

Analisis Pengaruh Fluktuasi Beban Terhadap Rugi Daya Stator dan Rotor Pada Generator Sinkron Pembangkit Listrik Tenaga Panas Bumi

Rida Mustofa¹ dan Anis Roihatin^{1*}

¹Jurusan Teknik Mesin, Politeknik Negeri Semarang
Jl Prof Soedarto, SH., Tembalang, Semarang

*E-mail: anis.roihatin@polines.ac.id (corresponding author)

Abstrak

Generator sinkron merupakan mesin listrik yang menghasilkan tegangan dan arus bolak-balik (AC) yang bekerja dengan mengubah energi mekanik (gerak) menjadi energi listrik dengan adanya induksi medan magnet. Salah satu permasalahan dalam pengoperasian generator yakni ketika beban jaringan meningkat, sedangkan beban pembangkitan tetap. Sehingga generator akan bekerja lebih berat dan dapat menyebabkan kenaikan temperatur pada lilitan stator dan rotor (Winding Temperature Generator). Pemanasan berlebih ini nantinya dapat menyebabkan rugi daya pada lilitan stator dan rotor. Rugi daya stator dan rotor generator dihitung dengan persamaan matematis berdasarkan data operasional generator sinkron pada pembangkit listrik tenaga panas bumi. Hasil penelitian menunjukkan bahwa semakin tinggi beban yang dibangkitkan maka arus generator dan arus eksitasi juga semakin meningkat. Kenaikan beban yang dibangkitkan juga menyebabkan rugi daya stator dan rotor meningkat. Saat beban terendah (6,91 MW) rugi daya stator sebesar 1,36 kW dan rugi daya rotornya sebesar 24,13 kW. Sedangkan ketika beban tertinggi (41,54 MW) rugi daya stator sebesar 28,39 kW dan rugi daya rotornya sebesar 45,29 kW. Panas berlebih yang terjadi pada lilitan stator dan rotor dapat menyebabkan kerusakan pada generator, sehingga perlu peninjauan temperatur pada lilitan stator dan rotor.

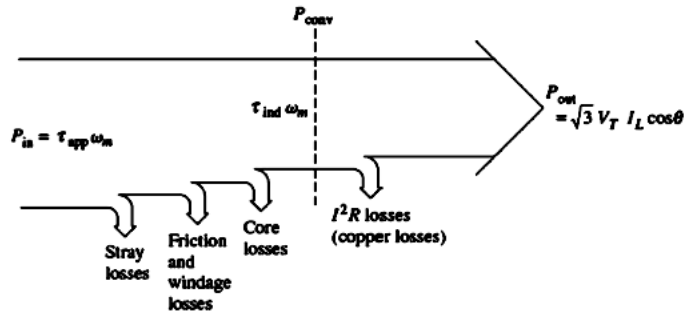
Kata kunci: beban; rugi daya; stator; rotor; generator sinkron.

1. Pendahuluan

Generator sinkron adalah mesin listrik yang menghasilkan tegangan dan arus bolak-balik (AC) yang bekerja dengan cara mengubah energi mekanik (gerak) menjadi energi listrik dengan adanya induksi medan magnet [1]. Generator ini dikatakan sebagai generator sinkron dikarenakan jumlah putaran rotornya sesuai dengan jumlah putaran medan magnet pada stator. Generator bekerja sesuai dengan asas Hukum Induksi Faraday yakni “Apabila suatu medan magnet dipotong oleh sebuah penghantar maka di ujung penghantar tersebut akan timbul gaya gerak listrik”

Rotor generator sinkron diputar oleh penggerak mula (prime mover) yang terdiri dari belitan medan yang disuplai dengan arus searah akan menghasilkan medan magnet putar dengan kecepatan dan arah putaran yang sama dengan putaran rotor tersebut. Medan putar yang dihasilkan pada rotor, akan diinduksikan pada kumparan jangkar sehingga kumparan jangkar yang di stator akan dihasilkan fluks magnetik yang besarnya berubah-ubah terhadap waktu. Adanya perubahan fluks magnetik yang melingkupi suatu kumparan akan menimbulkan ggl induksi pada ujung-ujung kumparan tersebut. Energi mekanik tidak seluruhnya terkonversi menjadi energi listrik, sehingga menyebabkan perbedaan antara daya input dan daya output yang selanjutnya disebut sebagai rugi daya dari mesin. Diagram aliran daya untuk generator sinkron dapat dilihat pada Gambar 1.

