

Implementasi *Automatic Voltage Regulator* Pada Generator Sinkron 3 Fasa Dengan Mengatur Arus Eksitasi

Anita Mustang, Abdul Muis Pras Setia

Jurusan Teknik Elektro Universitas Borneo Tarakan, Kalimantan Utara

Jl. Amal Lama Nomor 1, Tarakan /081347533602, 085292331888

e-mail : anitam29291212@gmail.com, pras Setia.electric@gmail.com

Submitted : 5 Oktober 2021 Accepted: 1 Juni 2022*

DOI: 10.31849/sainetin.v6i2.8021

Abstrak

Generator mengubah energi gerak untuk membangkitkan listrik dengan menghasilkan tegangan. Tegangan keluaran yang dihasilkan generator sinkron 3 fasa bisa sangat berpengaruh pada penggerak mula. Apabila kecepatannya melewati batas maksimum maka tegangan akan menjadi berlebih, begitu pula sebaliknya, apabila kecepatannya kurang maka tegangan yang dihasilkan tidak mencapai batas tegangan fasa yang diharuskan yaitu sebesar 220 V. Adapun yang akan menyebabkan tegangan menjadi tidak stabil juga dapat dihasilkan dari beban yang tidak seimbang. Untuk mengatasi ketidak stabilan tegangan yang dihasilkan generator, maka yang perlu diatur adalah arus eksitasi yang terdapat pada rotor. Generator sinkron 3 fasa menghasilkan tegangan fasa sebesar 220 V. Dari pengujian yang dihasilkan tegangan dapat *overvoltage* hingga mencapai 252,2 V tegangan lebih maka sensor tegangan akan mengirimkan data terhadap tegangan *Output* menuju sistem, dengan kontrol *driver* tegangan yang telah diprogram dengan tegangan eksitasi sebesar 35 V dari tegangan awal sebesar 66 V eksitasi. Hal tersebut akan merespon arus eksitasi menjadi turun apabila mengalami tegangan berlebih. Adapun ketika tegangan mengalami penurunan sebesar 196.2 V maka respon kendali akan memerintahkan arus eksitasi meningkat hingga 66 V, sehingga generator dapat menghasilkan tegangan yang menyesuaikan dan layak untuk digunakan konsumen melalui transmisi.

Kata kunci: Sistem Eksitasi, Generator Sinkron 3 Fasa, Kestabilan, AVR.

Abstract

A generator, as many people already know, is an electric generator with a driving voltage. A 3-phase synchronous generator's output voltage had a significant impact on the prime mover. If the speed exceeded the maximum limit, the voltage would become excessive, and if the speed was less than the needed phase limit of 220 V, the voltage would not achieve the required phase voltage limit. An unbalanced load was another factor that might cause voltage to become unstable. Excitation flow in rotor should be adjusted to overcome the instability of the voltage generated by the generator. The phase voltage of the 3-phase synchronous generator was 220 V. From the resulting test the voltage can reach 252.2 V if voltage was too high, the voltage sensor would communicate data the output voltage to the system, which would be controlled by voltage driver. Control that has been programmed with an excitation voltage of 35 V from initial voltage of 66 V excitation. When exposed to excessive voltage would respond to excitation current by lowering the excitation flow. When the voltage drop by 196.2 V, the control reaction instructed of 66 V to the generator. allowing the generator to produce a stable and sufficient voltage for consumer use via transmission.

Keywords: Excitation System, 3 Phase Synchronous Generator, Stability.

1. PENDAHULUAN

Listrik di kalangan masyarakat bukan lagi suatu yang asing didengar. Listrik sangat bermanfaat untuk memenuhi kebutuhan sehari-hari. Pentingnya penggunaan energi di masyarakat, PLN harus memenuhi kebutuhan tersebut dengan aman dan nyaman agar tidak terjadi masalah saat masyarakat

tengah memanfaatkan energi listrik yang telah disediakan [1], [2].

Permasalahan yang akan menimbulkan gangguan, terjadi saat tegangan yang disalurkan menjadi sangat tinggi atau biasa disebut *overvoltage*. Gangguan sering terjadi karena saluran transmisi, yang dapat mengakibatkan kerusakan pada sistem

yaitu dalam masalah peralihan mencakup studi kestabilan. Energi listrik dihasilkan melalui saluran antara distribusi dan transmisi dalam sistem tiga fasa [3]. Biasanya tegangan yang tersalur pada peralatan tegangan tiga fasa berbentuk seimbang dan sinusoida. Namun pada sisi impedansi saluran dan pembebanan yang tidak seimbang dapat mengakibatkan tegangan yang terkoneksi oleh peralatan menjadi tidak seimbang [4].

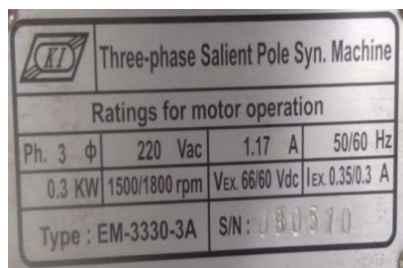
Selain *overvoltage*, tegangan yang rendah juga sangat berpengaruh pada kestabilan sistem. Tegangan yang turun dapat disebabkan oleh sambungan yang terdapat pada distribusi listrik menjadi kendor, dan arus yang menjadi tinggi sehingga tegangannya menjadi turun [1], [5], [6]. Stabilitas yaitu kemampuan sistem tenaga listrik yang beroperasi awal untuk mempertahankan keseimbangan kondisi operasi yang telah mengalami gangguan [7]–[10]. Biasanya standar kestabilan tegangan *overvoltage* sebesar 5 % sedangkan untuk *undervoltage* 10% dari tegangan standar nominal yaitu 220 V. [11]–[13]. Selanjutnya guna menstabilkan tegangan *output* generator yaitu mengatur arus eksitasi pada generator tersebut. Ketika terjadi *undervoltage* dan *overvoltage* sensor akan mendeteksi tegangan tersebut maka arus eksitasi yang keluar akan diatur menggunakan *Automatic Voltage Regulator* (AVR) [14], [15].

