

RANCANG BANGUN SISTEM EKSITASI SENDIRI GENERATOR SINKRON 3 FASA MENGGUNAKAN AVR (*AUTOMATIC VOLTAGE REGULATOR*)

Rizky Perdana Putra.¹, Hery Purnomo, Ir., MT.², Soeprapto, Ir., M.T.³

¹Mahasiswa Jurusan Teknik Elektro, ^{2,3}Dosen Jurusan Teknik Elektro, Universitas Brawijaya

Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Brawijaya

Jalan MT. Haryono 167, Malang 65145, Indonesia

E-mail: rizkypp79@gmail.com

ABSTRAK

Sistem Eksitasi sendiri menggunakan AVR adalah salah satu alat yang digunakan untuk memberikan penguatan ke kumparan medan generator sinkron 3 fasa. Alat uji ini berfungsi sebagai pengatur tegangan eksitasi yang bekerja secara otomatis yang dikendalikan oleh mikrokontroler Arduino Uno dengan mengatur *duty cycle* memanfaatkan sinyal pwm. Agar sistem AVR dapat bekerja dengan baik, dibutuhkan komponen seperti penyearah, driver mosfet, *buck converter*, dan sensor tegangan yang seluruh nilai komponennya dihitung dan disesuaikan sesuai yang ada di pasaran. Pada penelitian ini dirancang dan dibahas sistem AVR yang dapat mengendalikan tegangan eksitasi dengan beban yang bervariasi sehingga didapatkan kinerja yang bagus. Pengujiannya menggunakan metode PWM dengan menggunakan saklar elektronik berupa MOSFET, dan kemudian hasilnya dibandingkan dengan teori. Dari hasil pengujian karakteristik efisiensi fungsi tegangan keluaran sistem AVR memiliki efisiensi yang cukup tinggi.

ABSTRACT

Self excitation system using AVR is one of the tools that are used to provide reinforcement to the field coil 3-phase synchronous generator. This test tool serves as excitation voltage regulator which works controlled automatically by a microcontroller Arduino Uno with a set duty cycle utilizing pwm signal. For the system AVR to work properly, required components such as rectifiers, MOSFET drivers, buck converter, and a voltage sensor that all values are calculated and adjusted in accordance components on the market. In this study, designed and discussed AVR system to control the excitation voltage with varying load so we get a good performance. The test uses a PWM method using electronic switches such as MOSFET, and the results are then compared with the theory. From the results of testing efficiency characteristics AVR system output voltage function discount high enough efficiency.

I. PENDAHULUAN

Masalah utama dari pembangkitan tenaga listrik adalah tegangan keluaran generator yang berubah-ubah yang diakibatkan oleh perubahan pembebanan pada generator. Perubahan tegangan keluaran bisa menimbulkan bermacam-macam efek pada generator. Kondisi stabilitas generator bisa mempengaruhi stabilitas sistem tenaga listrik secara umum. Stabilitas sistem tenaga listrik adalah permasalahan penting dalam menunjang kehandalan sistem tenaga listrik.

Sistem eksitasi merupakan komponen yang sangat penting dalam pengoperasian generator sinkron, Sistem eksitasi adalah sistem pasokan listrik DC sebagai penguatan pada generator sinkron atau sebagai pembangkit medan sehingga suatu generator dapat menghasilkan energi listrik dengan besar tegangan keluaran generator bergantung pada besarnya arus eksitasi. Pengaturan arus eksitasi ini akan mempengaruhi tegangan terminal (tegangan keluaran) generator (Priyadi : 2012)

Generator sinkron yang terdapat pada laboratorium Mesin Elektrik Jurusan Teknik Elektro Universitas Brawijaya yang utamanya digunakan untuk tujuan praktikum Mesin Elektrik tentang kerja paralel generator sinkron masih menggunakan sistem eksitasi dengan sumber penguat terpisah. Dan untuk pengaturannya sumber DC masih menggunakan *mode* manual sehingga diperlukan *monitoring* secara terus menerus ketika terjadi fluktuasi beban.

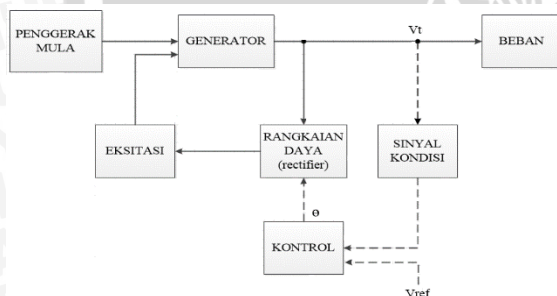
Inti dari pembahasan ini adalah membuat sistem eksitasi beroperasi secara otomatis tanpa *monitoring* terus menerus ketika beban naik ataupun turun. Dengan tersedianya peralatan *exciter* tersebut maka generator sinkron nantinya dapat dioperasikan dengan *mode* penguat sendiri yaitu tegangan keluaran yang dihasilkan oleh generator tersebut akan digunakan sebagai sumber penguat medan dari generator itu sendiri.

II. TINJAUAN PUSTAKA

A. AUTOMATIC VOLTAGE REGULATOR (AVR)

Automatic Voltage Regulator (AVR) adalah sebuah peralatan yang berfungsi sebagai pengatur atau penstabil tegangan yang berfungsi secara otomatis. Prinsip kerja yang digunakan pada sistem penyetabil tegangan ini adalah dengan mengatur tegangan keluaran DC dari *exciter* untuk kemudian diinjeksikan ke lilitan medan generator atau biasa disebut dengan eksitasi atau penguatan.

