

PERUBAHAN JUMLAH ALUR KUMPARAN STATOR DAPAT MENINGKATKAN KAPASITAS DAYA KELUARAN GENERATOR SINKRON TIGA PHASA

Wiwik Purwati Widyarningsih

Program Studi Teknik Konversi Energi, Jurusan Teknik Mesin, Politeknik Negeri Semarang

e-mail : wiwik_pw_zm@yahoo.co.id

Abstract

Total flow charges may increase the capacity of coils stator generator power output synchronous three phase. The government has tried to addition of powerhouse center, but has not been able to meet the increasing demand for electricity. In the generator itself to boost its output capacity by changing the number of the slot. Changes affect the number of slots in addition to the capacity building of the three-phase synchronous generator output also affect the power factor (Cos φ) and efficiency . Results of the study showed that the three phase synchronous generator after having the capacity to change the number of slots increases output power, power factor and efficiency to be better than before the revamped its slot number.

Keywords : "Increase Output Power, Change Slot"

1. PENDAHULUAN

Setiap periode terjadi peningkatan penggunaan energi listrik, hal ini diakibatkan oleh kebutuhan manusia dalam kehidupan sehari-hari selalu menggunakan peralatan listrik. Seiring dengan meningkatnya kebutuhan energi listrik pemerintah telah berupaya untuk memenuhi kebutuhan energi listrik tersebut dengan cara menambah pusat-pusat pembangkit tenaga listrik.

Selain penambahan jumlah pusat-pusat pembangkit tenaga listrik, di pembangkitnya sendiri juga diupayakan peningkatan energi listrik yaitu dengan meningkatkan kapasitas daya keluaran generator sinkron tiga phasa. Peningkatan kapasitas daya keluaran pada generator dipembangkit dapat dilakukan dengan penggantian baru peralatan yang habis umur, peralatan yang efisiensinya rendah dan sudah tidak handal lagi serta dapat memperbaiki peralatan yang masih bisa dimanfaatkan.

Perubahan jumlah alur pada kumparan stator generator sinkron tiga phasa dengan bentuk rotor kutub dalam dapat berdampak pada peningkatan kapasitas daya keluaran generator sinkron tiga phasa tersebut. Dengan merubah jumlah alur tersebut diharapkan akan dapat berpengaruh

terhadap daya keluaran generator sinkron tiga phasa, faktor daya dan efisiensi generator akan semakin baik, sehingga energi listrik yang dihasilkan dapat meningkat sesuai dengan yang diharapkan.

Generator sinkron tiga phasa merupakan suatu peralatan listrik yang dapat merubah energi mekanik menjadi energi listrik. Berdasarkan hukum Faraday bahwa konduktor yang ditempatkan pada medan magnet yang berubah tiap waktu dan digerakkan oleh putaran turbin maka konduktor tersebut akan menghasilkan tegangan induksi sebesar :

$$E_{av} = \frac{d\Phi}{dt} = \frac{\Phi.P.N}{60} = 2. f. \Phi \text{ (Volt) } \text{ Jika}$$

kumparan stator terdapat Z penghantar per phasa dan $Z = 2 T_{ph}$ maka tegangan induksi rata-rata :

$$E_{av} = 4.f.\Phi.T_{ph} \text{ (Volt) } \dots\dots\dots(1)$$

Besarnya tegangan efektif per phasa :

$$E_{rms} = 1,114.f.\Phi.T_{ph} \text{ (Volt) } \dots\dots\dots(2)$$

Jika dalam kumparan stator ada faktor belitan K_w , maka besarnya tegangan efektif :

$$E_{rms} = 4,44.f.\Phi.T_{ph}.K_w \text{ (Volt) } \dots\dots\dots(3)$$

Generator kutub dalam merupakan generator yang kutub-kutub magnet penguatnya di tempatkan di bagian rotor.

Pembangkitan tegangannya dengan cara memutar medan magnet pada rotor sehingga memotong kumparan yang ditempatkan pada stator. Generator kutub dalam digunakan untuk kapasitas daya yang besar, karena tidak memerlukan sikat dan cincin geser untuk menyalurkan dayanya. Generator berkapasitas besar mempunyai dua unit kumparan kutub magnet penguat yaitu kumparan kutub magnet penguat utama terletak pada rotor generator utama dan kumparan kutub magnet penguat terletak pada stator generator.

