

Pengaruh Inti Stator Terhadap Performa Generator Magnet Permanen Fluks Aksial Satu Fasa

Effect of Stator Core on Performance of Single-Phase Axial Flux Permanent Magnet Generator

Hari Prasetyo

Universitas Jendearal Soedirman

Jl. Profesor DR. HR Boenjamin No.708, Purwokerto, Indonesia

*email: hari.prasetyo@unsoed.ac.id

ABSTRAK

DOI;
10.30595/jrst.v6i2.13668

Histori Artikel:

Diajukan:
11/05/2022

Diterima:
01/11/2022

Diterbitkan:
25/11/2022

Studi ini menganalisa aplikasi mesin permanen magnet fluks aksial sebagai generator. Tipe generator magnet permanen flux aksial yang dianalisa yaitu *single stator double rotor axial-flux*. Tujuan dari studi ini adalah menganalisa pengaruh penambahan inti stator terhadap performa generator. Metode yang digunakan adalah simulasi menggunakan aplikasi FEEM 4.2. untuk mengamati parameter rapat fluks magnet (Br) dan fluks magnet (Φ) pada celah udara, back-emf (E-rms) generator, dan kapasitas daya nyata (S) pada generator tanpa inti stator (*coreless stator*) dan penambahan *ferrite* pada belitan stator dengan variabel pemasangan magnet pada rotor (PM). Celah udara (δ) antara stator dan rotor konstan pada jarak 2 mm dengan variabel kedalaman pemasangan magnet permanen pada piringan rotor. Hasilnya penambahan inti *ferrite* pada stator meningkatkan fluks, *back-emf* dan daya generator sebesar 27,9%, 28,5%, 28,9% dan 35,9% untuk pemasangan magnet permanen pada kedalaman berturut-turut 0%, 5%, 10% dan 50%. Penambahan inti *ferrite* pada belitan stator generator magnet permanen fluks aksial signifikan meningkatkan Br, Φ , E-rms dan S.

Kata Kunci: Generator, Magnet, Aksial, Inti, Stator

ABSTRACT

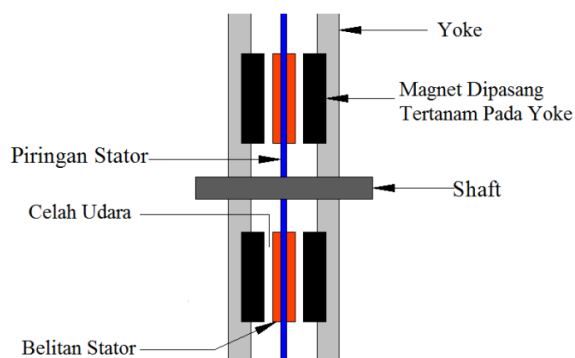
This study analyzes the application of an axial flux permanent magnet machine as a generator. The type of axial flux permanent magnet generator analyzed is *single stator double rotor axial-flux*. The purpose of this study is to analyze the effect of adding a stator core to generator performance. The method used is a simulation using the FEEM 4.2 application. to observe the parameters of magnetic flux density (Br) and magnetic flux (Φ) in the air gap, back-emf (E-rms) generator, and real power capacity (S) on a generator without a stator core (*coreless stator*) and the addition of ferrite in the windings. stator with variable magnetic mount on the rotor (PM). The air gap (δ) between the stator and the rotor is constant at a distance of 2 mm with a variable depth of permanent magnet installation on the rotor disk. The result is that the addition of a ferrite core to the stator increases the flux, back-emf and generator power by 27.9%, 28.5%, 28.9% and 35.9% for the installation of permanent magnets at depths of 0%, 5%, respectively. 10% and 50%. The addition of a ferrite core to the stator winding of the axial flux permanent magnet generator significantly increases Br, Φ , E-rms and S.