Besarnya tegangan yang diberikan ke kumparan medan generator akan selalu berubah-ubah tergantung kondisi beban generator. Apabila tegangan output generator di bawah tegangan nominal tegangan generator, maka AVR akan memperbesar arus penguatan pada exciter. Dan juga sebaliknya apabila tegangan output generator melebihi tegangan nominal generator maka AVR akan mengurangi arus penguatan pada exciter. Dengan demikian apabila terjadi perubahan tegangan output Generator akan dapat distabilkan oleh AVR secara otomatis dikarenakan dilengkapi dengan peralatan seperti alat yang digunakan untuk pembatasan penguat minimum ataupun maximum yang bekerja secara otomatis (Sumardjati, 2006). Blok diagram dari Automatic Voltage Regulator ditunjukkan pada Gambar 2.1.



Gambar 2.1 Blok Diagram AVR

Penjelasan blok diagram adalah sebagai berikut :

1. Unit eksitasi mencatu arus listrik searah ke lilitan medan (rotor) dengan cara memberikan tegangan listrik searah ke terminal lilitan medan.
2. Unit rangkaian daya megkonversikan arus listrik bolak-balik dari generator menjadi arus listrik searah.
3. Unit sinyal kondisi membaca keluaran generator yang akan disampaikan kepada unit kontrol.
4. Unit kontrol melakukan pengendalian keluaran pada unit rangkaian sehingga didapat arus listrik dc yang diinginkan dan melakukan pengendalian pada unit eksitasi sehingga tegangan listrik searah ke terminal medan dapat di kontrol.

B. Generator Sinkron

Mesin sinkron merupakan suatu mesin arus bolak-balik yang kecepatannya dalam keadaan mantap (steady state) berbanding lurus dengan frekuensi dan arus yang mengalir pada gandar-kumparnya. Sebuah mesin sinkron dapat dipakai sebagai generator ataupun sebagai motor. Sebagai generator, mesin sinkron dapat dioperasikan sebagai mesin tunggal, akan tetapi biasanya mesin ini akan tergabung dalam suatu interkoneksi, sehingga bekerja paralel dengan generator-generator lain. (Abd. Kadir, 1983).

Sebagai motor, mesin sinkron bekerja sebagai suatu alat sinkron, yang berputar dengan suatu putaran tetap yang ditentukan oleh frekuensi dan jumlah putaran kutub. Jika mengalami beban lebih, ataupun mendapat suatu beban kejut, keadaan sinkro tersebut dapat terlepas atau lebih dikenal dengan istilah lepas sinkron (Abd. Kadir,1983). Skripsi ini hanya membahas mengenai mesin sinkron sebagai generator.

Prinsip kerja dari generator sinkron adalah jika kumparan rotor yang berfungsi sebagai pembangkit kumparan medan magnet yang terletak di antara kutub magnet utara dan selatan diputar oleh *prime mover*, maka pada kumparan rotor akan timbul medan magnet atau fluks yang bersifat bolak-balik atau fluks putar. Fluks putar ini akan memotong kumparan stator sehingga pada ujung-ujung kumparan stator timbul gaya gerak listrik yang disebabkan oleh induksi dari fluks putar tersebut. Gaya gerak listrik (GGL) yang timbul pada kumparan stator juga bersifat bolak-balik atau berputar dengan kecepatan sinkron terhadap kecepatan putar rotor (Surya : 2006). Besar GGL induksi pada generator sinkron dapat dihitung dengan menggunakan persamaan 2.1 :

$$E_{\text{eff}} = 4,44.f.N.\phi \quad (2-1)$$

dimana :

- E - ggl induksi (Volt)
- f - frekuensi (Hz)
- N - Jumlah lilitan
- ϕ - Fluks magnetic (weber)

Saat generator sinkron bekerja pada beban nol tidak ada arus yang mengalir melalui kumparan jangkar (stator), sehingga yang ada pada celah udara hanya fluksi arus medan rotor. Namun jika generator sinkron diberi beban, arus jangkar Ia akan mengalir dan membentuk fluksi jangkar. Fluksi jangkar ini kemudian mempengaruhi fluksi arus medan dan akhirnya menyebabkan berubahnya harga tegangan terminal generator sinkron. Reaksi ini kemudian dikenal sebagai reaksi jangkar.

Pengaruh yang ditimbulkan oleh fluksi jangkar dapat berupa distorsi, penguatan (magnetising),

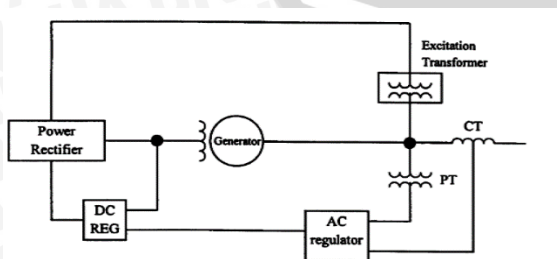
maupun pelemahan (demagnetising) fluksi arus medan pada celah udara. Perbedaan pengaruh yang ditimbulkan fluksi jangkar tergantung kepada beban dan faktor daya beban, yaitu :

- a. Untuk beban resistif ($\cos\phi = 1$)
Pengaruh fluksi jangkar terhadap fluksi medan hanyalah sebatas mendistorsinya saja tanpa mempengaruhi kekuatannya (cross magnetising).
- b. Untuk beban induktif murni ($\cos\phi = 0$ lag)
Arus akan tertinggal sebesar 90° dari tegangan. Fluksi yang dihasilkan oleh arus jangkar akan melawan fluksi arus medan. Dengan kata lain reaksi jangkar akan demagnetising artinya pengaruh reaksi jangkar akan melemahkan fluksi arus medan.
- c. Untuk beban kapasitif murni ($\cos\phi = 0$ lead)
Arus akan mendahului tegangan sebesar 90°. Fluksi yang dihasilkan oleh arus jangkar akan searah dengan fluksi arus medan sehingga reaksi jangkar yang terjadi akan magnetizing artinya pengaruh reaksi jangkar akan menguatkan fluksi arus medan.
- d. Untuk beban tidak murni (induktif/kapasitif)
Pengaruh reaksi jangkar akan menjadi sebagian magnetising dan sebagian demagnetising. Saat beban adalah kapasitif, maka reaksi jangkar akan sebagian distortif dan sebagian magnetising. Sementara itu saat beban adalah induktif, maka reaksi jangkar akan sebagian distortif dan sebagian demagnetising. Namun pada prakteknya beban umumnya adalah induktif.