2. METODE PENELITIAN

Peralatan yang digunakan pada penelitian ini adalah Generator sinkron 3 fasa dengan spesifikasi sebagai alat utama, seperti pada Gambar 1 dan 2.

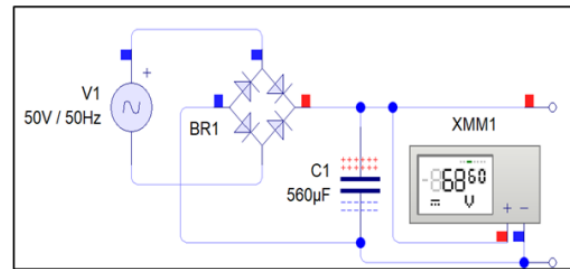


Gambar 1. Generator Sinkron 3 Fasa



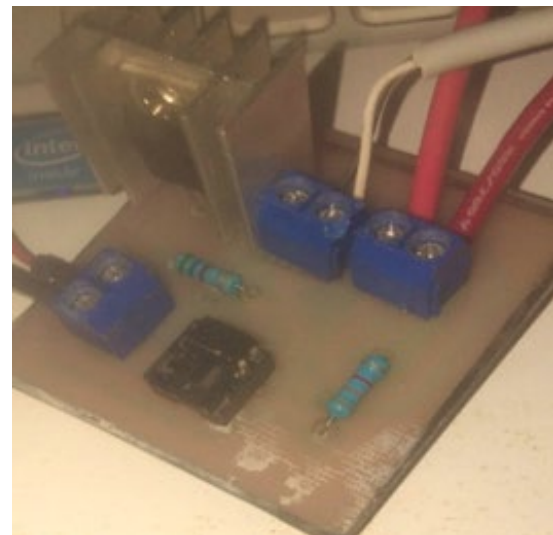
Gambar 2. Name Plat Generator Sinkron 3 Fasa

Perlatan lainnya adalah *Laboratory table* sebagai tempat penelitian berlangsung. Sementara alat ukur sebagai pendukung pembuatan *hardware*. Sedangkan bahannya antara lain Sensor tegangan modul PZEM-004T V3.0 untuk membaca tegangan *Output* yang dihasilkan generator sinkron 3 fasa. Selain itu juga menggunakan Penyearah yang berfungsi mengubah tegangan AC menjadi DC sebagai suplai eksitasi ke generator, diagram skematiknya seperti gambar 3.



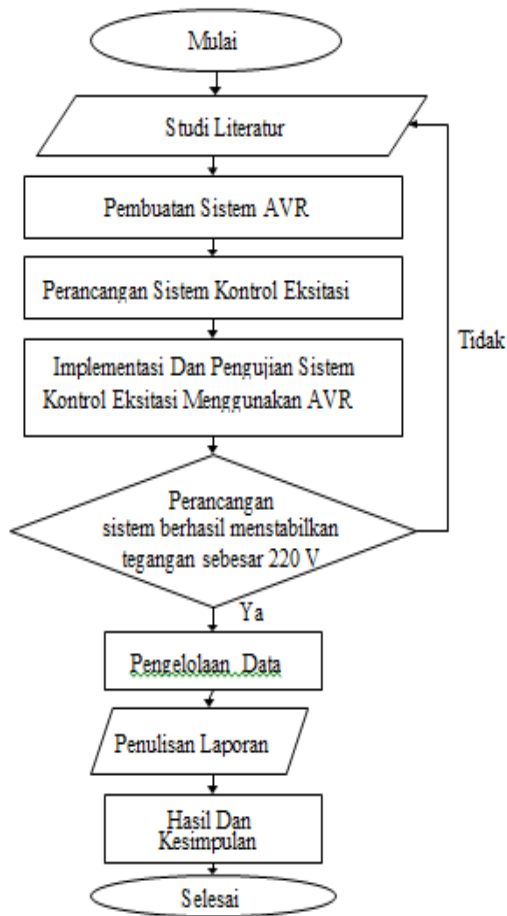
Gambar 3. Skematik Penyearah

Modul *MOSFET driver* sebagai pembagi tegangan untuk kendali arus eksitasi atau penyaluran tegangan DC untuk generator sinkron 3 fasa. *MOSFET driver* ini terdiri dari beberapa komponen yaitu, resistor 3,3 k Ω dan 560 Ω , MOSFET IRF740, dan optocoupler PC817. Hal ini dapat dilihat pada Gambar 4.



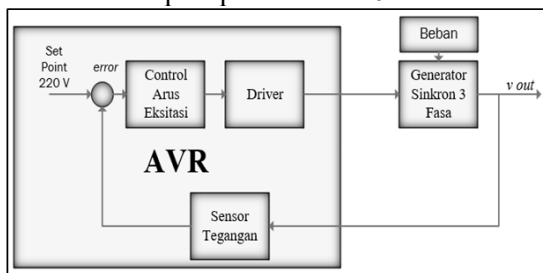
Gambar 4. Modul Mosfet Driver IRF740

Kabel jumper digunakan untuk mengkoneksi perangkat keras berupa *hardware*. Mikrokontroler arduino UNO digunakan dalam perancangan *hardware* sebagai kontrol AVR untuk memberikan arus eksitasi terhadap generator sinkron 3 fasa. Sedangkan diagram alir Penelitian adalah seperti Gambar 5.



Gambar 5. Flowchart Penelitian

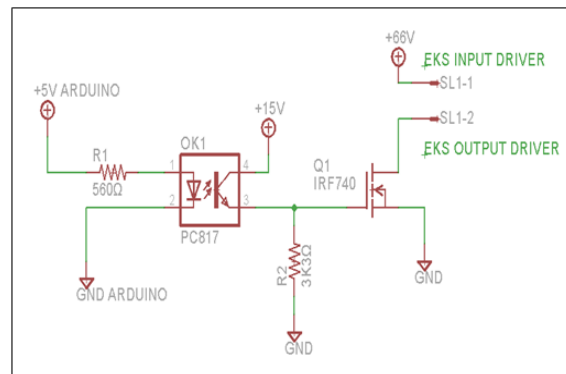
Selanjutnya diagram Blok Sistem AVR yang diteliti adalah seperti pada Gambar 6