Keywords: Generator, Magnet, Axial, Core, Stator

1. PENDAHULUAN

1.1. Generator magnet permanen flux aksial

Generator magnet permanen flux aksial memiliki densitas daya dan torsi tinggi (Eldoromi, 2019). Artinya perbandingan daya dan torsi yang dihasilkan terhadap volume generator memiliki nilai yang relatif besar. Selain itu generator ini memiliki rapat fluks pada celah udara yang sinusoida (Shokri, 2015), sehingga *back-emf* (E) yang dihasilkan mendekati sinusoida atau memiliki memiliki distorsi yang kecil. Salah satu tipe generator magnet permanen fluks aksial adalah tipe *single stator double rotor* (SSDR), terdiri dari satu piringan stator yang terletak diantara dua piringan rotor. Kelebihan tipe ini memiliki *cogging torque* mendekati 0 dan mudah konstruksinya (Praglowaska, 2017) serta menghasilkan fluks yang besar pada stator (Husain, 2017). Pasangan magnet pada dua sisi rotor merupakan pembangkit fluks sehingga tidak memerlukan rangkaian eksitasi. Gambar 1 menunjukkan generator magnet permanen fluks aksial SSDR, dengan magnet tertanam pada *yoke* rotor.



Gambar 1. Generator magnet permanen SSDR

Stator generator magnet permanen fluks aksial merupakan kumparan jangkar (*armature coil*), kumparan tempat dibangkitkan *back-emf*, yang tersusun dari beberapa kumparan kawat (Li, 2018). Desain kumparan jangkar tanpa inti besi banyak digunakan sebagai generator skala kecil dan putaran rendah (Wanjiku, 2015). Pada studi sebelumnya telah dibuat rancang bangun generator magnet permanen fluks aksial dengan kumparan jangkar tanpa inti berhasil dibuat (Prasetyo, 2015).

Tujuan dari studi ini adalah menganalisa pengaruh penambahan inti stator terhadap performa parameter generator yang meliputi rapat fluks magnet (B_r) dan fluks magnet (Φ) pada celah udara, *back-emf* (E_{rms}) generator, dan kapasitas daya nyata (S) generator dengan variabel kedalaman

pemasangan permanen magnet pada piringan rotor (PM).

2. METODE PENELITIAN

Metode yang digunakan adalah simulasi dengan aplikasi FEMM 4.2. untuk mendapatkan rapat fluks magnet (B_r) pada celah udara (jarak antara magnet pada rotor terhadap stator). Rapat fluks digunakan untuk menghitung parameter fluks magnet (Φ) pada celah udara, *back-emf* (E_{rms}) generator, dan kapasitas daya nyata (S) generator. Simulasi dan perhitungan dilakukan terhadap stator tanpa inti dan stator dengan inti *ferrite* untuk desain generator magnet permanen fluks aksial yang sama. Celah udara tetap pada jarak 2 mm, sedangkan pemasangan magnet permanen pada rotor (PM) divariasikan menjadi 4 kondisi, yaitu : di permukaan rotor (kedalaman 0%), kedalaman 5%, 10% dan 50% dari tebal magnet. Tahapan yang dilakukan adalah sebagai berikut:

2.1 Menentukan Dimensi Generator Magnet Permanen Fluks Aksial

Tabel 1. Spesifikasi desain generator

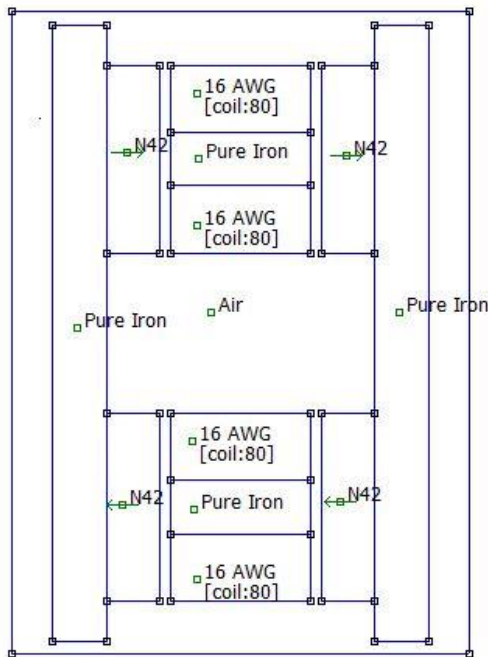
Putaran rotor	600 rpm
Jumlah lilitan (N)	80
Frekuensi elektris (f)	50 Hz
Jumlah slot (Ns)	10
Jumlah fasa (Nph)	1
Radius luar magnet (ro)	105 mm
Radius dlm magnet (ri)	65 mm
Jumlah magnet (Nm)	10
Jarak antar magnet (ζf)	20 mm
Jari - jari magnet	26,9 mm
Tebal magnet (lm)	10 mm
Air gap (δ)	2 mm
Kedalaman magnet (PM)	0%, 5%, 10%, 50% tebal magnet
Remanensi magnet (B)	1,3 Tesla
Jenis kawat belitan	AWG 16
KHA kawat	3,7 A