Generator kutub luar merupakan generator yang kutub-kutub magnet penguatnya di tempatkan di bagian stator, sedangkan kumparan yang membangkitkan tegangan listrik ditempatkan pada rotor. Penyaluran daya listrik dari kumparan rotor diperlukan sikat dan cincin geser, generator ini digunakan untuk kapasitas daya kecil. Generator berkapasitas kecil biasanya mempunyai kutub magnet penguat utama saja.

Rotor bentuk kutub menonjol digunakan pada putaran rendah dengan jumlah kutub yang banyak. Permukaan rotor ini dilengkapi dengan kumparan peredam, yang berfungsi untuk mengurangi ayunan frekuensi yang disebabkan oleh perubahan beban naik turun secara tiba-tiba, dan juga berfungsi untuk penyesuaian frekuensi yang lebih cepat ketika generator diparalel. Rotor bentuk kutub merata digunakan untuk putaran tinggi dengan jumlah kutub yang sedikit. Peredam yang dipasang pada rotor tersebut berupa logam padat.

Sistem penguatan generator sinkron tiga fasa berdasarkan penghasil medan magnet utama adalah sistem penguatan dengan arus searah dan sistem penguatan dengan arus bolak-balik. Sistem penguatan dengan arus searah terdiri dari *main exciter* dan *pilot exciter*. *Main exciter* langsung dihubungkan dengan poros generator sinkron tiga fasa, sedangkan *pilot exciter* merupakan generator DC shunt yang mana arus searahnya mengalir ke kumparan medan generator penguat utama, yang kemudian mengalir ke kumparan medan generator

sinkron tiga fasa melalui slip ring. Generator penguat utama merupakan generator DC penguat terpisah.

Sistem penguatan dengan arus bolak-balik ada dua yaitu generator AC penguat sendiri dan generator AC tanpa sikat. Generator AC penguat sendiri : sebagian arus bolak-balik yang dibangkitkan oleh generator sinkron tiga fasa digunakan untuk penguatan rotor melalui transformator dan penyearah. Sistem penguat generator AC tanpa sikat menggunakan generator AC pelengkap sebagai penguat generator sinkron tiga fasa. AC dari kumparan jangkar generator pelengkap disearahkan dengan penyearah, hasilnya langsung mengalir ke kumparan medan generator sinkron tanpa menggunakan sikat dan slip ring. Untuk penguat medan magnet generator pelengkap menggunakan sebagian dari AC yang dibangkitkan generator sinkron melalui rangkaian penyearah dan rangkaian Automatic Voltage Regulation (AVR).

Generator sinkron tiga fasa mempunyai rugi-rugi yang dapat digunakan untuk menentukan besarnya efisiensi generator. Rugi-rugi tersebut antara lain :

- a. Rugi kumparan jangkar : Merupakan kerugian tahanan Ohm yang terjadi pada kumparan jangkar :

$$P_a \approx 3.I_a^2.R_a \text{ (Watt) } \dots\dots\dots(4)$$

- b. Rugi kumparan medan : Merupakan kerugian daya dalam kumparan medan . Selain itu ada kerugian dalam sikat dan cincin geser.

$$P_f \approx I_f^2.R_f = I_f.V_f \text{ (Watt) } \dots\dots\dots(5)$$

- c. Rugi beban nol : Akibat hilangnya daya karena arus Eddy dan *loop hysteresis*, sehingga inti besi stator dan rotor mengalami kenaikan suhu

$$P_o \approx P_h + P_e = K_h.f.B_m^{1.6} + K_e^2.f^2.B_m \dots\dots\dots(6)$$

- d. Rugi mekanik : yaitu rugi bantalan yang disebabkan oleh gesekan bantalan dan poros pada waktu generator berputar, sehingga menimbulkan panas. Sebagian panas diserap oleh minyak pendingin dan sebagian lagi lolos kepermukaan. Adanya kerugian ventilasi yang diakibatkan oleh

hambatan aliran udara pendingin pada waktu generator berputar.

