

Optimasi Pengaturan Sudut Penyalaan Thyristor untuk Stabilitas Tegangan Keluaran Generator Unit 2 PLTP Kamojang

ATEP MUHAMAD RIZKI, NASRUN HARIYANTO

Program Studi Teknik Elektro, Institut Teknologi Nasional Bandung, Indonesia
Email : atep.m.rizki@gmail.com

ABSTRAK

Perubahan suatu beban akan mempengaruhi tegangan keluaran generator, apabila beban naik maka tegangan keluaran generator turun dan apabila beban turun maka tegangan keluaran generator naik. Supaya tegangan keluaran generator tetap diperlukan suatu pengaturan tegangan keluaran generator, pengaturan tegangan keluaran generator dilakukan dengan mengatur arus eksitasi generator. Sistem pengaturan arus eksitasi generator memakai Automatic Voltage Regulator (AVR). Didalam AVR pada pembangkit listrik di PT. Indonesia Power UBP Kamojang Unit 2 memakai system tegangan keluaran PMG yang disearahkan oleh semikonverter, kemudian dimasukkan ke kumparan medan AC- Exciter dan tegangan keluaran dari AC-Exciter disearahkan oleh diode penyearah dan diberikan ke kumparan medan generator utama. Sudut penyalaan thyristor diatur dari $134,47^{\circ}$ hingga $137,88^{\circ}$ untuk daya beban 55 MW.

Kata kunci: semikonverter, eksitasi, thyristor, generator.

ABSTRACT

Changes in a load will affect the output voltage of the generator. When the load increases, the generator's output voltage decreases, and when the load decreases, the generator's output voltage increases. To maintain a stable output voltage, a voltage regulation system is required, and this is achieved by adjusting the excitation current of the generator. The excitation current regulation system uses an Automatic Voltage Regulator (AVR). In the AVR of the power plant at PT. Indonesia Power UBP Kamojang Unit 2, the PMG output voltage system is rectified by a semi-converter, then fed into the AC-Exciter field coil. The output voltage from the AC-Exciter is rectified by rectifier diodes and supplied to the main generator field coil. The firing angle of the thyristors is adjusted from 134.47° degrees to 137.88° degrees for a load power of 55 MW.

Keywords: Semiconductor converter, excitation, thyristor, generator

1. PENDAHULUAN

Generator sinkron adalah suatu mesin listrik yang digunakan untuk memproduksi energi listrik dari sumber mekanikal dengan menggunakan induksi elektromagnetik. Energi mekanik diperoleh dari putaran rotor yang digerakkan oleh penggerak mula, sedangkan energi listrik diperoleh dari perpotongan medan magnet dengan penghantar. Pada penghantar akan timbul gaya gerak listrik melalui proses induksi elektromagnetik yang terjadi pada kumparan rotor dan stator. Perubahan energi ini terjadi karena adanya pergerakan relatif antara medan magnet dengan kumparan generator **(Jolevski, D. 2009)**. Generator merupakan elemen kunci dalam infrastruktur pembangkit listrik, memainkan peran sentral dalam mengubah energi mekanik menjadi energi listrik. Stabilitas operasional generator sangat penting untuk memastikan kelancaran pasokan listrik ke konsumen. Salah satu aspek yang memengaruhi stabilitas ini adalah tegangan keluaran generator, yang rentan terhadap fluktuasi sebagai respons terhadap perubahan beban. PT. Indonesia Power PLTP Kamojang Unit 2, sebagai produsen energi panas bumi, menghadapi tantangan untuk menjaga tegangan keluaran generator tetap stabil dalam menghadapi variasi beban **(Chapman & Stephen J, 2002)**.

Prinsip kerja alternator menerapkan pembangkitan listrik berdasarkan induksi. Menurut hukum Faraday, saat kumparan berputar di dalam medan magnet atau sebaliknya, pada ujung kumparan tersebut akan timbul gaya gerak listrik (GGL) atau tegangan. Besar tegangan diinduksikan pada kumparan medan bergantung pada panjang penghantar, kecepatan putaran, dan kuat medan magnet. Suatu mesin listrik akan bekerja jika memiliki kumparan medan untuk menghasilkan medan magnet dan kumparan jangkar untuk menghasilkan GGL induksi pada konduktor di medan jangkar, serta celah udara untuk memungkinkan berputarnya jangkar dalam medan magnet **(Zuhaili, 1991)**. Generator sinkron menghasilkan tegangan keluaran yang dipengaruhi variasi beban. Ketidakstabilan tegangan dapat mengganggu sistem kelistrikan. PT. Indonesia Power PLTP Kamojang Unit 2 menggunakan pengaturan tegangan dengan mengontrol arus eksitasi generator melalui Thyristor yang diatur dengan sudut penyalan tertentu. Studi ini fokus pada optimasi sudut penyalan Thyristor untuk meningkatkan stabilitas tegangan keluaran. Tantangan utama adalah memahami dampak perubahan sudut penyalan Thyristor terhadap respons generator terhadap variasi beban, untuk meningkatkan efisiensi dan stabilitas operasional serta mengurangi fluktuasi tegangan **(Kundur & Prabha J, 1994)**.

