

# Analisis Perubahan Jumlah Slot pada *Permanent Magnet Synchronous Generator (PMSG)* untuk Mencapai Nilai Optimal *Back EMF* dan *KE* berbasis *Finite Element Method (FEM)*

Slash Arthur Edi Sumawang, Subuh Pramono\*

Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Sebelas Maret,  
Jl. Ir. Sutami, No 36 A, Jebres, Surakarta, Indonesia 57126

## Abstrak

Generator dapat menghasilkan listrik dengan tiga syarat, yakni : terdapat medan magnet, coil dan adanya perubahan flux yang melewati coil. Tempat untuk meletakkan coil pada generator disebut dengan slot, jumlah slot dapat berpengaruh pada karakteristik generator. Perubahan jumlah slot berpengaruh pada *Back EMF* dan *KE*. Simulasi menggunakan kawat lilitan dengan diameter 1 mm. Pada penelitian ini dilakukan perancangan PMSG 12s10p, dan divariasikan slotnya menjadi 15s10p. PMSG 12s10p memiliki 12 slot dengan 188 lilitan, dan 15s10p memiliki 15 slot dengan 158 lilitan. Hasil simulasi menunjukkan tegangan DC rata-rata pada PMSG 12s10p, dan 15s10p adalah masing-masing sebesar 256,138 V, dan 277,340 V. Konstansa Elektrik (*KE*), nilai *KE* untuk masing-masing variasi PMSG sebesar 2,53 (PMSG 12s10p), dan 2,64 (PMSG 15s10p). Perubahan jumlah lilitan dari setiap slot mengakibatkan perubahan besaran flux magnetic yang dihasilkan. Flux magnetic merupakan bagian dari flux linkage yang menghasilkan tegangan induksi untuk menentukan nilai *Back EMF* dan *KE*. Dengan dimensi PMSG yang tetap, variasi jumlah slot yang menghasilkan nilai *back EMF* dan *KE* yang paling optimal adalah PMSG 15s10p. Nilai optimal *back EMF* dan *KE* menghasilkan tegangan output generator yang lebih besar.

**Kata kunci:** generator; coil; slot; *back EMF*, *KE*

## Abstract

[**Title: Analysis of Changes in Number of Slots on Permanent Magnet Synchronous Generator (PMSG) to Achieving Optimal Value of Back EMF and KE Based on Finite Element Method (FEM)**] Generators can produce electricity under three conditions: a magnetic field, a coil, and a change in flux passing through the coil. The place to put the coil on the generator is called a slot. The number of slots can affect the characteristics of the generator. Changes in the number of slots affect *Back EMF* and *KE*. The simulation uses coiled wire with a diameter of 1 mm. PMSG 12s10p was designed in this research, and the slots were varied into 15s10p. The PMSG 12s10p has 12 slots with 188 coils, and the 15s10p has 15 slots with 158 coils. The simulation results show that the average DC voltage on PMSG 12s10p, and 15s10p is 256,138 V, and 277,340 V, respectively. Electrical constant (*KE*), the *KE* value for each PMSG variation is 2.53 (PMSG 12s10p), and 2.64 (PMSG 15s10p). Changes in the number of coils of each slot result in a change in the amount of magnetic flux produced. Magnetic flux is part of the flux linkage that produces an induced voltage to determine the *Back EMF* and *KE* values. With fixed PMSG dimensions, the variation in the number of slots that produces the most optimal *back EMF* and *KE* values is PMSG 15s10p. The optimal value of *back EMF* and *KE* results in a larger generator output voltage.

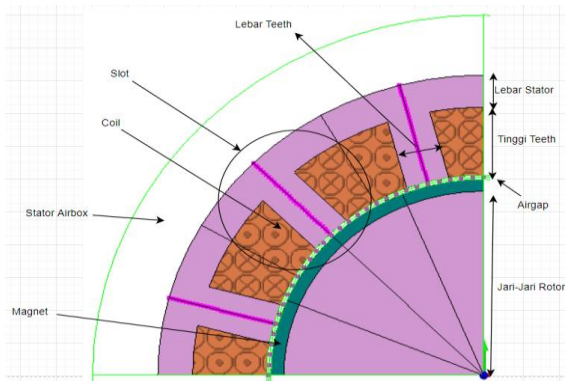
**Keywords:** generator; coil; slot; *back EMF*, *KE*