C. Sistem Eksitasi

Sistem eksitasi yang digunakan adalah sistem eksitasi statis, artinya sistem eksitasi generator tersebut disuplai dari eksiter yang bukan mesin bergerak, yaitu dari sistem penyearah yang sumbernya disuplai dari output generator itu sendiri atau sumber lain dengan melalui transformator.

Suplai daya listrik untuk eksitasi mengambil dari output generator melalui *excitation transformer*, kemudian disearahkan melalui penyearah dan disalurkan ke rotor generator untuk eksitasi atau penguat medan dengan melalui sikat arang. Gambar 2.2 merupakan blok diagram sistem eksitasi statis.



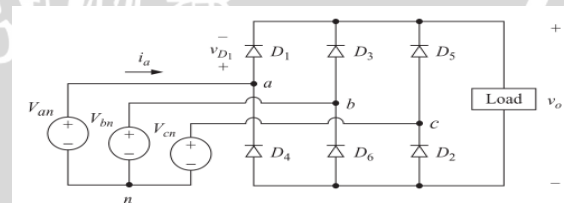
Gambar 2.2 Blok diagram sistem eksitasi statis

Pada generator dengan sistem eksitasi, besar tegangan listrik yang dihasilkan oleh generator sebanding dengan besar medan magnet di dalamnya, sedangkan besar medan magnet ini sebanding dengan besar arus eksitasi yang dibangkitkan. Maka, jika arus eksitasi sama dengan nol, maka tegangan listrik juga sama dengan nol. Prinsip ini menjadi dasar untuk mengontrol tegangan keluaran generator, jika tegangan sistem turun maka arus eksitasi harus ditambah, dan jika tegangan sistem terlalu tinggi maka arus eksitasi dapat diturunkan (Listen, 1988 : 239).

Dengan kata lain Sistem eksitasi adalah sistem pasokan listrik DC sebagai penguatan pada generator listrik atau sebagai pembangkit medan magnet, sehingga suatu generator dapat menghasilkan energi listrik dengan besar tegangan keluaran generator bergantung pada besarnya arus eksitasinya (Listen, 1988 : 239).

D. Penyearah Tak Terkontrol 3 Fasa

Tegangan keluaran dari generator sinkron adalah gelombang arus bolak-balik 3 fasa. Untuk mengubah gelombang arus bolak-balik dari generator sinkron menjadi gelombang arus searah dibutuhkan penyearah. Pada penelitian ini, digunakan penyearah tak terkontrol 3 fasa. Penyearah ini membutuhkan 6 dioda yang disusun seperti gambar 2.3. Rangkaian ini mempunyai sifat bahwa pada saat tegangan fasa a dalam keadaan paling tinggi dibandingkan dengan tegangan fasa b dan c, maka D1 konduksi. Sedangkan untuk dioda dengan nomor genap akan konduksi bila tegangan katodanya berada dalam keadaan paling rendah dibandingkan dengan tegangan katoda dari komponen-komponen dengan nomor genap yang lain. Jadi bila tegangan fasa b paling kecil dibandingkan dengan tegangan fasa b dan c, maka D6 konduksi. Jadi pada prinsipnya pada rangkaian tersebut selalu ada dua dioda yang konduksi dalam waktu yang bersamaan.



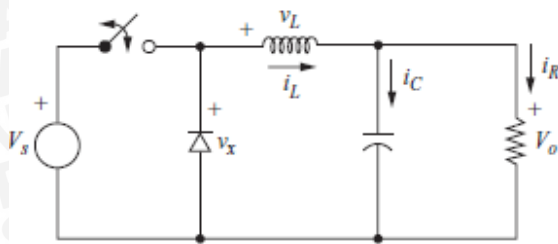
Gambar 2.3 Rangkaian penyearah tak terkontrol 3 fasa

Sumber: Daniel W. Hart (2011: 144)

E. Buck Converter

Buck converter berfungsi untuk merubah nilai tegangan keluaran generator sinkron 3 fasa sesuai tegangan set point karena besarnya tegangan keluaran dari generator akan naik turun sesuai dengan kondisi beban. Konverter ini menggunakan induktor, dioda,

kapasitor, dan MOSFET yang dirangkai seperti pada gambar 2.3.