$$P_m = h.A \Delta t_1 \quad (\text{Watt}) \dots\dots\dots(7)$$

e. Rugi tambahan : Disebabkan oleh fluks pulsasi memanjang pada gigi jangkar, medan magnet yang tidak seragam pada kumparan jangkar, fluks magnet melintang pada sepatu kutub.

$$P_t = P_{sc} - R I_{sc}^2 \quad (\text{Watt}) \dots\dots\dots(8)$$

Berdasarkan Sawhney 1991 : 456, daya keluaran generator sinkron tiga fasa :

$$Q_a = m.E_{ph}.I_{ph}.10^{-6} \quad (\text{MVA})$$

$$= 2,22.m.P.N_s.\Phi.T_{ph}.K_w.I_{ph}.10^{-6} \quad (\text{MVA})$$

.....(9)

Besarnya efisiensi generator sinkron tiga fasa merupakan perbandingan antara daya keluaran dengan daya masukan (Sawhney, 1991 : 465).

$$\eta = \frac{Q}{3Q_a - 2Q} \times 100\% \dots\dots\dots(10)$$

Jika tiap fasa ada satu rangkaian belitan, maka arus belitan sama dengan arus fasa $I_z = I_{ph}$ dan jumlah konduktor jangkar :

$$Z = 2.m.T_{ph} \dots\dots\dots(11)$$

Kerapatan arus total

$$I_z.Z = I_{ph}.2.m.T_{ph} \dots\dots\dots(12)$$

sehingga daya keluaran generator sinkron tiga fasa

$$Q = 1,11.K_w.\Phi.Z.I_z.N_s.10^{-6} \quad (\text{MVA})$$

.....(13)

Kerapatan listrik $q_c = \frac{I_z.Z}{\pi.D.L}$, maka daya

keluaran generator sinkron tiga fasa adalah

$$Q = (1,11.\pi^2.K_w.B_{av}.ac.10^{-6}).D^2.L.N_s$$

$$= C_o.D^2.L.N_s \dots\dots\dots(14)$$

dari persamaan (15) terlihat bahwa yang berpengaruh terhadap daya keluaran generator sinkron tiga fasa adalah kerapatan magnet spesifik, kerapatan listrik spesifik dan putaran sinkron generator.

Menurut Fitzgerald, 1986 : 349 bahwa perbandingan antara arus medan yang diperlukan untuk mencapai tegangan nominal

pada rangkaian terbuka dengan arus medan yang diperlukan untuk mencapai arus jangkar pada rangkaian hubung-singkat disebut *short circuit ratio* (SCR).

$$SCR = \frac{I_{f,oc}}{I_{f,sc}} \dots\dots\dots(15)$$

Perubahan jumlah slot akan mengakibatkan daya keluaran pada generator sinkron tiga fasa juga berubah, hal ini diakibatkan oleh daya keluaran generator berbanding langsung terhadap koefisien keluaran generator. Jika koefisien bertambah besar maka daya keluaran generator juga bertambah besar. Besarnya koefisien generator :

$$C_o = 1,1.K_w.B_{av}.ac.10^{-6} \dots\dots\dots(16)$$

Koefisien keluaran generator diperbesar dengan cara memperbesar faktor belitan (K_w).

Faktor belitan berkaitan erat dengan jumlah slot pada generator sinkron tiga fasa

$$K_w = \frac{E_{ph}}{4,44.f.\Phi.T_{ph}} \dots\dots\dots(17)$$

$$\text{Jumlah belitan : } Z_{ph} = \frac{Z_s.S}{2.m} \dots\dots\dots(18)$$

Maka faktor belitan generator sinkron tiga fasa :

$$K_w = \frac{2.E_{ph}}{4,44.f.\Phi.Z_s.S} = \frac{E_{ph}}{2,22.f.\Phi.Z_s.S}$$

$$= \frac{E_{ph}}{2,22.f.\Phi.Z_s.S} \dots\dots\dots(19)$$

Faktor belitan berbanding terbalik terhadap jumlah slot, sehingga untuk memperbesar daya keluaran generator sinkron tiga fasa salah satunya dengan memperkecil jumlah slot. Besarnya fluks rata-rata :

$$B_{av} = \frac{P.\phi}{\pi.D.L} \dots\dots\dots(20)$$

Sedangkan besarnya kerapatan listrik :

$$ac = \frac{I_z.Z}{\pi.D.L} \dots\dots\dots(21)$$

Faktor daya ($\cos \phi$) merupakan perbandingan antara daya nyata dengan daya semu, karena arus pada daya nyata dan daya semu sebanding maka besarnya faktor daya :

$$\cos\phi = \frac{R}{Z_s} \dots\dots\dots(22)$$

Besar impedansi sinkron $Z_s = \frac{E_{ph}}{I} \dots(23)$

Keterangan :