---

\*) Penulis Korespondensi.  
E-mail: subuhpramono@staff.uns.ac.id

## 1. Pendahuluan

Generator merupakan salah satu dari mesin listrik yang dapat mengubah energi mekanik menjadi energi



Gambar 1. Struktur PMSG

listrik dengan memanfaatkan prinsip elektromagnetik. Generator terdiri dari 3 bagian utama yaitu rotor, stator, dan celah udara (Azka, 2013). Rotor merupakan bagian yang berputar, stator merupakan bagian yang diam dan celah udara merupakan celah antara rotor dan stator (Sunarlik, 2017). Generator sinkron magnet permanen (PMSG) adalah generator yang menggunakan permanen magnet untuk menghasilkan flux magnetik, ditunjukkan pada Gambar 1. Generator ini memiliki efisiensi yang tinggi karena tidak terdapat rugi-rugi eksitasi dan biasanya digunakan dalam pembangkit alternative skala kecil misalnya *wind turbine* (Razi, 2019; Azka, 2013).

Bagian PMSG meliputi enam bagian (Irfan, 2021; Citrasa, 2022). Bagian pertama adalah rotor, rotor merupakan bagian PMSG yang berputar sekaligus sebagai tempat meletakkan permanen magnet. Bagian berikutnya adalah *permanent magnet*, bagian ini merupakan penghasil medan magnet yang diperlukan dalam pembangkitan tegangan generator. Bagian ketiga adalah stator. Stator merupakan bagian PMSG yang diam, pada stator terdapat beberapa slot untuk meletakkan lilitan/*coil*, stator terbuat dari bahan feromagnetik agar dapat menangkap fluks magnetik yang dihasilkan permanent magnet pada rotor dan mengalirkannya melalui lilitan/*coil* sehingga tercipta tegangan induksi (*back emf*). Stator berbentuk laminasi untuk mengurangi rugi arus eddy. Slot merupakan bagian keempat, slot merupakan bagian dari stator sebagai tempat meletakkan lilitan. Bagian kelima adalah *coil*, *coil* atau lilitan terbuat dari kawat tembaga yang dibuat kumparan pada setiap slot, berfungsi untuk menghasilkan dan menyalurkan tegangan induksi menuju beban. Bagian terakhir adalah *airgap*, bagian ini merupakan celah udara antara rotor dan stator.

Prinsip kerja PMSG mirip dengan generator sinkron hanya saja medan magnetnya dihasilkan oleh permanen magnet bukan dari kumparan eksitasi, jadi tidak terdapat rugi-rugi eksitasi. Konstruksi PMSG

berdasarkan arah aliran flux dibedakan menjadi dua tipe yaitu PMSG tipe Radial dan PMSG tipe Axial.

*Flux linkage* ( $\lambda$ ) adalah banyaknya *flux* magnetik yang melewati lilitan/*coil*, flux ( $\phi$ ) sendiri adalah banyaknya garis-garis gaya pada medan magnet. *Flux linkage* dapat direpresentasikan pada Persamaan 1. *Flux linkage* dapat menghasilkan tegangan induksi pada setiap kumparan, dapat dilihat pada persamaan 1 (Bagus, 2021; Chapman, 2012; Buana, 2022).

$$\lambda = N \cdot \phi \quad (1)$$

dimana  $\lambda$  merupakan *flux linkage* (wb), N adalah jumlah lilitan, dan  $\phi$  merupakan *flux*.

*Finite Element Method* atau FEM adalah sebuah metode komputasi dengan konsep memecah area hitungan tak terhingga menjadi luasan kecil-kecil yang disebut dengan mesh. Setiap luasan *mesh* akan dihitung parameter-parameter meliputi fluks, suhu, tegangan dll. Perangkat lunak berbasis FEM ini dapat digunakan untuk menganalisis kemampuan dan performa mesin elektromekanikal, seperti generator, motor, levitasi magnet, *transformer*, *induction heating*, dan lain-lain.

*Back EMF* adalah tegangan yang muncul akibat adanya perubahan fluks yang melewati kumparan persatuan waktu atau perubahan *flux linkage* persatuan waktu. *Back EMF* dapat direpresentasikan pada Persamaan 2 dan Persamaan 3 (Dintaariyadi, 2018; Citrasa, 2022).

$$\varepsilon = -N \frac{d\phi}{dt} \quad (2)$$

$$\varepsilon = \frac{d\lambda}{dt} \quad (3)$$

$\varepsilon$  merupakan Ggl Induksi (V), sedangkan  $d\lambda$  merupakan perubahan *flux linkage* (Wb).