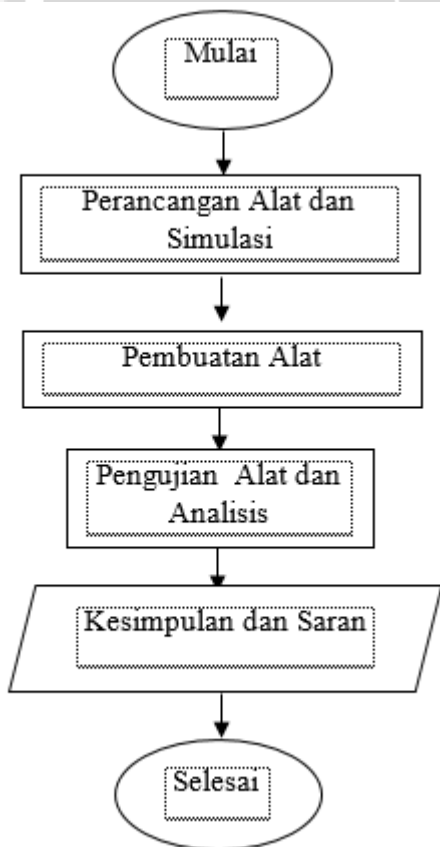
Gambar 2.4 Rangkaian ekuivalen *buck converter*
Sumber: Daniel W.Hart (2001:199)

Untuk memudahkan analisis, diasumsikan konverter ini:

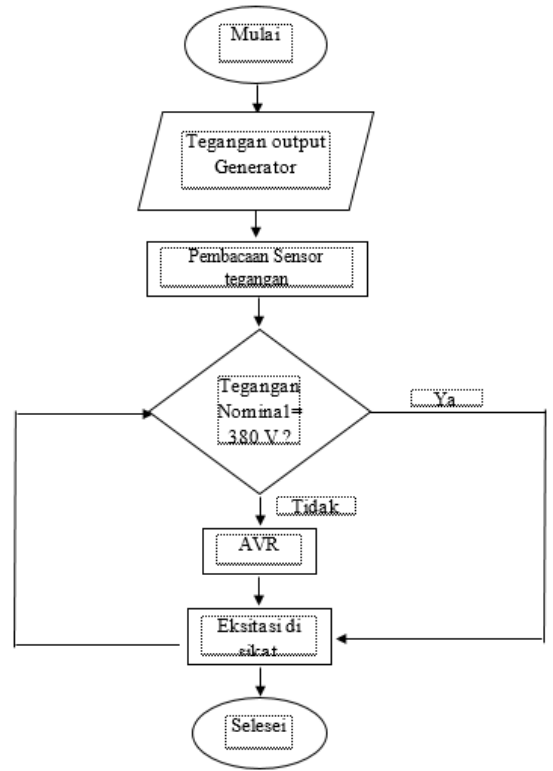
1. Rangkaian beroperasi dalam keadaan tunak.
2. Arus induktor kontinu (selalu positif).
3. Kapasitor sangat besar, dan tegangan output akan konstan pada tegangan V_0
4. Periode pensaklaran adalah T , saklar menutup selama DT dan terbuka selama $(1-D)T$.
5. Seluruh komponen dianggap ideal.

III. METODE PENELITIAN

Langkah-langkah dalam analisis secara umum dapat dilihat pada diagram alir Gambar 3.1.



Gambar 3.1 Diagram alir pengerjaan penelitian

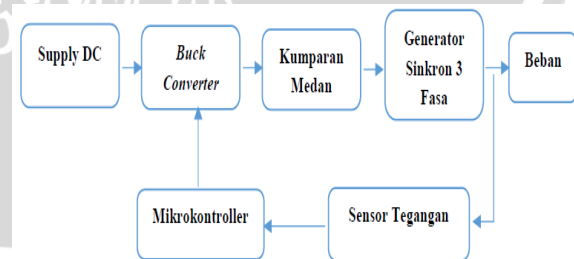


Gambar 3.2 Diagram Alir Sistem Kerja AVR

IV. PERANCANGAN DAN PEMBUATAN ALAT

A. Gambaran Umum Sistem AVR

Pada pengerjaan tugas akhir ini dibagi menjadi 2 yaitu yang pertama adalah hardware dimana akan difokuskan pada pembuatan rangkaian AVR (Automatic Voltage Regulator) sebagai penstabil tegangan output generator. Dan yang kedua adalah software yang difokuskan pada pemrograman penyulutan mosfet melalui mikrokontroler dan pengaturan sinyal PWM. Berikut ini adalah perencanaan dari sistem pengerjaan :



Gambar 4.1 Blok Diagram Sistem AVR

B. Perancangan *Buck Converter*

Rangkaian *buck converter* terdiri dari MOSFET dan dioda *fast switching*. Alasan pemilihan MOSFET adalah kemampuan komponen ini untuk bekerja dalam frekuensi *switching* dan daya yang besar, serta harga komponen ini yang terjangkau. Fungsi



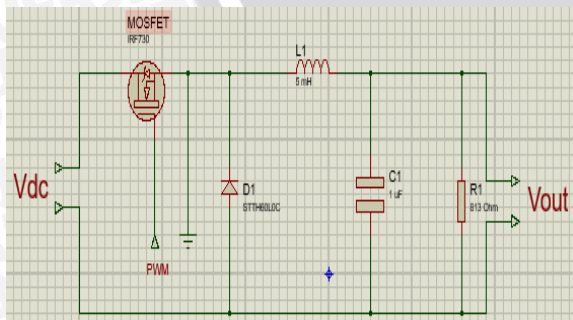
MOSFET adalah untuk saklar elektronik. Penentuan parameter *buck converter* dapat dilihat pada Tabel 4.1.

Tabel 4.1 Penentuan parameter perancangan *buck converter*

No.	Penentuan Parameter	Keterangan
1.	V_s (Tegangan masukan) = 200 V	
2.	V_o (Tegangan keluaran) = 40 V – 90 V	Tegangan eksitasi maksimal generator sinkron 3 fasa tanpa beban sebesar 85 V
3.	D (<i>Duty cycle</i>) = 10% – 90%	Nilai maksimal <i>duty cycle</i> didapat dari perhitungan
4.	$f_{switching} = 50$ kHz	
5.	$(\Delta V_o/V_o) = 0.02$ Volt	
6.	$(L/L_{min}) \approx 125\%$	Nilai induktansi biasanya 25% lebih besar dari nilai induktansi minimal (Hart, 2011)

MOSFET yang dipilih pada perancangan ini adalah MOSFET yang memiliki nilai *rating* tegangan sebesar 150% dari V_s (tegangan masukan), yaitu lebih dari 150 V. Sedangkan, nilai *rating* arusnya lebih dari 300% (150% x 200%) dari arus masukan, yaitu 0.15 A. Menurut *rating-rating* tersebut maka MOSFET yang dipilih adalah IRF730.