Penelitian ini berfokus pada dampak sudut penyalan Thyristor terhadap tegangan keluaran generator di PT. Indonesia Power PLTP Kamojang Unit 2, dengan tujuan menyusun strategi optimasi untuk meminimalkan fluktuasi dan menjaga tegangan keluaran pada tingkat yang diinginkan. Upaya ini memberikan kontribusi pada pemeliharaan stabilitas operasional dan peningkatan kinerja sistem pembangkit listrik di instalasi tersebut. Sistem eksitasi merupakan suatu proses penguatan medan magnet dengan memberikan arus searah (DC) pada belitan medan pada rotor generator sinkron. Ketika kumparan medan dialiri arus searah dari arus eksitasi dan berputar dengan kecepatan tertentu, kumparan jangkar stator generator akan terinduksi oleh fluks magnet yang dihasilkan, menghasilkan tegangan listrik bolak-balik (AC). Tegangan yang dihasilkan sangat tergantung pada besarnya arus eksitasi dan putaran rotor; semakin besar keduanya, semakin besar tegangan yang dihasilkan **(Ridkzki, I. 2013)**.

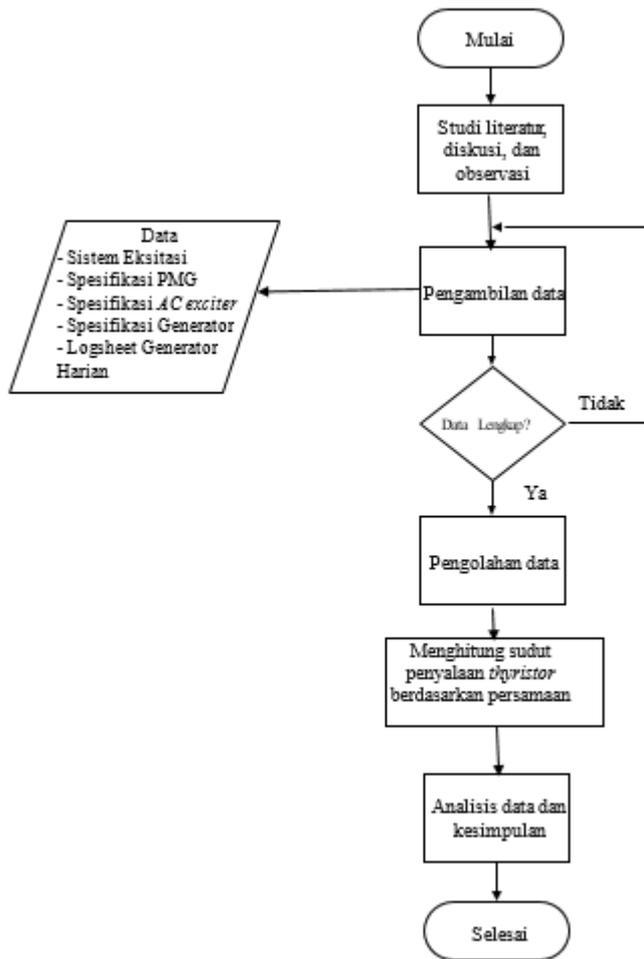
PT. Indonesia Power UBP Kamojang, unit bisnis PT. Indonesia Power, menggunakan tenaga panas bumi dan menerapkan sistem eksitasi tanpa sikat (brushless) dengan PMG sebagai sumber eksitasi. Rotor generator terkopel dengan turbin, memungkinkan PMG menghasilkan tegangan tiga fasa saat turbin berputar. Proses ini melibatkan penyesuaian dan penyearahan tegangan keluaran oleh AVR, disertai penyaluran ke AC exciter, dan penyearahan kembali oleh

rotating diode sebelum diteruskan ke generator utama. Kompleksitas sistem ini menjadi fokus utama penelitian untuk mencapai stabilitas operasional yang optimal di PT. Indonesia Power PLTP Kamojang Unit 2 (**Mitsubishi Electric Corporation, 1986**).