Magnet berjumlah sepuluh berjenis magnet permanen dengan bahan NdFeB, dengan tebal sepuluh mm. Jarak antar magnet 26,9 mm, dengan air gap antara rotor dan stator 2 mm. Desain generator memiliki spesifikasi seperti ditunjukkan dalam tabel 1.

2.2. Membuat Desain Simulasi Menggunakan Aplikasi FEMM 4.2.

Desain simulasi digunakan untuk memperoleh nilai rapat fluks magnet pada celah udara dengan pada stator dengan dan tanpa inti ferrit dengan variasi pemasangan magnet 0%,

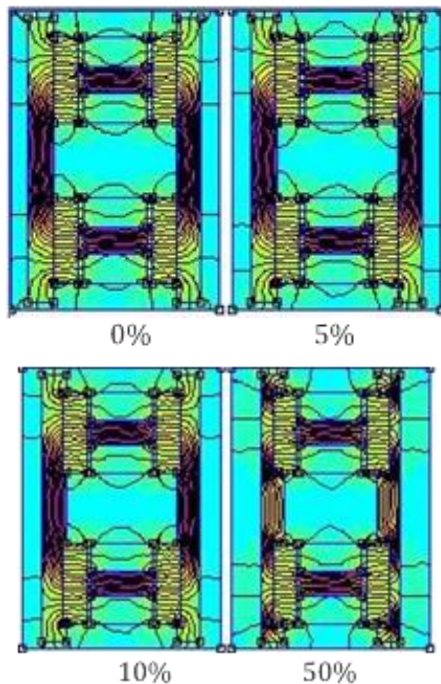
5%, 10% dan 50% tebal magnet pada rotor. Gambar 2 menunjukkan desain simulasi FEMM 4.2.



Gambar 2. Desain simulasi

2.3. Menentukan Rapat Fluks (Br) Magnet Hasil Simulasi

Rapat fluks untuk masing-masing letak magnet pada rotor ditentukan dengan mengambil nilai rata-rata rapat fluks magnet hasil simulasi dari 10 titik pada celah udara.



Gambar 3. Hasil simulasi FEMM 4.2

2.4. Perhitungan Fluks Maksimum (ϕ_{maks})

Fluks magnetik adalah jumlah rapat fluks magnet B (tesla) yang melewati luas penampang tertentu. Satuan fluks magnetik dalam satuan internasional adalah weber (Wb). Fluks maksimum yang dihasilkan permukaan magnet dapat dihitung dengan persamaan (1).

$$\phi_{maks} = A_{mag} \cdot B_{maks} \quad (1)$$

dengan:

A_{mag} = area magnet (m^2)

B_{maks} = densitas fluks maksimum (weber)

$$A_{mag} = \frac{\pi \cdot (r_o^2 - r_i^2) - \tau_f(r_o - r_i) \cdot N_m}{N_m}$$

dan

$$B_{maks} = B_r \cdot \frac{l_m}{l_m + \delta}$$

dengan:

r_o = radius luar magnet (m)

r_i = radius dalam magnet (m)

τ_f = jarak antar magnet (m)

N_m = jumlah magnet

B_r = rapat fluks magnet (tesla)

l_m = tebal magnet (m)

δ = jarak antara rotor dan stator

2.5. Menghitung Back-Emf (Erms)

Pada prinsipnya generator mengubah energi mekanik menjadi energi listrik. Back emf (tegangan induksi) yang dibangkitkan oleh generator dihitung dengan persamaan (2).

$$E_{rms} = \frac{2\pi}{\sqrt{2}} \times N \times f \times \phi_{maks} \times \frac{N_s}{N_{ph}} \quad (2)$$

dengan :

E_{rms} = back emf (volt)

N = jumlah lilitan per kumparan

f = frekwensi elektris (Hz)

ϕ_{maks} = fluks magnet maksimum (Wb)