Penelitian terkait pengaruh pembebanan terhadap kinerja generator sinkron telah banyak dilakukan diantaranya Farhan (2021) dan Hamdan dkk (2022) mempelajari pengaruh pembebanan terhadap arus eksitasi pada generator [2,3]. Selain itu, penelitian terkait pengaruh pembebanan terhadap rugi daya generator juga telah banyak dilakukan pada beberapa industri dan pembangkit listrik [4-6]. Karakteristik dan kinerja generator sinkron juga telah dianalisa melalui studi lapangan maupun dengan software [7-11].



Gambar 1 Diagram Aliran Daya Generator Sinkron [6]

Kerugian yang terjadi dalam mesin AC dapat dibagi menjadi 4 kategori dasar :

- a. Rugi – rugi tembaga atau listrik

Kerugian tembaga stator dalam mesin 3 fasa AC dapat dihitung menggunakan persamaan:

$$P_{scl} = 3 \times I_s^2 \times R_s \dots\dots\dots (1)$$

- Dengan P_{scl} = rugi daya stator (Watt)
- I_s = Arus generator (A)
- R_s = Tahanan stator (Ohm)

Sedangkan, kerugian tembaga rotor dalam mesin 3 fasa AC dapat dihitung menggunakan persamaan :

$$P_{rcl} = 3 \times I_r^2 \times R_r \dots\dots\dots (2)$$

- Dengan P_{rcl} = rugi daya rotor (Watt)
- I_r = Arus eksitasi (A)
- R_r = Tahanan rotor (Ohm)

- b. Rugi inti (core losses)

Kerugian inti adalah kerugian histerisis dan kerugian eddy current yang terjadi pada logam. Rugi histerisis adalah rugi yang disebabkan oleh fluks bolak – balik pada inti besi

$$Ph = Kh \times f \times Bmax^{1,6} \dots\dots\dots (3)$$

- dengan Ph = Rugi histerisis (Watt)
- Kh = Konstanta histerisis (Watt)
- $Bmax$ = Kerapatan fluks maksimum (T)
- f = frekuensi

Arus *eddy current* adalah rugi yang disebabkan arus pusar pada inti besi

$$Pe = Ke \times f^2 \times Bmax^2 \dots\dots\dots (4)$$

- Dengan Pe = Rugi *eddy current* (Watt)
- Ke = Konstanta *eddy current*
- $Bmax$ = Kerapatan fluks maksimum (T)
- f = Frekuensi

- c. Rugi – rugi mekanik (*mechanical losses*)

Kerugian mekanis dalam mesin AC adalah kerugian yang terkait dengan efek mekanis. Kerugian mekanis dan inti dari sebuah mesin sering disatukan dan disebut dengan hilangnya rotasional tanpa beban mesin.

$$P_{mech} = 0,01 \times P_{in} \dots\dots\dots (5)$$

Dengan P_{mech} = Rugi mekanik

P_{in} = Daya masukan dari *prime mover*

d. Rugi – rugi beban hilang

Semua kerugian semacam disalah artikan sebagai kerugian untuk kebanyakan mesin, kerugian yang hilang diambil oleh konvensi menjadi 1% dari beban penuh

$$P_{stray} = 0,01 \times P_{scl} \dots \dots \dots (6)$$

Dengan P_{stray} = Rugi – rugi beban hilang

P_{scl} = Rugi – rugi daya stator

2. Material dan metodologi

Generator yang digunakan pada pembangkit listrik tenaga panas bumi sebagai obyek penelitian ini merupakan jenis generator sinkron 3 fasa dengan sistem eksitasi menggunakan sikat (*carbon brush*) tipe AC dengan rectifier dan menggunakan sistem pendinginan dengan udara. Generator bekerja pada kecepatan putar 3000 rpm dengan frekuensi 50 Hz dan memiliki 2 kutub. Spesifikasi dari generator sinkron ini dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Data Spesifikasi Generator Unit 1 PLTP Geo Dipa Dieng