Gambar 6. Diagram Blok Sistem AVR

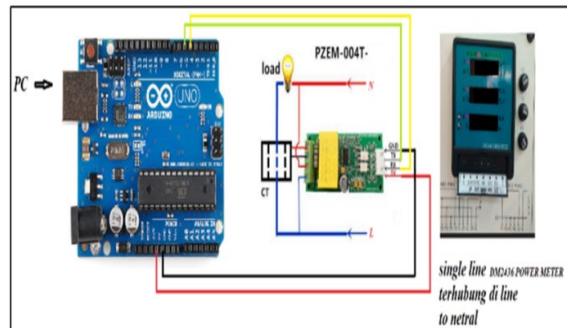
Berdasarkan diagram blok Gambar 6, *Set poin* adalah penentuan tegangan *output* stabil. Tegangan yang stabil telah ditentukan sebesar 220 V pada *line to line* generator sinkron 3 fasa. Sementara Akan dipasang sensor tegangan pada *output* generator sinkron 3 fasa yang akan di kirimkan ke AVR (*Automatic Voltage Regulator*). Selanjutnya AVR akan memberikan arus eksitasi DC sesuai yang dibutuhkan. *Driver* pada simulasi alat ini untuk memodulasi arus eksitasi hingga mendapatkan tegangan *Vrms* dari arus eksitasi AVR, sesuai dengan kebutuhan generator sinkron 3 fasa. Selanjutnya

skematik dari perancangannya adalah seperti Gambar 7.



Gambar 7. Skematik Perencanaan Perancangan AVR

Kalibrasi Sensor sangat penting dilakukan agar nilai yang terbaca lebih maksimal dan valid. Sensor yang digunakan adalah sensor tegangan dengan tipe PZEM-004TV3.0. Berikut adalah bahan yang perlu dipersiapkan untuk mengkalibrasi sensor tersebut antara lain: *Personal Computer* (PC), Mikrokontroler, Modul sensor PZEM-004T V3.0, Multimeter digital, Kabel jumper, *Load Unit Modul*. Sementara langkah kerja yang dilakukan adalah menyiapkan alat dan bahan yang dibutuhkan, *Wiring* rangkaian percobaan seperti tampak pada Gambar 8.



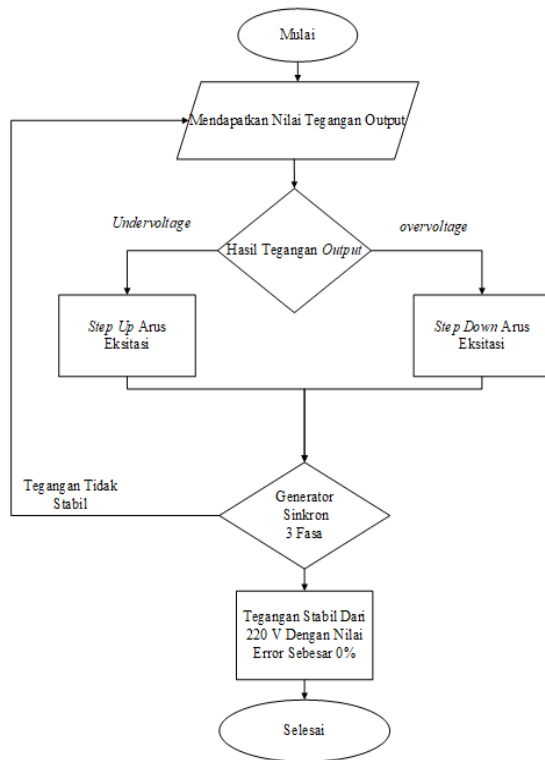
Gambar 8. Skema Rangkaian Kalibrasi

Kemudian *Upload* program menuju mikrokontroler, sebelumnya menambahkan kode sumber guna menampilkan hasil pembacaan bit tegangan sensor menjuserial monitor. Sumber tegangan pengujian langsung pada tegangan PLN 220VAC.

Pada perancangan kontrol di sistem, apabila nilai *error* yang didapatkan > 0 , maka kontrol akan mengurangi arus eksitasi berdasarkan *duty cycle* yang diberikan. *Duty cycle* akan berkurang satu persatu hingga nilai *error* yang diberikan mencapai 0 atau mendekati 0 sesuai program yang ada. Begitu pula

sebaliknya apabila nilai *error* yang ditampilkan <0, maka *duty cycle* akan meningkat hingga mendapati nilai *error* yang diinginkan. Nilai *error* sendiri berupa selisih tegangan berdasarkan *set point*. Apabila nilai tegangan *output* dari generator melebihi *set point* maka nilai *error* dianggap >0. Apabila nilai tegangan *output* generator kurang dari *set point* maka nilai *error* dianggap <0. Nilai *error* dikatakan 0 apabila nilai tegangan *output* dari generator sama dengan *set point*.

Flowchart Kerja dari kontrol akan menyesuaikan arus eksitasi sesuai dengan kebutuhan generator apabila terjadi *overvoltage* atau *undervoltage*. Flowchart terdapat pada gambar 9.



Gambar 9. Flowchart Kerja

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil Pengujian Sensor yang dilakukan pada pengujian ini menggunakan sensor PZEM-004T V3.0, dilakukan pengukuran dengan menghubungkan sensor pada program untuk menampilkan nilai tegangan yang terbaca, sebagaimana terlihat pada Tabel 1.

Pada hasil pengukuran sebelum kalibrasi terdapat nilai selisih atau *Error* sehingga sensor belum dikatakan akurat untuk melakukan pengujian, maka penting untuk melakukan kalibrasi. Dikarenakan pembacaan sensor belum akurat maka

ditambahkan angka sesuai rata-rata nilai *Error* pada pengukuran. Berikut tabel hasil kalibrasi pada Tabel 2.