Dioda sebagai *free wheeling* adalah *fast switching diode*. Dioda *fast switching* mempunyai *reverse recovery time* yang kecil sehingga dapat digunakan pada frekuensi pensaklaran yang tinggi. Pada perancangan ini dioda yang dipilih adalah STTH60L0C.



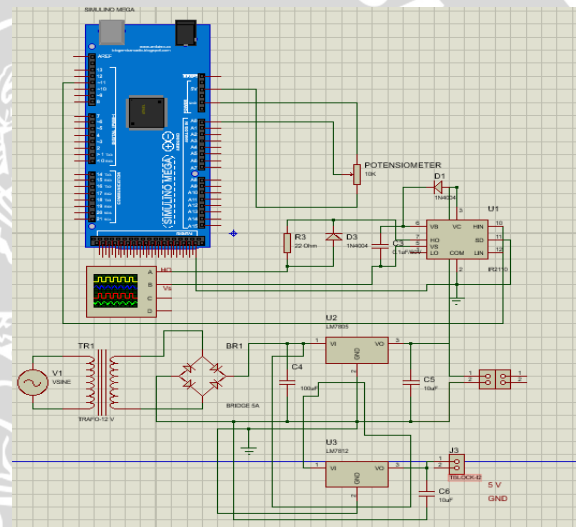
Gambar 4.2 Skematik diagram *buck converter* yang telah dirancang

Tabel 4.2 Komponen *buck converter*

No.	Nama komponen	Jumlah
1.	Induktor daya 10 mH	1
2.	Kapasitor elektrolit 1 µF 250V	1
3.	MOSFET IRF730	1
4.	Dioda STTH60L0C	1

C. Perancangan Skematik Kontroler

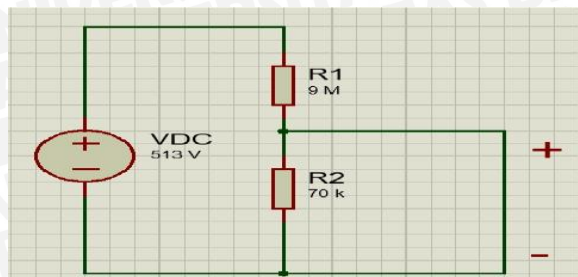
Dari pembahasan sebelumnya, komponen kontroler pada sistem AVR meliputi Arduino Uno, IC Regulator LM7805, IC Regulator LM7812 dan LM7805, potensiometer, dan saklar. Semua komponen tersebut akan dihubungkan seperti pada skematik dibawah ini.



Gambar 4.3 Skematik kontroler sistem AVR

D. Perancangan Sensor Tegangan

Pada perancangan ini, sensor tegangan dibuat dengan menggunakan prinsip pembagi tegangan. Pembagi tegangan yang digunakan adalah resistor sebesar 1MΩ yang diseri sebanyak 9 kali dan 7x10kΩ. Pemilihan resistor sebesar 9MΩ dan 7kΩ didasari oleh meminimalisasi arus yang melewati sensor ini. Keluaran sensor akan dipasangkan ke ADC1 dan *ground* rangkaian picu. Sensor tegangan diatur 4 V pada tegangan 380 V untuk perancangan ini. Diagram skematik sensor tegangan ini dapat dilihat pada Gambar 4.4.



Gambar 4.4 Diagram skematik perancangan sensor tegangan

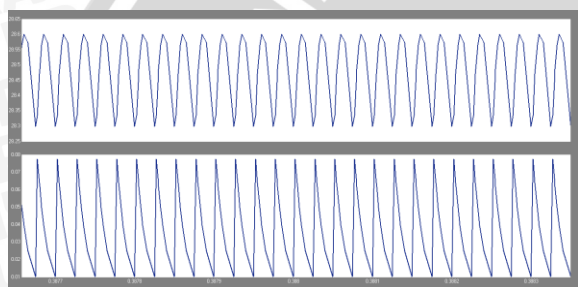
200	80	0.358	0.321	0.018	160.7
200	85	0.369	0.341	0.014	170.4
200	90	0.379	0.360	0.010	180.2

Dari hasil pengujian simulasi di atas terlihat bahwa semakin besar nilai *duty cycle* pada *buck converter*, maka semakin besar pula (linier) nilai tegangan keluaran (tetapi selalu dibawah nilai tegangan masukan) jika nilai tegangan masukan tetap. Perbedaan antara nilai teori dan simulasi di atas, diakibatkan saat perhitungan teori semua perhitungan dilakukan pada kondisi ideal, sedangkan pada realitanya pasti ada rugi-rugi pada induktor, mosfet, dan dioda. Dari gambar karakteristik di atas terlihat bahwa semakin besar nilai *duty cycle* pada *buck converter*, maka semakin besar pula (linier) nilai tegangan keluaran (tetapi selalu dibawah nilai tegangan masukan) jika nilai tegangan masukan tetap. Perbedaan antara nilai teori dan simulasi di atas, diakibatkan saat perhitungan teori semua perhitungan dilakukan pada kondisi ideal, sedangkan pada realitanya pasti ada rugi-rugi pada induktor, mosfet, dan dioda.