2. METODE PENELITIAN

2.1 Diagram Alir

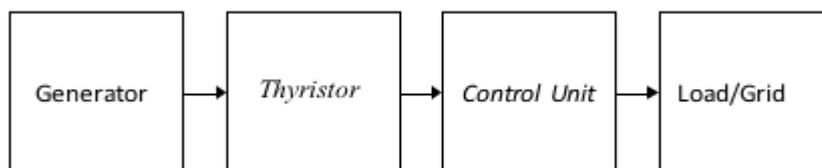
Berikut diagram alir penelitian yang dilakukan.



Gambar 1. Diagram Alir

2.2 Diagram Blok Pembangkitan Energi Listrik UBP Kamojang Unit 2

Gambar diagram blok sistem eksitasi pembangkit listrik pada UBP Kamojang unit 2 ditunjukkan pada Gambar 2.



Gambar 2. Blok diagram sistem pembangkit listrik UBP Kamojang Unit 2

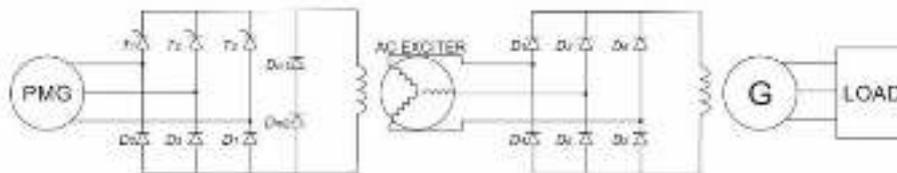
Diagram diatas menunjukkan bahwa generator menghasilkan arus listrik yang kemudian diteruskan ke *thyristor*. *Thyristor* digunakan untuk mengontrol jumlah arus yang diteruskan ke beban atau grid dengan mengatur sudut penyalanya. Control unit digunakan untuk mengatur sudut penyalan *thyristor* sesuai dengan kondisi operasi yang diinginkan, seperti tegangan keluaran yang stabil.

Berikut penjelasan komponen yang digunakan:

1. Generator adalah perangkat mekanik yang digunakan untuk menghasilkan arus listrik dengan mengubah energi mekanik menjadi energi listrik
2. Thyristor adalah jenis komponen elektronik yang digunakan untuk mengontrol arus listrik. Thyristor dapat digunakan sebagai switch yang hanya dapat mengalir dalam satu arah, atau sebagai kontrol arus dengan mengatur sudut penyalan.
3. Control Unit adalah perangkat yang digunakan untuk mengatur sudut penyalan thyristor sesuai dengan kondisi operasi yang diinginkan. Control unit dapat berupa PLC (Programmable Logic Controller), komputer, atau perangkat khusus yang dapat menerima input dari sensor-sensor yang terhubung dengan sistem dan mengirimkan perintah kepada thyristor untuk mengatur sudut penyalannya.
4. Load/Grid dalam diagram blok di atas merujuk pada sistem pengguna akhir atau jaringan listrik yang menerima arus listrik dari generator. Load dapat berupa peralatan atau perangkat yang memerlukan arus listrik untuk beroperasi, seperti pabrik, gedung-gedung, atau rumah tangga. Grid adalah jaringan transmisi dan distribusi listrik yang digunakan untuk menghantarkan arus listrik dari sumber listrik ke pengguna akhir. Pada sistem pengaturan tegangan dengan thyristor, tegangan yang diterima oleh Load/Grid harus stabil agar dapat digunakan dengan baik.

2.3 Sistem Eksitasi UBP Kamojang Unit 2

Sistem eksitasi pada PT. Indonesia Power UBP Kamojang menggunakan alternator (AC Exciter) dengan sumber eksitasi adalah PMG dan menggunakan penyearah sebagai masukan untuk medan generator. PMG, AC Exciter, generator dan rotating diode dalam satu poros dengan tipe eksitasinya adalah tanpa sikat. Maka dapat digambarkan sistem eksitasi yang digunakan UBP Kamojang seperti pada Gambar 3.



Gambar 3. Rangkaian sistem ekstasi UBP Kamojang Unit 2

Tabel 1. Spesifikasi PMG untuk blok paramater PMG

PMG	
Tegangan Keluaran	100 Volt
Frekuensi	300 Hz

Pada Tabel 2 menunjukkan spesifikasi berdasarkan data yang didapat untuk blok parameter AC exciter.

