selanjutnya dilakukan dengan memasang beban baterai pada perangkat kontroler dan dilakukan pengukuran terhadap keluaran kontroler. Data percobaan didapat melalui pengukuran besar tegangan dan arus pada proses penyimpanan yang diukur melalui multimeter, dan diperoleh hasil sebagai berikut:

Tabel 6 Tegangan keluaran perangkat kontroler dengan kondisi tanpa beban.

Pengukuran ke	Tegangan keluaran (V)
1	13,50
2	13,51
3	13,51
4	13,49



Gambar 15 pengujian perangkat kontroler dalam proses penyimpanan energi hasil konversi kedalam baterai.

Tabel 7 besar tegangan dan arus pengisian baterai oleh perangkat kontroler.

Pengukuran ke	Tegangan keluaran (V)	Arus keluaran (A)
1	13,54	0
2	13,53	0
3	13,53	0
4	13,11	2,395
5	13,03	2,404
6	13,01	2,613
7	13,01	2,597
8	13,02	2,601
9	13,01	2,620
10	12,98	2,365
11	12,91	2,199
12	12,85	2,152
13	12,85	2,209

Pada percobaan yang sudah dilakukan, pada pengisian baterai melalui perangkat kontroler memerlukan beberapa saat setelah tegangan keluaran kontroler melebihi tegangan baterai ($\pm 13V$) sehingga terdapat arus yang masuk kedalam baterai. Besar arus yang mengalir tergantung pada besar tegangan

keluaran kontroler dan sesuai batas yang terpasang di program yaitu 3A dengan tegangan maksimal 13,5V.

5 Simpulan

Berdasarkan hasil pengujian dan Analisa yang sudah dilakukan pada perancangan kontroler untuk turbin angin skala kecil didapat beberapa kesimpulan, antara lain; masing-masing subsistem mampu bekerja sesuai dengan perancangan. Besar arus keluaran kontroler sangat tergantung pada besar tegangan keluaran kontroler, seperti ditunjukkan pada table IV – 4.

Pada penggunaan driver mosfet tipe *bootstrap operation*, setiap terminal *source* dari komponen *hi-side* mosfet harus terhubung dengan terminal *High side floating supply offset voltage* pada driver mosfet, hal ini untuk mencegah kerusakan pada mosfet akibat tegangan *gating* yang terlalu besar. Besar arus keluaran kontroler dapat diatur dengan pengaturan besar tegangan keluaran kontroler melalui pengaturan besar *duty cycle*. Besar tegangan keluaran berbanding lurus dengan besar *duty cycle* yang diaplikasikan. Kontroler hasil perancangan telah teruji mampu beroperasi hingga tegangan masukan 100V AC tiga fasa.

6 Kepustakaan

- [1] Rashid, M.H., “ Power Electronics : Circuits, Devices, and Applications, Fourth Edition”, Pearson, 2014. Edinburgh Gate, Harlow.
- [2] Rashid, M.H., “ Alternative Energy in Power Electronics”, Elsevier, 2015. Waltham, MA.
- [3] Robert L. Boylestad., dan Louis Nashelsky, “Electronic Devices and Circuit Theory, Eleventh edition”, Pearson, 2013. New Jersey.
- [4] John J. Grainger, William D. Stevenson dan Gary W. Chang, “Power System Analysis”, McGraw-Hill, 2016. New York.