E. Simulasi Menggunakan MATLAB Simulink

1. Simulasi *buck converter* menggunakan saklar elektronik MOSFET dengan metode PWM

Simulasi *buck converter* menggunakan MOSFET metode PWM ini dilakukan dengan cara memberi tegangan sumber konstan 200 V dan resistansi beban konstan 813 Ω pada berbagai macam variasi *duty cycle* dari 0,1 s/d 0,9 (frekuensi = 50 kHz).



Gambar 4.5 Gelombang tegangan dan arus buck converter ($V_s = 200\text{ V}$; $D = 10\%$)

Tabel 4.3 Hasil simulasi *buck converter*

V_s (V)	D	I_i (A)	I_L (A)	V_o (V)	I_o (A)
200	10	0.126	0.045	21.96	0.043
200	15	0.155	0.066	32.51	0.065
200	20	0.179	0.087	42.91	0.085
200	25	0.200	0.108	53.16	0.106
200	30	0.22	0.128	63.28	0.126
200	35	0.237	0.148	73.28	0.146
200	40	0.253	0.168	83.18	0.166
200	45	0.269	0.188	93	0.186
200	50	0.283	0.207	102.7	0.205
200	55	0.297	0.226	112.4	0.225
200	60	0.310	0.245	122.1	0.245
200	65	0.323	0.264	131.7	0.265
200	70	0.335	0.283	141.4	0.285
200	75	0.346	0.302	151	0.305

V. PENGUJIAN ALAT DAN ANALISIS DATA

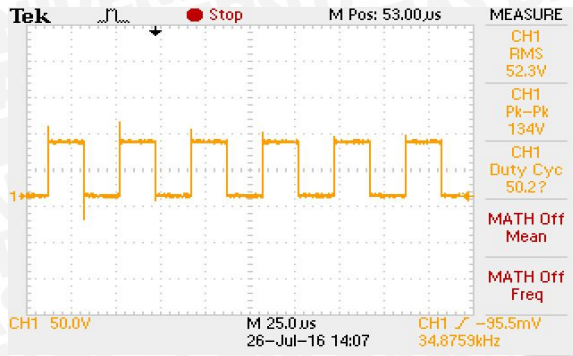
1. Pengujian Pembangkit sinyal picu

Pengujian ini bertujuan untuk mengetahui bentuk pembangkit sinyal picu dan nilai *duty cycle* maksimum dan minimum yang bisa dibangkitkan mikrokontroler. Mikrokontroler diprogram untuk dapat menghasilkan gelombang kotak dengan frekuensi 40 kHz pada *duty cycle* (D) tertentu.

Data hasil pengujian pembangkit sinyal picu dari hasil pengamatan di osiloskop pada nilai *duty cycle* 85.3%, 50,2%, dan 10,3% ditunjukkan dalam gambar 5.1



Gambar 5.1 Hasil pengujian Pembangkit sinyal picu pada nilai *duty cycle* 85.3%



Gambar 5.2 Hasil pengujian Pembangkit sinyal picu pada nilai duty cycle 50.2%



Gambar 5.3 Hasil pengujian Pembangkit sinyal picu pada nilai duty cycle 10.3%

Dari hasil pengujian yang didapatkan bahwa bentuk gelombang sesuai dengan apa yang telah dirancang yaitu gelombang kotak dengan pengaturan lebar pulsa (PWM).

Nilai maksimal dan minimal *duty cycle* yang dapat dibangkitkan oleh rangkaian picu berturut-turut adalah sebesar 85.3% dan 10,3%. Bila nilai *duty cycle* diatur dibawah 10,3%, maka *duty cycle* yang dibangkitkan tetap akan bernilai 10,3% karena itu sudah melewati kemampuan dari rangkaian picu.

2. Pengujian Penyearah Tidak Terkontrol 3 fasa

Pengujian ini bertujuan untuk mengetahui kinerja dari penyearah tak terkontrol 3 fasa dalam menyearahkan arus bolak-balik. Pengujian ini dilakukan dengan cara menganalisis bentuk gelombang keluaran dan membandingkan nilai tegangan keluaran antara teori dan praktek pada setiap perubahan nilai tegangan masukan.

Data hasil pengujian rangkaian penyearah tak terkontrol 3-fasa adalah sebagai berikut:

Tabel 5.1 Hasil pengujian penyearah tak terkontrol 3 fasa

No.	Vin (volt)	Vout (volt)		Kesalahan (%)
		Praktek	Teori	
1	240	319.86	317.27	0.8163
2	260	354.83	350.94	1.1070
3	280	382.02	378.14	1.0273
4	300	410.51	405.33	1.2779
5	320	437.71	431.23	1.5015
6	340	466.2	458.43	1.6949
7	360	494.69	485.62	1.8666
8	380	528.36	518	2
Eror rata-rata				1.41147

3. Pengujian Sensor Tegangan

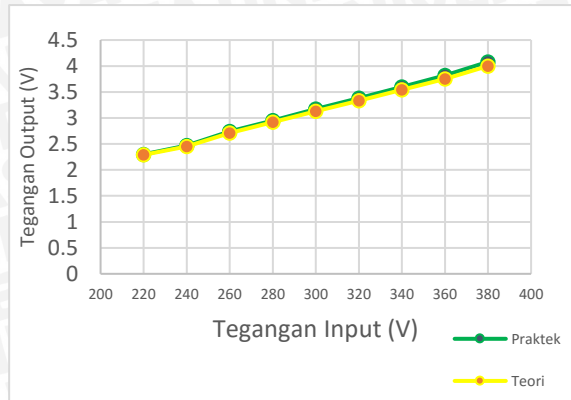
Pengujian ini bertujuan untuk mengetahui linearitas dan nilai *error* dari sensor tegangan. Hasil dari sensor ini berupa tegangan DC untuk dapat digunakan sebagai input ADC mikrokontroler.