Phases	3
Power	75000 Kva
Voltage	15000 V +/- 5 %
Current	2887 A +/- 5%
Frequency	50 Hz
Power Factor	0,8
Rotational Velocity	3000 rev/min
Escaping Velocity	3600 rev/min
Moment Of Inertia	9,77 tm ²
Short - Circuit Factor	≥ 0,55
Stator	
Class Of Winding Insulator	F
Winding Temperature	≤ 141 °C
Phase Resistance Of Winding (a 75 °C)	0,00348 ohms
Rotor	
Class Of Winding Insulator	F
Winding Temperature	≤ 130 °C
Phase Resistance Of Winding (a 75 °C)	0,138 ohms

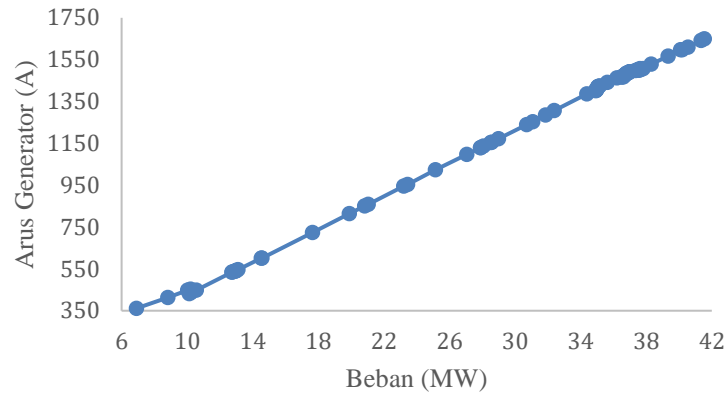
Selanjutnya data operasional generator yang meliputi beban aktif (daya aktif) output generator, beban reaktif (daya reaktif) output generator, arus generator dan arus eksitasi diolah dan dihitung dengan persamaan matematis sehingga diperoleh besarnya rugi daya stator dan rugi daya rotor.

3. Hasil dan pembahasan

3.1. Pengaruh perubahan beban terhadap arus generator dan arus eksitasi

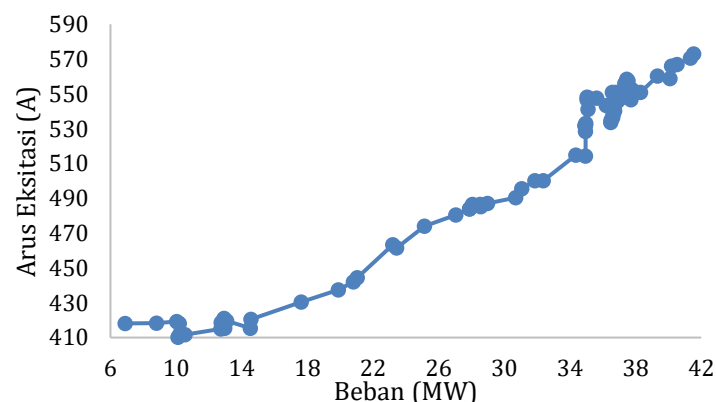
Berdasarkan data operasional beban tertinggi yang dibangkitkan pada generator sinkron yaitu sebesar 41,54 MW dan beban terendah yang dibangkitkan sebesar 6,91 MW. Gambar 2 dan 3 menunjukkan pengaruh perubahan beban terhadap arus generator dan arus eksitasi. . Ketika beban 6,91 MW arus eksitasinya sebesar 418,19 A dengan

arus generator sebesar 14258,06 A, sedangkan ketika beban 41,54 MW arus eksitasinya sebesar 572,91 A dengan arus generator sebesar 1648,91 A Berdasarkan Gambar 2 dapat diketahui bahwa ketika beban yang dibangkitkan meningkat maka arus generator juga akan meningkat. Hal ini dikarenakan ketika beban naik dan tegangan generator tetap maka arus generator akan mengalami kenaikan.