Tabel 1. Pengukuran Sensor Tanpa Kalibrasi

Sensor	Tegangan (V)	
	Power Meter	Selisih
100.1	100.4	0.3
110.3	110.7	0.4
120.8	121.1	0.3
129.6	129.9	0.3
140.1	140.4	0.3
149.8	150.1	0.3
161.1	161.4	0.3
170.1	170.4	0.3
180.1	180.4	0.3
191.1	191.5	0.4
200.2	200.5	0.3
209.5	209.8	0.3
219.4	219.6	0.2
230.4	230.7	0.3
239.6	239.9	0.3
250.3	250.6	0.3
257.8	258.1	0.3

Tabel 2. Kalibrasi Sensor

Sensor	V (V)		Akurasi (%)
	Power Meter	Selisih	
100.5	100.5	0	100%
110	110	0	100%
120.3	120.3	0	100%
130.7	130.7	0	100%
140.2	140.2	0	100%
150.1	150.1	0	100%
160.1	160.1	0	100%
170.3	170.3	0	100%
180	180	0	100%
190	190	0	100%
220.2	220.2	0	100%
210.5	210.5	0	100%
220.1	220.1	0	100%
230,8	230,8	0	100%
240,3	240,3	0	100%
250,1	250,1	0	100%
260,5	260,5	0	100%

Dari hasil pengukuran dan perbandingan setelah melakukan antara sensor dan *Power Meter* DM2436A *Power Meter*, didapatkan rata-rata nilai selisih atau *Error* sebesar 0 serta persentasi akurasi 100% mulai dari tegangan 100,5 V sampai dengan 260,5 V. Hasil persentasi akurasi didapatkan berdasarkan rumus 1 dan 2

$$\text{Akurasi (\%)} = \frac{v1}{v2} \times 100 \text{ (tabel 2)}$$

V_1 = tegangan *Power Meter* (V)

V_2 = tegangan sensor (V)

Jadi:

$$\begin{aligned} \text{Akurasi (\%)} &= \frac{100,5}{100,5} \times 100 \\ &= 1 \times 100 \\ &= 100 \% \end{aligned}$$

Selisih (V) = $V_b - V_k$ (tabel 1)

V_b = tegangan terbesar (V)

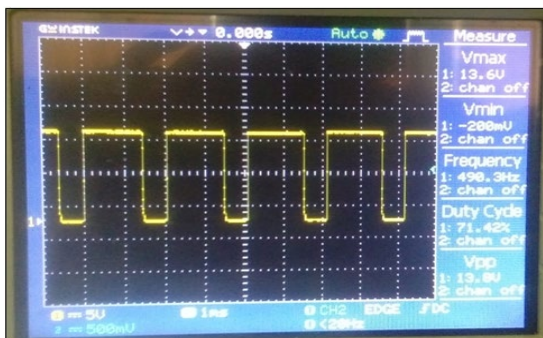
V_k = tegangan terkecil (V)

Selisih = $100,4 - 100,1 = 0,3$ V

Pengujian *duty cycle* Pada MOSFET dilakukan untuk mengetahui mosfet dapat bekerja dengan baik dengan mengetahui lebar pulsa *duty cycle* mulai dari 1% sampai dengan 100%. Dari pengujian ini dapat mendukung proses pengujian berikutnya. Berikut hasil pengujian ditampilkan pada Tabel 3.

Tabel 3. Hasil Pengujian Sinyal Duty Cycle

PWM	Duty Cycle	Waktu Pulsa	
		ON	OFF
255	100 %	1	0
229,5	91,47%	0,9147	0,0853
204	81,64%	0,8164	0,1836
178,5	71,42%	0,7142	0,2858
153	61,66%	0,6166	0,3834
127,5	51,45%	0,5145	0,4855
102	41,65%	0,4165	0,5835
76,5	31,40%	0,314	0,686
51	21,66%	0,2166	0,7834
25,5	11%	0,11	0,89
1	1,45%	0,0145	0,9855



Gambar 10. Sinyal PWM pengujian duty cycle 71,42%

Dari pengujian *duty cycle* dapat dipastikan bahwa kondisi mosfet dalam keadaan baik dan dapat dikendalikan berdasarkan lebar waktu pulsa *ON* dan *OFF* pada sinyal PWM seperti yang ditampilkan pada gambar 10. Sinyal PWM memiliki lebar pulsa

ON dan *OFF*. Driver mosfet yang digunakan mengontrol lebar pulsa tersebut, berikut adalah perhitungan untuk mengetahui lebar pulsa *ON* dan *OFF* berdasarkan gambar 10 yaitu dengan menggunakan persentasi *duty cycle* 71,42% (0,7142).

t_{ON} = Waktu Pulsa Hidup

t_{OFF} = Waktu Pulsa Mati

D = *Duty Cycle*

Mencari waktu pulsa *ON*:

D =

t_{total} = $time/div$ x jumlah kotak horizontal

t_{total} = 1×1

t_{total} = 1

0,7142 = $T_H / 1$

t_{ON} = $0,7142 \times 1$

t_{ON} = 0,7142

Mencari waktu pulsa *OFF*:

t_{OFF} = $t_{total} - t_{ON}$

t_{OFF} = $1 - 0,7142$

t_{OFF} = 0,2858

Pengujian Tegangan Eksitasi dilakukan untuk mengetahui respon kendali PWM terhadap tegangan eksitasi. Dalam pengujian ini dikendalikan sinyal PWM berdasarkan persentasi *duty cycle* pada tabel 4.3 dengan tegangan DC diinputkan ke mosfet sebesar 35 V dan melihat hasil *Output* tegangan DC. Pengujian tegangan eksitasi dapat dilihat pada tabel 4.

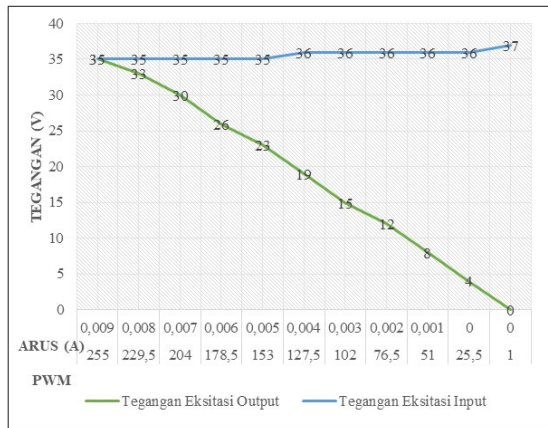
Tabel 4. Pengaruh PWM Terhadap Tegangan Eksitasi

PWM	Arus Eksitasi (A)	Tegangan Eksitasi Input (V)	Tegangan Eksitasi Output (V)
255	0,009	35	35
229,5	0,008	35	33
204	0,007	35	30
178,5	0,006	35	26
153	0,005	35	23
127,5	0,004	36	19
102	0,003	36	15
76,5	0,002	36	12
51	0,001	36	8
25,5	0	36	4
1	0	37	0

Dari hasil pengujian dapat dilihat dalam kondisi sinyal PWM maksimum yaitu sebesar 255, eksitasi *input* yang diberikan sama dengan eksitasi *output*.