Konstanta elektrik (KE) adalah konstanta yang dapat digunakan untuk mempermudah perhitungan nilai *back EMF* yang dihasilkan oleh generator pada suatu kecepatan tertentu. Konstanta elektrik didapat dari penjabaran hukum Faraday dan kaidah tangan kanan. Ini ditunjukkan pada Persamaan 4 sampai Persamaan 8 (Buana, 2022; Irfan, 2021)

$$\varepsilon = B \cdot l \cdot v \quad (4)$$

$$\varepsilon = B \cdot l \cdot R \cdot \omega \quad (5)$$

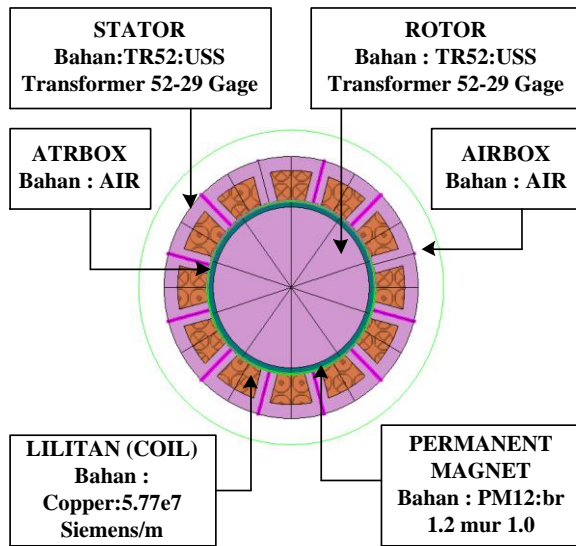
$$\varepsilon = B \cdot 2N \cdot R \cdot \omega \quad (6)$$

$$\varepsilon = K_e \cdot \omega_e \quad (7)$$

$$K_e = \frac{\varepsilon}{\omega_e} \quad (8)$$

dimana  $K_e$  merupakan konstanta elektrik (V.s/rad),  $\varepsilon$  merupakan nilai *Back EMF* (V), dan  $\omega$  merupakan kecepatan putar rad/s. Jadi fungsi  $K_e$  adalah untuk menyederhanakan perhitungan karena mewakili besarnya medan magnet (B), jumlah lilitan (N), dan jari-jari generator (m).

*Winding* adalah kegiatan menyatukan *coil-coil* pada generator agar menghasilkan listrik 3 fasa dengan daya yang maksimal. *Winding* bertujuan untuk



Gambar 2. Design PMSG dan material yang digunakan

menghubungkan setiap kumparan yang memiliki besar fasa sama atau saling berdekatan agar menghasilkan nilai *back EMF* yang maksimal. Konfigurasi yang dilakukan pada *winding* PMSG 12S10P ini adalah *concentrated winding Y-connection*, dimana pada satu fasa terdapat 4 kumparan yang disusun secara seri. *Concentrated winding* mempunyai keunggulan berupa rugi-rugi tembaga yang kecil disebabkan penggunaan konduktor yang lebih sedikit daripada jenis *distributed winding* (Arifianto, 2018).

Penelitian sebelumnya telah dilakukan (Albarohin, 2021). Penelitian ini hanya membahas pengaruh *winding* pada PMSG. Teknik *winding* 2 arah (CW dan CCW) menghasilkan kinerja PMSG yang lebih baik. Selanjutnya, penelitian (Soedjanaatmadja, 2019) menganalisis dampak perputaran rotor terhadap nilai *back EMF*. Pada penelitian-penelitian sebelumnya, dampak jumlah *slot* dan lilitan belum dibahas, maka penelitian ini menganalisis pengaruh perubahan jumlah *slot* dan lilitan terhadap nilai *back EMF* dan KE. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis perubahan jumlah *slot* dan lilitan pada PMSG untuk mendapatkan nilai *back EMF* dan KE yang optimal. Nilai *back EMF* dan KE yang optimal akan menghasilkan output *voltage* PMSG yang lebih tinggi.