N_s = jumlah kumparan

N_{ph} = jumlah fase

2.6. Menghitung Rating Daya Generator

Kapasitas maksimum generator ditentukan dengan perkalian back emf (Erms) dan kemampuan hantar arus (KHA) kawat dari stator pada generator seperti pada persamaan (3).

$$S = E_{rms} \times I \quad (3)$$

Dengan :

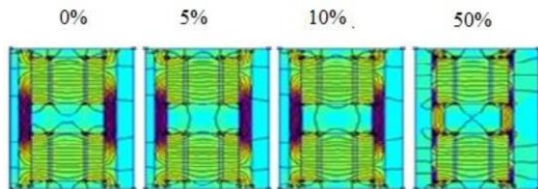
S = daya nyata generator (VA)

I = kemampuan hantar arus lilitan (A)

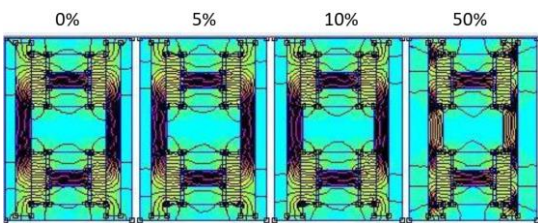
3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1. Rapat fluks magnet

Gambar 3 dan 4 merupakan simulasi FEMM 4.2. untuk menentukan rapat fluks magnet pada kumparan stator tanpa inti dan pada stator inti ferit. Pemasangan magnet pada piringan rotor dibuat pada kedalaman 0%, 5%, 10% dan 50% dari tebal magnet.



Gambar 3. Hasil simulasi stator tanpa inti



Gambar 4. Hasil simulasi stator inti ferit

Hasil simulasi ditunjukkan pada tabel 1. Semakin dalam pemasangan magnet pada piringan rotor, semakin kecil nilai rapat fluks magnet. Sebagian fluks magnet akan mengalir ke piringan rotor karena material piringan rotor (pure iron) memiliki reluktansi yang lebih rendah dibandingkan dengan celah udara antara rotor dan stator. Selain itu, semakin dalam pemasangan magnet akan memperkecil volume piringan rotor akibatnya fluks magnet akan mengalir pada lintasan yang memiliki reluktansi yang lebih rendah, karena volume material rotor sebanding dengan luas. Persamaan (4) menunjukkan relasi antara reluktansi dan luas.

$$R = \frac{l}{\mu A} \quad (4)$$

dengan,

R = Reluktansi

μ = Permeability

A = luas penampang

Tabel 1. Rapat fluks magnet stator

No	PM	Br (T) tanpa inti	Br (T) inti ferit	Δ (%) naik
1	0%	0,556613	0,960429	72,5
2	5%	0,549501	0,951922	73,2
3	10%	0,546241	0,941714	73,7
4	50%	0,471186	0,863375	83,2

Tabel 1 juga menginformasikan bahwa penambahan inti ferit pada belitan stator menaikkan signifikan rapat fluks di belitan stator. Kenaikan 72,5% pada pemasangan magnet permanen pada kedalaman 0% sampai 83,2% pada kedalaman 50% meskipun secara kuantitas rapat fluksnya paling kecil karena paling dalam pemasangan permanen magnet pada piringan rotor.

Tabel 2. Fluks magnet pada stator

No	PM	Fluks, ϕ (Wb) tanpa inti	Fluks, ϕ (Wb) inti ferit	Δ (%) naik
1	0%	0,0004913	0,0006286	27,9
2	5%	0,0004850	0,0006230	28,5
3	10%	0,0004821	0,0006163	28,9
4	50%	0,0004159	0,0005650	35,8

Tabel 2 menunjukkan fluks pada kumparan stator menurun dan kenaikan fluks semakin tinggi jika pemasangan magnet pada rotor semakin dalam. Hal ini tipikal seperti kondisi rapat fluks pada tabel 1 merujuk pada relasi rapat fluks dan fluks dari persamaan (1) dimana nilai fluks (ϕ) berbanding lurus dengan nilai rapat fluks (Br).