Ketika sinyal PWM di kecilkan maka tegangan eksitasi output akan semakin menurun.

Pengujian pengaruh tegangan *output* (V_{out}) PWM terhadap eksitasi dapat dibuktikan dengan perhitungan dibawah ini dengan menggunakan persentasi *duty cycle* 50% yaitu sinyal PWM 127,5 dengan mengambil data pada Tabel 3 dan 4.



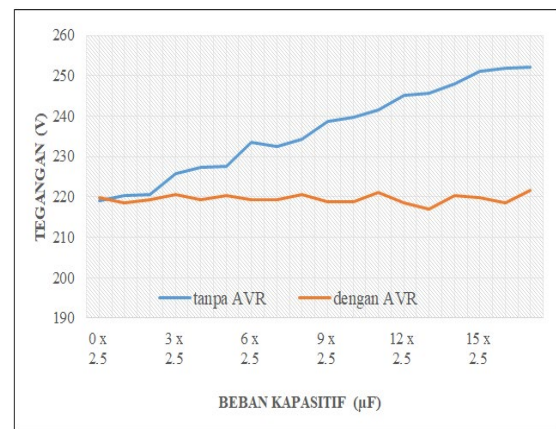
Gambar 12. Diagram Hasil Pengujian Pengaruh PWM Terhadap Tegangan Eksitasi

$$\begin{aligned}
 t_{ON} &= 0,5145 \\
 t_{total} &= 1 \\
 V_{in} &= 36 \text{ V} \\
 V_{out} &= (t_{ON} / t_{total}) \times V_{in} \\
 V_{out} &= (0,5145 / 1) \times 36 \\
 V_{out} &= 18,522 \text{ V}
 \end{aligned}$$

Selisih dari data hasil pengujian sebesar 6,52% dikarenakan pengukuran tidak menampilkan nilai koma dari hasil pengukuran. Pengujian respon kendali eksitasi terhadap generator sinkron 3 fasa meliputi kendali eksitasi secara otomatis. Prinsip kerja yang digunakan apabila tagangan *output* dari generator tidak stabil maka eksitasi yang diberikan akan disesuaikan secara otomatis. Untuk melakukan pengujian ini kita perlu mengatur tegangan *output* secara manual dengan mengendalikan beban RLC agar terjadi *undervoltage* dan *overvoltage*. Kendali eksitasi akan menyesuaikan hingga tegangan *output* generator menjadi stabil. Perlu diketahui sensor yang digunakan membaca line to line 1 dan 2 dari generator sehingga eksitasi berpatokan terhadap nilai yang terbaca. Dari hasil pengujian akan mendapatkan nilai persentase *error* ata keluar dari batasan *set point*, apabila tidak menunjukkan tanda minus (-) maka persentasi yang teretera yaitu *overvoltage* sedangkan jika menunjukkan tanda tersebut maka hasil persentasi yang menunjukkan *undervoltage*.

Pengujian Beban Kapasitif untuk menaikkan tegangan agar terjadi *overvoltage* diberikan beban

kapasitif. Hal ini disebabkan semakin besar nilai kapasitif yang diberikan maka semakin kecil impedansi yang terjadi sehingga arus eksitasi di alirkan semakin besar. Pada pengujian ini dilakukan agar dapat melihat perbandingan setelah melakukan pengujian menggunakan *Automatic Voltage Regulator* (AVR). Pada pengujian pembebanan menggunakan AVR agar dapat melihat respon kendali eksitasi yang diberikan berfungsi seperti yang diharapkan. Pengujian ini mengharapakan eksitasi dapat mengatasi *overvoltage* setelah beban kapasitif diberikan. Hal tersebut akan menyebabkan tegangan *output* generator menjadi terbilang stabil. Adapun hasil grafik dapat dilihat pada Gambar 13.



Gambar 13. Diagram Hasil Pembebanan Kapasitif

Dari hasil pengujian beban kapasitif dapat di simpulkan bahwa, apabila tidak menggunakan AVR nilai tegangan yang dihasilkan generator semakin meningkat. Setelah diberikan AVR nilai tegangan yang dihasilkan cenderung mendekati nilai *set point* yaitu 220 V. Adapun perbandingan nilai *Error* pada pngujian ini menggunakan AVR memiliki nilai *Error* tidak mencapai 1 %.

Tabel 5. Respon Kendali Eksitasi Pada Beban Kapasitif

Switch	Beban Kapasitif (μF)	Arus Eksitasi (A)		Tegangan Eksitasi (V)	
		Tanpa AVR	Dengan AVR	Input	Output
00000	0 X 2.5	0,34	0,33	66	66
10000	3 X 2.5	0,33	0,3	66	60
11000	6 X 2.5	0,33	0,26	66	54
11100	9 X 2.5	0,33	0,23	66	47
11110	12 X 2.5	0,33	0,2	66	40
11111	15 X 2.5	0,33	0,17	66	35

* Switch dengan keterangan ON=1 OFF=0

Pengujian Beban Induktif dilakukan karena dapat menurunkan tegangan *output* generator. Hal ini diakibatkan oleh beban induktif yang menyerap arus pada generator tersebut. Semakin besar beban induktif yang diberikan maka semakin rendah tegangan yang dibangkitkan generator. Pada pengujian ini dilakukan untuk mengetahui nilai tegangan *output* sebelum melakukan pemberian eksitasi secara otomatis dan sesudah. Nilai tegangan *output* tersebut akan digunakan sebagai perbandingan dengan percobaan menggunakan AVR.