Data hasil pengujian sensor tegangan ditunjukkan dalam tabel 5.2

Tabel 5.2 Hasil pengujian sensor tegangan

Vin (V)	Vout (V)		Kesalahan (%)
	Pengujian	Perhitungan	
220	2.30	2.29	0.434
240	2.47	2.45	0.809
260	2.74	2.71	1.094
280	2.95	2.92	1.016
300	3.17	3.13	1.261
320	3.38	3.33	1.479
340	3.6	3.54	1.666
360	3.82	3.75	1.832
380	4.08	4.00	1.960
Kesalahan rata-rata			1.284

Dari data hasil pengujian sensor tegangan, dapat dibuat grafik $V_{out} = f(V_{in})$ seperti ditunjukkan dalam gambar 5.3.



Gambar 5.3 Hasil pengujian sensor tegangan

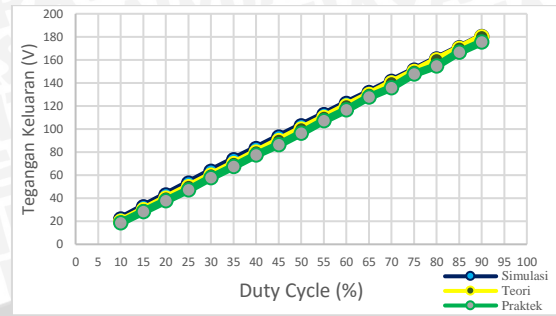
4. Pengujian Buck Converter

Pengujian ini bertujuan untuk mengetahui efisiensi dari rangkaian *buck converter*. Data hasil pengujian *buck converter* ditunjukkan dalam tabel 5.3.

Tabel 5.3 Hasil pengujian *buck converter* dengan $V_{in} = 200$ volt

V_s (V)	D	I_i (A)	V_o (V)	I_o (A)
200	0.1	0.124	18.74	0.0386
200	0.15	0.152	28.34	0.0582
200	0.2	0.174	37.68	0.0744
200	0.25	0.196	47.24	0.089
200	0.3	0.216	57.88	0.1054
200	0.35	0.232	67.62	0.1188
200	0.4	0.248	77.54	0.1304
200	0.45	0.264	86.46	0.1476
200	0.5	0.278	96.36	0.155
200	0.55	0.292	107.14	0.1692
200	0.6	0.298	116.56	0.1766
200	0.65	0.316	127.72	0.1898
200	0.7	0.32	135.86	0.1962
200	0.75	0.338	147.72	0.2272
200	0.8	0.348	154.7	0.2634
200	0.85	0.358	166.56	0.3106
200	0.9	0.368	175.38	0.3284

Dari data hasil pengujian *buck converter*, dapat digambarkan grafik efisiensi fungsi *duty cycle* dengan nilai tegangan masukan (V_{in}) 200 volt seperti ditunjukkan dalam gambar 5.5.



Gambar 5.5 Hasil pengujian *buck converter*

Berdasarkan hasil pengujian diatas didapatkan bahwa semakin besar nilai *duty cycle* maka efisiensi dari *buck converter* akan turun. Hal ini terjadi karena rugi-rugi yang dihasilkan komponen penyusun rangkaian *buck converter* meningkat seiring meningkatnya nilai *duty cycle* (Daniel W. Hart, 2011: 220).

5. Pengujian Buck Converter Dengan Umpan Balik

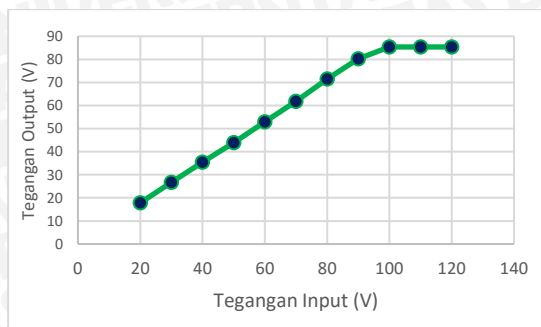
Pengujian ini bertujuan untuk mengetahui efek dari perubahan tegangan keluaran *buck converter* dalam keadaan umpan balik dengan nilai *set point* sebesar 200 volt.

Data hasil pengujian *buck converter* dengan umpan balik ditunjukkan dalam tabel 5.4.

Tabel 5.4 Hasil pengujian *buck converter* dengan umpan balik

V_{in} (V)	I_{in} (A)	D (%)	V_{out} (V)	I_{out} (A)	P_{in} (W)	P_{out} (W)	Effisiensi (%)
20	0.02	90	17.8	0.02	0.48	0.409	17.11
30	0.03	90	26.7	0.03	1.08	0.91	18.65
40	0.04	90	35.4	0.04	1.92	1.629	17.80
50	0.06	90	43.8	0.05	3	2.499	20.02
60	0.07	90	52.9	0.06	4.32	3.654	18.21
70	0.08	90	61.8	0.08	5.95	4.947	20.27
80	0.09	90	71.4	0.09	7.76	6.575	18.01
90	0.11	90	80.2	0.10	9.9	8.263	19.80
100	0.12	87	85.3	0.11	12	9.562	25.48
110	0.13	79	85.3	0.11	14.4	9.904	45.49
120	0.14	73	85.3	0.12	16.9	10.24	65.14

Dari data hasil pengujian tersebut, dapat digambarkan tegangan keluaran fungsi tegangan masukan seperti ditunjukkan dalam gambar 5.6.