Tabel 3. Back-emf pada stator

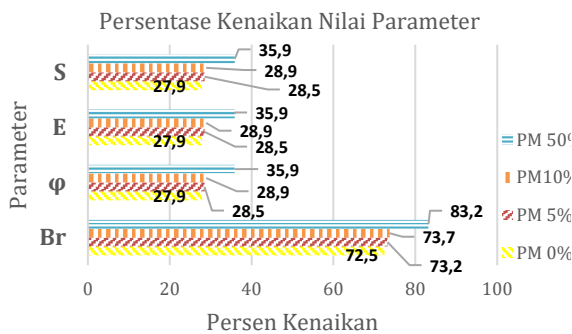
No	PM	E_{rms} (V) tanpa inti	E_{rms} (V) inti ferit	Δ (%) naik
1	0%	87,254	111,631	27,9
2	5%	86,136	110,642	28,5
3	10%	85,620	109,456	28,9
4	50%	73,86	100,350	35,9

Tabel 4. Kapasitas daya maksimum generator

No	PM	Daya (VA) tanpa inti	Daya (VA) inti ferit	Δ (%) naik
1	0%	322,839	413,036	27,9
2	5%	318,703	409,376	28,5
3	10%	316,794	404,986	28,9
4	50%	273,282	371,296	35,9

Berdasarkan persamaan (2) dan persamaan (3), nilai back emf (E_{rms}) berbanding lurus dengan nilai fluks (ϕ) dan nilai daya listrik (S) berbanding lurus dengan nilai back emf sehingga kenaikan kuantitas back emf dan daya (S) dengan variasi pemasangan magnet pada rotor identik dengan kenaikan fluks sehingga persentase kenaikan pada tabel

2,3, dan 4 identik. Hal tersebut dapat dilihat lebih jelas dari gambar 5.



Gambar 5. Persentase kenaikan parameter pada stator tanpa inti dibandingkan stator inti ferrite dengan variabel kedalaman pemasangan permanen magnet pada rotor

Penambahan inti ferrite pada stator meningkatkan fluks, back-emf dan daya generator sebesar 27,9%, 28,5%, 28,9% dan 35,9% untuk pemasangan magnet permanen pada kedalaman berturut-turut 0%, 5%, 10% dan 50%.

4. KESIMPULAN

Dari bagian hasil dan pembahasan dapat disimpulkan :

- Dibandingkan belitan stator tanpa inti, penambahan ferrite pada belitan stator meningkatkan signifikan rapat fluks magnet (Br) dan fluks magnet (Φ) pada celah udara, back-emf (E-rms) generator, dan kapasitas daya nyata (S) generator.
- Semakin dalam pemasangan magnet permanen pada rotor semakin kecil kuantitas Br, Φ , E-rms dan S generator.
- Semakin dalam pemasangan magnet permanen pada rotor, semakin tinggi persentase kenaikan Br, Φ , E-rms dan S generator.

DAFTAR PUSTAKA

- Eldoromi, M. et al. (2018). Improved Design of Axial Flux Permanent Magnet Generator for Small-Scale Wind Turbine. *Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences*, 26: 3084-3099.
- Husain, T., Tekgun, B., Sozer, Y., Hamdan, Y. (2017). Comparison of Axial Flux Machine Performance with Different Rotor and Stator Configurations. *IEEE International Electric Machines and Drives*. Miami, 21-24 May 2017.
- Li, X., Lai, C. S., Chan, T. F., Lai, L. L. (2018). Axial-Flux Permanent-Magnet Synchronous Generator with Coreless Armature and

Non-Integral Coil-Pole Ratio. *Renewable Power Generation, IET* · October 2018.

Pragłowska, N.M., Borkowski, D., Wegiel, T. (2017). Model of Coreless Axial Flux Permanent Magnet Generator. *International Symposium on Electrical Machines (SME), IEEE conference*. Poland, 18-21 June 2017

Prasetyo, H., Waluyo, S. (2015). Optimasi Lebar Celah Udara Generator Axial Magnet Permanen Putaran Rendah 1 Fase. *JNTETI UGM*, Vol. 4 No 4

Shokri, M., Rostami, N., Behjat, V., Pyrhönen, J. and Rostami, M. (2015). Comparison of Performance Characteristics of Axial-Flux Permanent-Magnet Synchronous Machine with Different Magnet Shapes. *IEEE Transactions on Magnetics*, 51, No. 125.

Wanjiku, J.G. (2015). High Flux Density Rotational Coreless Measurement. *PhD Thesis Concordia University*