Tabel 6. Hasil Tegangan Output Generator Terhadap Eksitasi Pembebanan Kapasitif

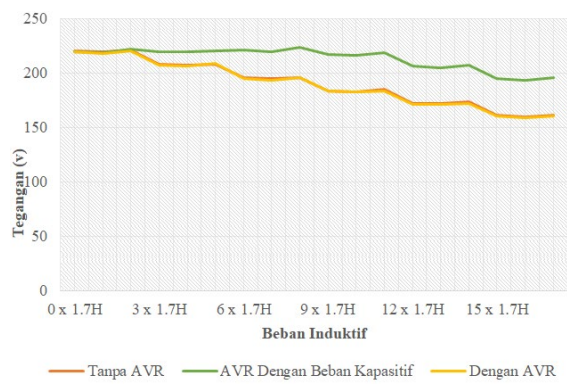
Switch port	Tegangan Output Generator (V)			
	Tanpa AVR	Error (%)	Dengan AVR	Error (%)
00000 V12	219,1	0,409	219,7	0,136
00000 V23	220,4	0,181	218,4	0,727
V13	220,6	0,272	219,3	0,318
10000 V12	225,8	2,636	220,7	0,318
10000 V23	227,2	3,272	219,2	0,363
V13	227,5	3,409	220,3	0,136
V12	233,5	6,136	219,4	0,272
11000 V23	232,5	5,681	219,3	0,318
V13	234,4	6,545	220,7	0,318
V12	238,6	8,454	218,8	0,545
11100 V23	239,8	9	218,7	0,590
V13	241,5	9,772	221	0,454
V12	245,1	11,40	218,4	0,727
11110 V23	245,6	11,63	216,9	1,409
V13	247,9	12,6	220,3	0,136
V12	251,1	14,13	219,8	0,09
00000 V23	251,9	14,5	218,5	0,681
V13	252,2	14,63	221,7	0,772

* port yaitu terminal *line to line* generator sinkron 3 fasa

* Switch dengan keterangan ON=1 OFF=0

Pada hasil pengujian ini dapat dilihat bahwa perbandingan tegangan *Output* generator saat diberikan AVR dan tidak menggunakan AVR, memiliki nilai yang tidak jauh berbeda. Hal ini dikarenakan pada saat tidak menggunakan AVR tegangan DC yang diberikan dari awal sebesar 66 VDC dan tidak ada pengaturan tegangan eksitasi secara otomatis saat pembebanan mulai diaktifkan. Setelah pemberian AVR apabila pembebanan diaktifkan maka AVR akan menaikkan eksitasi saat terjadi *undervoltage*, namun eksitasi yang diberikan sebelum pembebanan sudah mencapai batas maksimum pemberian tegangan eksitasi yang terdapat pada *name plate* generator. Untuk membuktikan AVR bekerja saat *undervoltage* maka eksitasi perlu diturunkan dengan menambahkan

beban kapasitif sebesar 15 x 2,5 μ F sebelum pemberian beban induktif. Saat dilihat perbandingannya hasil yang didapatkan sesuai dengan yang diinginkan, sebagaimana terlihat pada Gambar 14.



Gambar 14. Diaram Hasil Pengujian Beban Induktif

Tabel 7. Respon Kendali Eksitasi Pada Beban Induktif

Switch	Beban Induktif (H)	Arus Eksitasi (A)		Tegangan Eksitasi (V)	
		Tanpa AVR	Dengan AVR	Input	Output
00000	0 x 1.7	0,33	0,33	66	66
10000	3 x 1.7	0,33	0,32	66	66
11000	6 x 1.7	0,33	0,32	66	66
11100	9 x 1.7	0,33	0,32	66	66
11110	12 x 1.7	0,33	0,32	66	66
11111	15 x 1.7	0,33	0,32	66	66

* Switch dengan keterangan ON=1 OFF=0

Tabel 8. Hasil Tegangan Output Generator Terhadap Eksitasi Pembebanan Induktif

Switch	port	Tegangan Output Generator (V)			
		Tanpa AVR	Error (%)	Dengan AVR	Error (%)
00000	V 12	220	0	219,3	0,318
	V 23	219,2	0,363	217,5	1,136
	V 13	220,9	0,409	220,4	0,181
10000	V 12	207,9	5,5	206,9	5,954
	V 23	207,6	5,636	206,2	6,272
	V 13	208	5,454	208,9	5,045
11000	V 12	195,9	10,95	194,7	11,5
	V 23	194,6	11,54	192,9	12,31
	V 13	195,9	10,95	196,1	10,86
11100	V 12	183,6	16,54	183,1	16,77
	V 23	182,6	17	182,4	17,09
	V 13	184,8	16	183,8	16,45
11100	V 12	172,1	21,77	171	22,27
	V 23	171,8	21,90	170,8	22,36
	V 13	173,4	21,18	172,2	21,72
00000	V 12	161,4	26,63	160,6	27
	V 23	160,1	27,22	159,1	27,68

V 13 161,4 26,63 160,5 27,04

* port yaitu terminal line to line generator sinkron 3 fasa
 * Switch dengan keterangan ON=1 OFF=0

Tabel 9. Respon Kendali Eksitasi Pada Beban Induktif Dan Penambahan Kapasitif

Switch	Kapasitif (μF)	Beban Induktif (H)	Arus Eksitasi (A)	Tegangan Eksitasi (V)	
				Input	Output
00000	15 X 2.5	0 x 1.7	0,33	66	35
10000	15 X 2.5	3 x 1.7	0,32	66	45
11000	15 X 2.5	6 x 1.7	0,32	66	53
11100	15 X 2.5	9 x 1.7	0,32	66	67
11110	15 X 2.5	12 x 1.7	0,32	66	66
11111	15 X 2.5	15 x 1.7	0,32	66	67

* port yaitu terminal line to line generator sinkron 3 fasa
 * Switch dengan keterangan ON=1 OFF=0