Gambar 5.6 Hasil pengujian *buck converter* dengan umpan balik

Berdasarkan tabel 5.4 dan gambar 5.6 didapatkan bahwa tegangan keluaran *buck converter* mencapai nilai *set point* ketika tegangan masuknya sebesar 100 volt dengan nilai *duty cycle* sebesar 87%. Bila tegangan masukan diturunkan maka tegangan keluaran dari *buck converter* akan berada dibawah tegangan *set point*-nya.

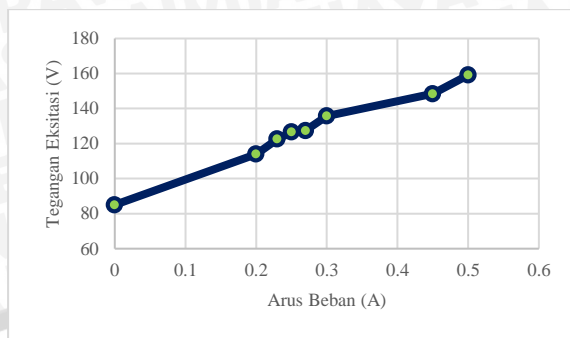
6. Pengujian Keseluruhan Sistem

Pengujian sistem keseluruhan bertujuan untuk mengetahui keberhasilan alat.

Pengujian sistem keseluruhan merupakan hasil akhir untuk rancang bangun sistem AVR untuk generator sinkron 3 fasa. Selain itu, pengujian sistem juga bertujuan untuk mengetahui respon seberapa akurat kinerja AVR ketika generator sinkron dibebani secara bervariasi. Hasil pengujian ditunjukkan pada tabel 5.5 dan grafik pengaruh tegangan keluaran terhadap tegangan eksitasi generator sinkron 3 fasa ditunjukkan pada gambar 5.14.

Tabel 5.5 Hasil pengujian sistem keseluruhan dengan beban linier

Arus Beban (A)	D (%)	Tegangan Eksitasi (V)	Arus Eksitasi (A)	Putaran (rpm)	Tegangan Output (V)
0	44	85.02	0.15	1500	380
0.2	59	114	0.172	1500	
0.23	63	122.6	0.19	1503	
0.25	65	126.6	0.2	1500	
0.27	68	127.4	0.21	1500	
0.3	70	135.7	0.22	1500	
0.45	76	148.4	0.23	1500	
0.5	82	159.1	0.24	1500	



Gambar 5.7 Grafik hasil pengujian sistem keseluruhan AVR

Berdasarkan tabel 5.5 dan gambar 5.7 didapatkan bahwa tegangan eksitasi generator sinkron 3 fasa akan naik secara linier ketika arus beban juga dinaikkan. Pada saat keadaan tanpa beban untuk mencapai tegangan keluaran 380 volt, maka dibutuhkan tegangan eksitasi generator sinkron 3 fasa sebesar 85 volt dengan *duty cycle* sebesar 44%. Ketika beban 65% yaitu arus beban sebesar 0.5 A, maka dibutuhkan tegangan eksitasi sebesar 159.1 volt dengan *duty cycle* sebesar 82%.

VI. PENUTUP

1. Kesimpulan

Dari hasil perancangan dan pengujian pada penelitian ini, maka dapat disimpulkan sebagai berikut:

1. Tegangan eksitasi generator sinkron 3 fasa berkisar dari 60 volt sampai 180 volt dengan *duty cycle* 30% - 90%.
2. Dalam keadaan tanpa beban untuk memperoleh tegangan keluaran 380 volt, maka dibutuhkan tegangan eksitasi generator sinkron 3 fasa sebesar 85 volt dengan *duty cycle* sebesar 44%. Ketika dibebani 200 watt, maka dibutuhkan tegangan eksitasi sebesar 159.1 volt dengan *duty cycle* sebesar 82%.
3. Pada saat generator dibebani sebesar 100 watt diperoleh respon selama 13 milidetik untuk mencapai *steady state*. Sedangkan pada saat dibebani 200 watt diperoleh respon selama 20 milidetik untuk mencapai keadaan *steady state*.

2. Saran

Saran untuk penelitian yang akan datang dari hasil penelitian ini sebagai berikut :

1. Pemilihan komponen *buck converter*, penyearah dan sensor tegangan diharapkan lebih memperhatikan toleransi nilai komponen terutama resistor agar kesalahan lebih kecil dan hasilnya lebih presisi.

2. Perlu dilakukan pembuatan driver mosfet selain menggunakan IC IR2110 karena dalam pengujianya komponen tersebut mudah rusak/*short circuit* sehingga memakan waktu yang cukup lama untuk membuatnya.
3. Perlu dilengkapi proteksi *overcurrent* dan *overvoltage* supaya alat aman dan terhindar dari tegangan dan arus berlebih.

DAFTAR PUSTAKA

Fitzgerald A.E., Charles Kingsley, Jr., dan Stephen D.U. 1992. *Mesin-Mesin Listrik*, Edisi 4 (Terjemahan Ir. Djoko Achyanto, M.Sc. EE). Jakarta :Erlangga.

Hart, Daniel W. 2011. *Power Electronics*. McGraw-Hill: New York.

Kadir, A. 1983. *Mesin Serempak*. Jakarta : Djambatan.
Listen, E.C. 1988. *Mesin dan Rangkaian Listrik*. Jakarta :Erlangga.

Chapman, Stephen J. 2002. *Electric Machinery and Power System Fundamentals*. New York McGraw-Hill Companies.

Sen, P. C. 1997. *Principles of Electric Machines and Power Electronics*. John Wiley & Sons, Inc.: New York.