Gambar 2. Pengaruh Perubahan Beban terhadap Arus Generator

Perubahan beban juga berpengaruh terhadap arus eksitasi seperti terlihat pada Gambar 3. Ketika beban mengalami kenaikan maka arus eksitasinya juga akan meningkat. Hal ini dapat terjadi karena ketika beban meningkat, maka secara otomatis uap yang masuk ke turbin juga akan meningkat sehingga putaran turbin juga semakin cepat, dan putarannya dapat melebihi 3000 rpm. Untuk mengantisipasi agar putaran turbin tidak melebihi 3000 rpm maka dilakukan pengaturan tegangan keluaran generator dengan menggunakan AVR (Automatic Voltage Regulator) untuk menjaga kestabilan tegangan pada generator meskipun terdapat perubahan pada beban. Apabila tegangan keluaran pada generator dibawah nilai dari tegangan generator maka AVR akan menambah arus eksitasi dan ketika nilai tegangan generator berada diatas tegangan generator maka AVR akan mengurangi arus eksitasi. Berdasarkan hal tersebut, dapat dikatakan bahwa arus eksitasi berfungsi untuk menjaga putaran turbin agar tetap konstan. Ketika beban meningkat, putaran turbin akan meningkat juga, sehingga untuk menjaga agar putarannya konstan maka arus eksitasinya ditambah. Sehingga dapat dikatakan bahwa ketika beban meningkat maka arus eksitasi juga akan meningkat.

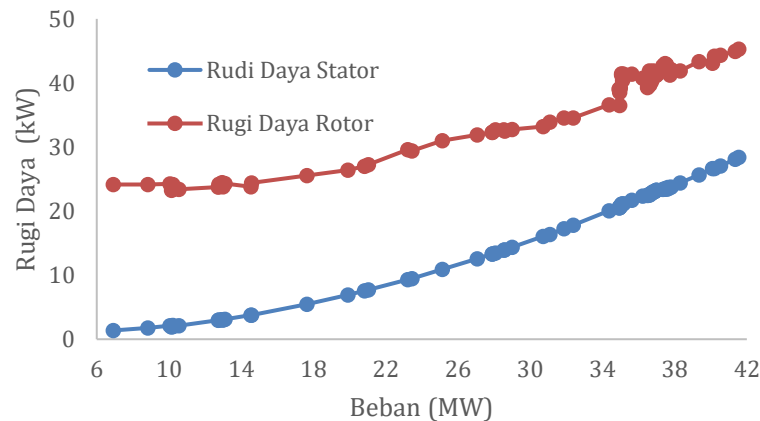


Gambar 2. Pengaruh Perubahan Beban terhadap Arus Generator

3.2. Pengaruh Perubahan Beban terhadap rugi daya stator dan rotor

Perubahan beban juga berpengaruh terhadap rugi – rugi stator dan rotor seperti ditunjukkan pada Gambar 4. ketika beban terendah 6,91 MW rugi daya stator sebesar 1,36 kW sedangkan rugi daya rotornya 24,13 kW.

Sedangkan ketika beban tertinggi 41,54 MW rugi daya statornya sebesar 28,39 kW dengan rugi daya rotornya sebesar 45,29 kW



Gambar 2. Pengaruh Perubahan Beban Terhadap Rugi Daya Rotor Dan Rugi Daya Stator.