Tabel 2. Spesifikasi AC exciter untuk blok parameter AC exciter

AC exciter	
Daya Semu	278 MVA
Daya Aktif	250 MWatt
Tegangan Keluaran	190 Volt
Hambatan Stator	5,06 Ω (pada 75 °C)
Frekuensi	200 Hz
Kutub	8

Tabel 3 menunjukkan spesifikasi berdasarkan data yang didapat untuk blok parameter generator.

Tabel 3. Spesifikasi generator untuk blok parameter generator

Generator	
Daya Semu	67,85 MVA (pada 0,8 lagging)
Daya Aktif	55 MWatt
Tegangan Keluaran	11800 Volt
Hambatan Rotor	0,1740 Ω (pada 75 °C)
Hambatan Stator	0,00305 Ω (pada 75 °C)
Frekuensi	50 Hz
Kutub	2

2.4 Perhitungan Sudut Penyalan *Thyristor* Pada Rangkaian AVR

Untuk menghitung sudut penyalan thyristor harus melakukan tahap perhitungan sebagai berikut :

1. Menghitung tegangan induksi (E_{a-exc}) AC Exciter, dengan menghitung tegangan keluaran AC Exciter (V_{M-exc}) berdasarkan persamaan dari (**Rashid, 2011**).

$$V_{M-exc} = \frac{V_{DC-gen}}{1,6548} \text{ Volt} \quad (1)$$

V_{DC-gen} didapat dari tegangan penguat generator dan nilai tegangan induksi AC Exciter adalah:

$$E_{a-exc} = V_{M-exc} \text{ Volt} \quad (2)$$

2. Menghitung sudut penyalan thyristor pada rangkaian konverter di AVR yang digunakan berdasarkan persamaan dari (Rashid, 2011).

$$\alpha = \cos^{-1} \left(\frac{2\pi V_{DC}}{3\sqrt{3}V_{M-PMG}} - 1 \right) \quad (3)$$

Dengan

$$V_{DC} = \frac{E_{a-exc}}{\sqrt{3}} \text{ Volt} \quad (4)$$

Dan V_m didapat dari nilai puncak keluaran PMG fasa ke tanah.

$$V_{M-PMG} = \frac{\sqrt{2} \cdot V_{L-L}}{\sqrt{3}} \quad (5)$$

3. ANALISIS DAN PEMBAHSAN

3.1 Hasil Perhitungan Sudut Penyalaan *Thyristor*

Perhitungan dilakukan pada sisi AC Exciter. VDC adalah nilai tegangan penguat generator yang diambil dari Tabel 1 dan VM adalah nilai maksimum keluaran PMG, dengan

$$V_{M-PMG} = \frac{\sqrt{2} \cdot 100}{\sqrt{3}} = 81,65 \text{ Volt.}$$

- Pada jam 00:00

$$V_{M-exc} = \frac{V_{fg}}{1,6548} = \frac{58}{1,6548} = 35,04 \text{ Volt.}$$

$$E_a = V_{M-exc} = 35,04 \text{ volt}$$

$$V_{DC} = \frac{E_a}{\sqrt{3}} = \frac{35,04}{\sqrt{3}} = 20,23 \text{ volt}$$

$$\alpha = \cos^{-1} \left(\frac{2\pi \cdot V_{DC}}{3\sqrt{3} \cdot V_{M-PMG}} - 1 \right) = \cos^{-1} \left(\frac{2 \cdot 3,14 \cdot 20,23}{3\sqrt{3} \cdot 81,65} - 1 \right) = 134,47^\circ$$

- Pada jam 02:00

$$V_{M-exc} = \frac{V_{fg}}{1,6548} = \frac{57}{1,6548} = 19,88 \text{ Volt.}$$

$$E_a = V_{M-exc} = 19,88 \text{ volt}$$

$$V_{DC} = \frac{E_a}{\sqrt{3}} = \frac{19,88}{\sqrt{3}} = 19,88 \text{ volt}$$

$$\alpha = \cos^{-1} \left(\frac{2\pi \cdot V_{DC}}{3\sqrt{3} \cdot V_{M-PMG}} - 1 \right) = \cos^{-1} \left(\frac{2 \cdot 3,14 \cdot 19,88}{3\sqrt{3} \cdot 81,65} - 1 \right) = 134,88^\circ$$

Pada Tabel 4 memperlihatkan *logsheet* generator UBP Kamojang unit 2 harian dengan hasil perhitungan sudut penyalaan thyristor.