- ac : Kerapatan listrik (Amp lilit/m²)
- Φ : Fluks magnet (Weber)
- B_{av} : Kerapatan fluksi (Wb/m²)
- I : Arus beban (A)
- C_o : Koefisien out put generator
- Cos φ : Faktor daya
- I_{f, oc} : Arus medan rangkaian terbuka (A)
- D : Diameter stator (m)
- I_{f, sc} : Arus medan hubung-singkat (A)
- dΦ : Perubahan fluks (A)
- dt : Waktu terjadinya perubahan fluks
- I_{sc} : Arus hubung-singkat (A)
- E_{av} : Tegangan induksi rata-rata (Volt)
- I_z : Arus tiap belitan (A)
- E_{ph} : Tegangan per fasa (Volt)
- K_w : Faktor belitan
- E_{rrms} : Tegangan induksi efektif (Volt)
- L : Panjang stator (m)
- η : Effisiensi (%)
- m : Jumlah fasa
- f : Frekuensi (Hetz)
- N_s : Tahanan sinkron (Ω)
- I_{ph} : Arus per fasa (A)
- P : Jumlah kutub
- Q : Daya output generator (W)
- SCR : Short Circuit Rasio
- Q_a : Daya out put jangkar (W)
- T_{ph} : Belitan per fasa
- R : Tahanan jangkar (Ω)
- Z : Jumlah konduktor
- S : Jumlah slot
- Z_s : Impedansi sinkron

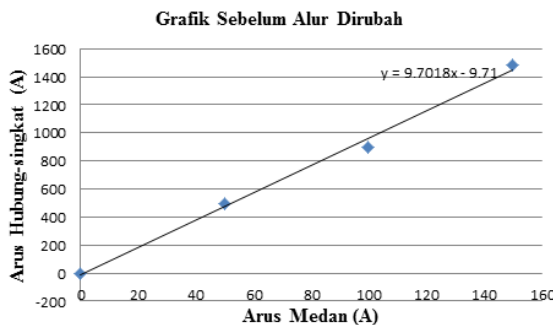
2. DATA TEKNIK GENERATOR

Tabel 1. Data teknik generator PLTA Jasa Tirta II

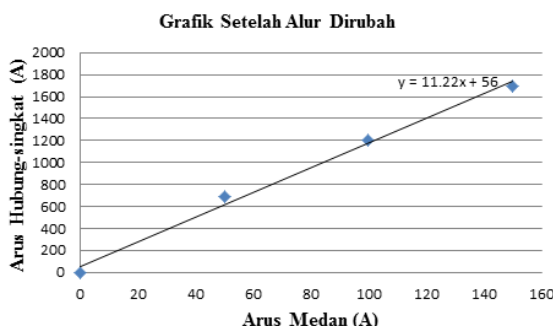
Uraian	Generator 3 fasa	
	Sebelum	Setelah
Tegangan Nom	6300V±10%	6300V±10%
Kecepatan Nom	272.7 rpm	272.7 rpm
Fluks	0.4 Wb	0.45 Wb
Jml Fasa	3	3
Jml kutub	22	22
Penguat bbn nol	78V, 340A	67V, 330A
Penguat bbn penuh	192V, 63A	168V, 546A
SCR	1.1	1.14

Tahanan belitan	1.0248	1.05
Diameter stator	4100 mm	4090 mm
Diameter rotor	4056 mm	4056 mm
Celah udara	22 mm	17 mm
Jumlah alur	270	234
Jml penghantar/alur	2	2