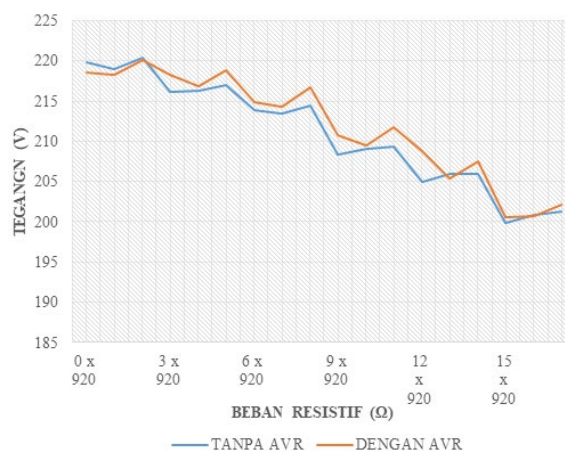
Tabel 10. Hasil Tegangan Output Generator Terhadap Eksitasi Pembebanan Induktif dan Penambahan Kapasitif

Switch	port	Tegangan Output Generator (V)	Error (%)
00000	V12	219,8	0,090
	V23	218,4	0,727
	V13	221,9	0,863
	V12	218	0,909
10000	V23	218	0,909
	V13	219,8	0,090
	V12	217,6	1,090
11000	V23	216	1,818
	V13	219	0,454
	V12	207	5,909
11100	V23	205,2	6,727
	V13	207,5	5,681
	V12	195,2	11,27
11110	V23	193,5	12,04
	V13	196,1	10,86
	V12	195,83333	10,98
00000	V23	196,28333	10,78
	V13	196,73333	10,57

* port yaitu terminal line to line generator sinkron 3 fasa
 * Switch dengan keterangan ON=1 OFF=0

Pengujian Beban Resistif tidak jauh berbeda dengan pengujian beban induktif, pengujian beban resistif juga dapat menurunkan tegangan. Hanya saja untuk menjatuhkan tegangan, beban resistif mempengaruhi kecepatan putaran generator akan menurun. Hal tersebut akan mengakibatkan tegangan output dari generator mengalami *undervoltage* pada nilai resistif yang semakin besar namun akan menjatuhkan nilai frekuensi yang ada.

Pada hasil pengujian ini tidak jauh berbeda dengan pengujian beban induktif yang dapat menurunkan tegangan saat sebelum pemberian AVR. Namun pada saat diberikan AVR tegangan eksitasi yang diberikan sudah mencapai batas maksimum generator sinkron 3 fasa. Adapun pada percobaan ini tidak diberikan kapasitif dikarenakan penyebab menurunnya tegangan yaitu beban resistif dapat menurunkan kecepatan motor sehingga frekuensi yang dihasilkan tidak sesuai standar yaitu sebesar 50 Hz. Sehingga penelitian sulit diterapkan karena harus mengatur frekuensi yang ada saat pembebanan resistif. Adapun hasil grafik ditampilkan pada gambar 15.



Gambar 15. Diagram Hasil Pengujian Beban Resistif

Tabel 11. Respon Kendali Eksitasi Pada Beban Resistif

Switch	Beban Resistif (Ω)	Arus Eksitasi (A)		Tegangan Eksitasi (V)		Frekuensi (Hz)	
		Tanpa AVR	Dengan AVR	Input	Output	Tanpa AVR	Dengan AVR
00000	0 X 920	0,33	0,32	66	67	50	50
10000	3 X 920	0,32	0,32	66	66	48,6	48,9
11000	6 X 920	0,32	0,32	66	66	48,7	48,8
11100	9 X 920	0,32	0,32	66	66	48,9	48,9
11110	12 X 920	0,32	0,32	66	66	48,7	48,9
11111	15 X 920	0,32	0,32	66	66	49,3	49,3

* Switch dengan keterangan ON=1 OFF=0

Tabel 12. Hasil Tegangan Output Generator Terhadap Eksitasi Pembebanan Resistif

Switch	port	Tegangan Output Generator (V)			
		Tanpa AVR	Error (%)	Dengan AVR	Error (%)
00000	V 12	219,8	0,09	218,5	0,681
	V 23	219	0,454	218,2	0,818
	V 13	220,4	0,181	220,1	0,045
10000	V 12	216,1	1,772	218,3	0,772
	V 23	216,3	1,681	216,9	1,409

	<i>V</i> 13	217	1,363	218,8	0,545
	<i>V</i> 12	213,8	2,818	214,9	2,318
11000	<i>V</i> 23	213,5	2,954	214,3	2,590
	<i>V</i> 13	214,4	2,545	216,7	1,5
	<i>V</i> 12	208,3	5,318	210,7	4,227
11100	<i>V</i> 23	209	5	209,5	4,772
	<i>V</i> 13	209,3	4,863	211,8	3,727
	<i>V</i> 12	205	6,818	208,8	5,090
11110	<i>V</i> 23	205,9	6,409	205,4	6,636
	<i>V</i> 13	205,9	6,409	207,5	5,681
	<i>V</i> 12	199,8	9,181	200,5	8,863
00000	<i>V</i> 23	200,8	8,727	200,7	8,772
	<i>V</i> 13	201,2	8,545	202,1	8,136

* port yaitu terminal *line to line* generator sinkron 3 fasa

* Switch dengan keterangan ON=1 OFF=0

4. KESIMPULAN

Implementasi AVR pada Generator Sinkron 3 Fasa Dengan Mengatur Arus Eksitasi dapat disimpulkan bahwa:

- AVR (*Automatic Voltage Regulator*) dengan menggunakan mikrokontroller dapat menstabilkan tegangan secara otomatis dengan mengatur sinyal PWM.
- Sinyal PWM atau *duty cycle* dapat mempengaruhi nilai tegangan eksitasi yang diterima generator. Semakin besar lebar pulsa ON yang diberikan, maka semakin besar pula eksitasi yang dihasilkan dan begitu pula sebaliknya. Seperti yang terlihat pada tabel 4.4, tegangan yang diberikan sebesar 35 V dengan arus 0,009 A dalam kondisi PWM maximum sehingga tegangan *output* masih sebesar 35 V. Ketika PWM diturunkan 10% arus menurun menjadi 0,008 A sehingga tegangan eksitasi *output* menurun menjadi 33V.
- Pada pembebanan kapasitif, sebelum memberikan beban ,tegangan awal generator dalam kondisi stabil. Setelah diberikan beban, tegangan *output* generator menjadi *overvoltage* hingga mencapai 252,2 V tanpa menggunakan AVR. Setelah menggunakan AVR tegangan *output* generator menjadi stabil dengan *error* <1% dengan beban yang diberikan hingga mencapai 15 x 2,5 μ F.
- Untuk penstabilan kembali tegangan yang telah *undervoltage* perlu penambahan beban kapasitif, sehingga tegangan eksitasi yang diberikan tidak pada nilai maximum yaitu 66 V DC seperti yang terlihat pada tabel 4.6

pembebanan induktif, sebelum dan sesudah menggunakan AVR tegangan tetap mengalami *undervoltage* hingga mencaoi 170,8 V. Dengan penggunaan beban kapasitif pada tabel 4.7 sebesar 15 x 2.5 μ F kondisi awal pembebanan, tegangan eksitasi sebesar 35 V dengan arus 0,17 A sehingga pada baris 1 dan 2 masih dapat distabilkan oleh AVR