Tabel 4. Hasil perhitungan sudut penyalan *thyristor* terhadap *logsheet* generator harian

Jam	Penguat		Beban (MW)	Daya Buta (Mvar)	Tegangan (kV)	α (°)
	V (V)	I (A)				
00:00	58	355	41,6	7,5	11,9	134,47
01:00	57	354	41,5	6,8	11,8	134,88
02:00	57	356	41,7	6,4	11,8	134,88
03:00	56	355	41,4	5,5	11,8	135,30
04:00	55	350	41,6	8,1	11,8	135,73
05:00	54	349	41,5	7,5	11,8	136,16
06:00	52	348	41,6	6,6	11,8	137,01
07:00	51	346	41,4	6,9	11,8	137,46
08:00	52	349	41,6	10	11,8	137,01
09:00	53	349	41,7	9,5	11,8	136,59
10:00	54	349	41,5	10,9	11,8	136,16
11:00	53	349	41,6	10,4	11,8	136,59
12:00	51	330	41,6	7,2	11,8	137,46
13:00	51	336	41,6	9,4	11,8	137,46
14:00	50	336	41,6	6,9	11,8	137,88
15:00	50	336	41,7	8,2	11,8	137,88
16:00	51	338	41,6	5,7	11,8	137,46
17:00	51	337	41,7	4,9	11,8	137,46
18:00	52	336	41,8	3,8	11,8	137,01
19:00	52	335	41,6	6,7	11,8	137,01
20:00	56	351	41,7	7,5	11,8	135,30
21:00	55	355	41,6	8,9	11,8	135,73
22:00	56	349	41,7	8,7	11,8	135,30
23:00	54	347	41,6	6,3	11,8	136,16
00:00	53	346	41,5	7,2	11,8	136,59

Ket : nilai α adalah hasil perhitungan

Pada tabel 4, nilai α adalah hasil perhitungan dari nilai penguat, beban, daya buta dan tegangan berdasarkan pengukuran dari UBP Kamojang Unit 2. Berdasarkan hasil perhitungan *logsheet* generator harian, sudut penyalan *thyristor* bekerja pada rentang $134,47^\circ \leq \alpha \leq 137,88^\circ$.

Ketika terjadi penurunan beban maka nilai sudut penyalan *thyristor* dari hasil perhitungan akan lebih kecil. Sedangkan ketika terjadi kenaikan beban maka nilai sudut penyalan *thyristor* dari hasil perhitungan akan lebih besar.

4. KESIMPULAN

Dalam kesimpulan, dapat disimpulkan bahwa sudut penyalan thyristor merupakan parameter kritis yang mempengaruhi kinerja sistem. Berdasarkan hasil perhitungan, diketahui bahwa sudut penyalan thyristor memiliki rentang kerja antara $\alpha = 134,47^\circ$ hingga $\alpha = 137,88^\circ$, dengan rata-rata nilai sebesar $136,17^\circ$. Lebih lanjut, terungkap bahwa nilai sudut penyalan thyristor sensitif terhadap perubahan beban, dimana kenaikan beban cenderung meningkatkan nilai sudut penyalan, sementara penurunan beban berpotensi mengurangnya. Oleh karena itu, pemahaman mendalam terhadap sudut penyalan thyristor sangat penting untuk mengoptimalkan kinerja sistem dan menjaga stabilitas operasionalnya.

DAFTAR RUJUKAN

- Chapman, Stephen J. 2002. "Electric Machinery and Power System Fundamentals". NewYork : McGraw-Hill.
- D. Jolevski. (2009). Excitation System of Synchronous Generator. Split: University of Split.
- Kundur, Prabha. 1994. "Power System Stability and Control". USA : McGraw-Hill.
- Rashid, Muhammad H. (2011). Power Electronics. USA ; Jordan Hill
- Mitsubishi Electric Corporation. 1986. "Operation Manual Book, , Kamojang Geothermal Power Station 2×55 MW ". Nagasaki Work.
- Mitsubishi Electric Corporation. 1986. "Type VRG-PMH-VI Automatic Voltage Regulator System Instruction Manual ". Nagasaki Work.
- Zuhal. (1991). "Dasar Tenaga Listrik". Bandung : ITB.
- Ridzki, Imron.(2013). Analisis Pengaruh Perubahan Eksitasi Terhadap Daya Reaktif Generator. Jurnal ELTEK, Vol 11 no 02