3. HASIL DAN PEMBAHASAN



Gambar 1. Karakteristik hubung-singkat sebelum alur dirubah



Gambar 2. Karakteristik hubung-singkat setelah alur dirubah

Besarnya arus nominal dapat dianalisis dari data teknik yaitu faktor daya dan peningkatan daya keluaran yang bisa diperoleh dari perubahan jumlah alur. Berdasarkan karakteristik hubung-singkat, arus hubung-singkat merupakan arus kerja stator. Arus kerja stator diasumsikan arus nominal. Arus nominal diperoleh dengan pengujian hubung-singkat. Penentuan arus hubung-singkat pada gambar 1 dengan cara menggunakan persamaan (15), sehingga diperoleh arus medan hubung singkat 309,1 A (sebelum dirubah jumlah alur). Arus tersebut diplotkan pada gambar 1, sehingga diperoleh arus hubung-singkat 2825 A. Setelah dirubah jumlah alur diperoleh arus medan hubung-singkat 289,5 A, dan arus tersebut diplotkan pada gambar 1 sehingga diperoleh arus hubung-singkat 3175 A.

Perubahan jumlah slot dapat berpengaruh terhadap jumlah total penghantar, jumlah belitan per fasa, faktor belitan dan luas penampang kumparan stator yang mengakibatkan perubahan fluksi magnet pada kumparan stator. Perhitungan daya keluaran generator sinkron tiga fasa sebelum dan setelah dirubah jumlah slot seperti tabel berikut :

Tabel 2. Perubahan Jumlah Alur

Uraian	Jumlah Alur Dirubah	
	Sebelum	Setelah
Jmlh belitan per fasa, pers (19)	90	78
Faktor belitan, pers (18)	0,455	0,467
Kerapatan fluks (Web/m ²), pers (21)	0,6901	0,7787
Kerapatan listrik, pers (22)	118434,57	115642,215
Daya keluaran generator (MVA), pers (14)	30,815 ∞ 31	34,677 ∞ 35

Persamaan (24) akan menghasilkan nilai faktor kerja 0,8 sebelum dirubah jumlah alur dan faktor kerja 0,92 setelah dirubah jumlah alurnya. Baik buruknya generator sinkron tiga fasa tergantung dari effisiensinya, pada saat beban penuh sebelum dirubah jumlah alur $\eta = 95,56\%$ dan setelah dirubah jumlah alur $\eta = 98,25\%$. Saat beban penuh generator sinkron tiga fasa mempunyai rugi-rugi yang besar bila dibandingkan dengan saat beban kosong, hal ini disebabkan adanya rugi-rugi daya yang diakibatkan oleh reaksi jangkar saat generator dibebani. Sehingga saat generator beban penuh mempunyai effisiensi yang rendah. Dengan demikian effisiensi generator

diambil pada saat beban penuh, karena generator tersebut fungsinya untuk dibebani.

4. KESIMPULAN

- 4.1. Perubahan jumlah alur pada kumparan stator dapat meningkatkan daya keluaran generator sinkron tiga fasa
- 4.2. Daya keluaran generator sinkron tiga fasa sebesar 31 MVA (sebelum dirubah jumlah alur) dan daya keluarannya sebesar 35 MVA (setelah dirubah jumlah alur)
- 4.3. $\cos \phi = 0,8$ sebelum dirubah jumlah alur dan setelah dirubah jumlah alur $\cos \phi = 0,92$
- 4.4. $\eta = 95,56\%$ (sebelum dirubah jumlah alur) dan $\eta = 98,25\%$ (setelah dirubah jumlah alur)

DAFTAR PUSTAKA

- Anonim, Alternateur Hydrauliquis PLTA Jatiluhur, Francis (1965, 1991)
- Achyanto, Djoko, Mesin-mesin listrik, Edisi ke 6, Erlangga (1994)
- Chapman, Stephen, Electric Mechinery Fundamental United State of America, MC Graw-Hill, Inc (1995)
- Fitzgerald, A Tex-Book of Electrical Technology, hal 349, Ram Nagar (1996)
- Purnomo, Hery, Mesin-mesin Arus Bolak-balik, hal 59, Unibraw, (1986)
- Ryff, Electric Mechinery, Frenice Hall Inc Arrier Teknologi (1992)
- Sawhney, Electric Mechine Design, hal 320-774, Ram Nagar (1991)
- Sumanto, Mesin-mesin Sinkron, hal 44-48, Edisi ke 1, Andy Ofset, (2002)