- Tegangan *output* generator sinkron 3 fasa sangat berpengaruh pada tegangan dan arus eksitasi yang diberikan. Tagangan *output* tersebut akan semakin besar apabila eksitasi yang diberikan dinaikkan begitu pula sebaliknya.
- Pada beban resistif, ketika beban tersebut dinyalakan, maka akan semakin tinggi nilai resistif yang diberikan maka semakin lambat pula putaran motor sehingga frekuensi yang diberikan menurun hingga 48,6 Hz . Hal tersebut berdampak pada tegangan *Output* menjadi *undervoltage* yang tidak memiliki nilai frekuensi yang sama. Namun pada pengujian tersebut telah di berikan frekuensi sebesar 50 Hz secara manual.

5. DAFTAR PUSTAKA

- H. Eteruddin, M. Mutamalikin, and A. Arlenny, "Perencanaan Sistem Distribusi 20 kV Di Sungai Guntung Kabupaten Indragiri Hilir-Riau," *Jurnal Inovasi Penelitian*, vol. 2, no. 6, pp. 1863–1872, 2021.
- H. Eteruddin, A. Rahman, M. P. Halilintar, and A. Tanjung, "Evaluasi Indeks Konsumsi Energi Listrik Di Rumah Sakit Islam Ibnu Sina Pekanbaru," *Elementer*, vol. 7, no. 2, pp. 42–50, 2021.
- A. Van Anugrah, H. Eteruddin, and A. Arlenny, "Studi Pemasangan Express Feeder Jaringan Distribusi 20 kV Untuk Mengatasi Drop Tegangan Pada Feeder Sorek PT. PLN (Persero) Rayon Pangkalan Kerinci," *SainETIn*, vol. 4, no. 2, pp. 65–71, 2020.
- P. A. Dahono, "Ketidakseimbangan Tegangan dan Pengaruhnya," *LPKEE ITB's students blog*, 2011. [Online]. Available: <https://konversi.wordpress.com/2011/04/15/ketidakseimbangan-tegangan-dan-pengaruhnya/>.
- A. Armansyah and S. Sudaryanto,

- “Pengaruh Penguatan Medan Generator Sinkron Terhadap Tegangan Terminal,” *Journal of Electrical Technology*, vol. 1, no. 2, pp. 48–55, 2016.
- [6] H. A. Surasa, “Analisis Penyebab Losses Energi Listrik Akibat Gangguan Jaringan Distribusi Menggunakan Metode Fault Tree Analysis Dan Failure Mode and Effect Analysis Di PT. PLN (Persero) Unit Pelayanan Jaringan Sumberlawang,” Skripsi, Teknik Industri Universitas Negeri Sebelas Maret, 2007.
- [7] J. A. Pongtiku, M. Tuegeh, and H. Tumaliang, “Analisa Stabilitas Transien Untuk Menentukan Waktu Pemutusan Kritis (Critical Clearing Time) Pada Jaringan Transmisi 70 kV PLTA Tanggari II-GI Sawangan Dengan Menggunakan Program Matlab,” *Journal Teknik Elektro dan Komputer*, vol. 3, no. 2, pp. 1–6, 2014.
- [8] H. Eteruddin, D. Setiawan, and H. P. Sitepu, “Modifikasi Sistem ATS-AMF Diesel Emergency Generator Pada PLTU dengan Metode Warming Up,” *Jurnal Teknik*, vol. 14, no. 2, pp. 129–136, 2020.
- [9] H. Hendry, H. Eteruddin, and A. Atmam, “Analysis of Voltage Sag Due to Short Circuit on the Sub System in Central Sumatera,” *International Journal of Electrical, Energy and Power System Engineering*, vol. 1, no. 2, pp. 1–5, 2018.
- [10] E. S. Nasution and A. Hasibuan, “Pengaturan Kecepatan Motor Induksi 3 Phasa Dengan Merubah Frekuensi Menggunakan Inverter ALTIVAR 12P,” *Sistem Informasi*, vol. 2, no. 1, pp. 25–34, 2018.
- [11] SPLN-1, *Tegangan Tegangan Standar*. Indonesia, 1995, p. 5.
- [12] R. A. Sinaga, H. Eteruddin, and A. Tanjung, “Pengaruh Kapasitor Terhadap Faktor Daya Motor Induksi Tiga Phasa di PT. Malindo Karya Lestari,” *Jurnal Teknik*, vol. 15, no. 2, pp. 85–93, 2021.
- [13] B. M. Arsyad, A. Sofwan, and A. Nugroho, “Perancangan Sistem Kontrol Over/Under Voltage Relay Berbasis Mikrokontroler Pada Saluran Tegangan 220Vac,” *Transmisi*, vol. 21, no. 1, p. 25, 2019.
- [14] R. Azly, “Mengenal Fungsi AVR pada Generator AC 3 Phase,” *Dunia Berbagi Ilmu*, 2016. [Online]. Available: <https://duniaberbagiilmuuntuksemua.blogspot.com/2016/11/mengenal-fungsi-avr-pada-generator-ac-3-phase.html>.
- [15] P. R. H. Marpaung, H. Eteruddin, and D. Setiawan, “Studi Perubahan Beban Terhadap Kinerja AVR pada Generator Sinkron Unit 2 Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) PT. Ubjom Tenayan Raya,” in *Seminar Nasional Karya Ilmiah Multidisiplin*, 2021, pp. 96–109.