4. Kesimpulan

Fluktuasi beban sangat berpengaruh terhadap arus generator dan arus eksitasi. Semakin tinggi beban yang dibangkitkan maka arus generator dan arus eksitasi akan semakin meningkat. Selain itu, fluktuasi beban juga berpengaruh terhadap rugi daya stator dan rotor. Ketika beban yang dibangkitkan mengalami kenaikan maka rugi daya stator dan rotornya juga meningkat. Kenaikan beban juga meningkatkan rugi daya total. Saat beban terendah (6,91 MW) rugi daya stator sebesar 1,36 kW dan rugi daya rotornya sebesar 24,13 kW. Sedangkan ketika beban tertinggi (41,54 MW) rugi daya stator sebesar 28,39 kW dan rugi daya rotornya sebesar 45,29 kW. Panas berlebih yang terjadi pada lilitan stator dan rotor dapat menyebabkan kerusakan pada generator, sehingga perlu peninjauan temperatur pada lilitan stator dan rotor.

Daftar Pustaka

- [1] Anthony, Z. *Mesin Listrik Dasar*. ITP Press; 2018.
- [2] Farhan, M. Pengaruh Pembebanan Terhadap Arus Eksitasi Generator Unit 2 PLTMH Curug. *Jurnal Simetrik*, 2021, 11(1): 398–403.
- [3] Hamdan Rizal Maulana, Agus Suandi, & Helmizar. Pengaruh Pembebanan Terhadap Arus Eksitasi Pada Generator. *Rekayasa Mekanika*, 2022, 6(2): 63–70.
- [4] Muna, Z., Syahputra, Fauzan, & Julianto. Studi Perubahan Beban Terhadap Rugi-Rugi Daya Output Generator Sinkron Tiga Phase 20 MW Pada Generator Turbin Gas Unit 2 Pada PT Pupuk Iskandar Muda. *Jurnal Tektro*, 2023, 7(1): 112–117.
- [5] Renate, M. *Analisa Pengaruh Perubahan Beban terhadap Rugi Daya pada Stator dan Rotor Generator PT. Indonesia Power UPJB Kamojang*. 2020. Skripsi Thesis, Universitas Muhammadiyah Surakarta.
- [6] Septiyan, R., Waruni K, M., & Sugeng, B. Analisa Hilang Daya Pada Generator Sinkron 3 Fasa (6,6 KV) 11 MVA TYPE 1DT4038-3EE02-Z. *Jurnal Teknik Elektro Uniba (JTE UNIBA)*, 2019, 4(1): 7–11.
- [7] Annisa, A., Winarso, W., & Dwiono, W. Analisis Pengaruh Perubahan Beban Terhadap Karakteristik Generator Sinkron. *Jurnal Riset Rekayasa Elektro*; 2019, 1(1): 37–53.
- [8] Eko Pambudi, P., Suyanto, M., & Septa Yogaswara, D. Pengaruh Tegangan Eksitasi terhadap Output Tegangan Generator Sinkron 3 Fasa 6,3kV. *Jurnal Teknologi*, 2021, 15(2): 152–158.

- [9] Mina, I. A., & Sidqi Fahmi, M. Supplay Eksitasi Output Generator 300 Mw Menggunakan Metode Pola Titik Daya Reaktif. *Journal of Mechanical Engineering and Mechatronics*, 2020, 5(1): 11.
- [10] Putri, T. A., Supriyanto, & Hikmat, Y. P. Pengaruh Kenaikan Tegangan Pada Penyulang Generator Unit 4 PLTP Kamojang Akibat Pelepasan Beban Menggunakan Software ETAP 12.6. 0. *Prosiding The 13th Industrial Research Workshop and National Seminar*, 2022. 13–14.
- [11] Yusuf, M., & Hajar, I. Pengaruh Penurunan Efisiensi Generator Sinkron 3 Fasa Akibat Fluktuatif Temperatur Belitan Stator Pada Unit PLTMG Baubau 30 MW . *Jurnal Ilmiah*, 2022, 14(2): 129–140.