Beberapa penelitian sebelumnya tentang PMSG dibandingkan dengan penelitian ini. Melalui penelitiannya, (Ramadhan, 2021) melakukan perancangan *permanent magnet synchronous generator* kapasitas 22 kva menggunakan metode *Finite Element Method*. Penelitian ini hanya membahas PMSG dengan

Tabel 1. Spesifikasi PMSG

	PMSG 12s10p	PMSG 15s10p
Jumlah Slot	12	15
Jumlah Pole	10	10
Dimensi (mm)	180x180x40	180x180x40
Lebar Teeth (mm)	5	5
Tinggi Teeth (mm)	17	17
Lebar Stator (mm)	8	8
Jari-jari Rotor (mm)	46	46
Tebal Magnet (mm)	3	3
Jumlah Lilitan	188	158
Koneksi Lilitan	Seri	Seri

12 slot 8 pole (12S8P) saja. Parameter yang dianalisis meliputi tegangan, arus, daya masukan, daya keluaran, torsi dan efisiensi generator. Selanjutnya, melalui penelitiannya, (Putri, 2022) melakukan analisis pengaruh material magnet permanent terhadap karakteristik generator sinkron radial 18 *slot* 16 *pole*. Kajian ini menginvestigasi pengaruh jenis material: *Ceramic Ferrite, Neodymium Iron Boron, Samarium cobalt* terhadap efisiensi pada PMSG 12 *slot* 8 *pole* (12S8P). Penelitian ini fokus pada topik analisis perubahan jumlah *slot* pada *permanent magnet synchronous generator* (PMSG) untuk mencapai nilai optimal *back EMF* dan KE berbasis *Finite Element Method (FEM)* dengan tujuan mencari nilai optimal *slot-pole* dengan variasi nilai 12s10p dan 15s10p.

## 2. Bahan dan Metode

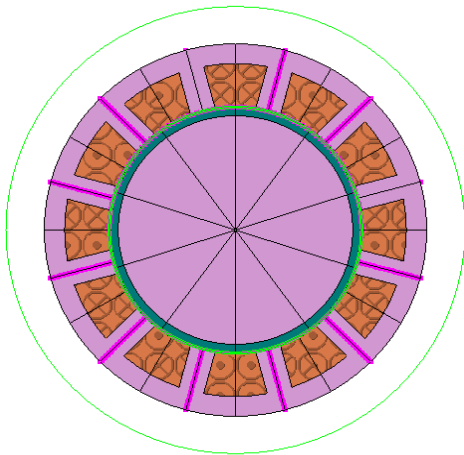
Penelitian ini menggunakan *software* berbasis *Finite Element Method* untuk merancang dan mensimulasikan model original PMSG 12S10P, kemudian jumlah *slot*nya divariasikan menjadi model PMSG 15S10P. Penambahan jumlah *slot* akan memperkecil ruang untuk lilitan, maka dari itu jumlah lilitan yang dapat ditampung *slot* di setiap variasi PMSG harus diperhitungkan. Agar didapatkan hasil yang jelas mengenai pengaruh penambahan *slot* pada PMSG maka selain parameter jumlah lilitan, semua parameter yang lain dibuat konstan. Adapun material dan spesifikasi PMSG yang akan dibuat ditunjukkan pada Gambar 2 dan Tabel 1.

Model PMSG 12S10P memiliki 12 *slot* lilitan di statornya dan 10 *pole* magnet di statornya. Selanjutnya adalah menghitung jarak *electrical* antar *coil* untuk menentukan konfigurasi *winding* agar mendapatkan *back EMF* yang maksimal, perhitungan jarak *electrical*, grafik fasa antar *coil* dan *winding* ditunjukkan pada Tabel 2, Gambar 3 dan Gambar 4.

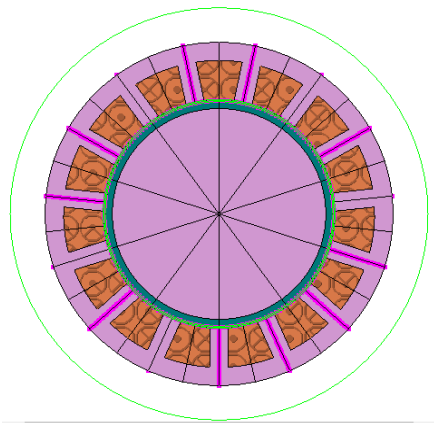
Model PMSG 15s10p merupakan variasi kedua dimana dilakukan penambahan *slot* menjadi 15 *slot* pada

Tabel 2. Perhitungan Jarak *Electrical* antar *Coil* PMSG 12s10p

Bagian	Jumlah	Satuan
Slot	12	
Pole	10	
Slot/degree	30	Deg mech
Pole/degree	36	Deg mech
Slot/degree	150	Deg E
Pole/degree	180	Deg E



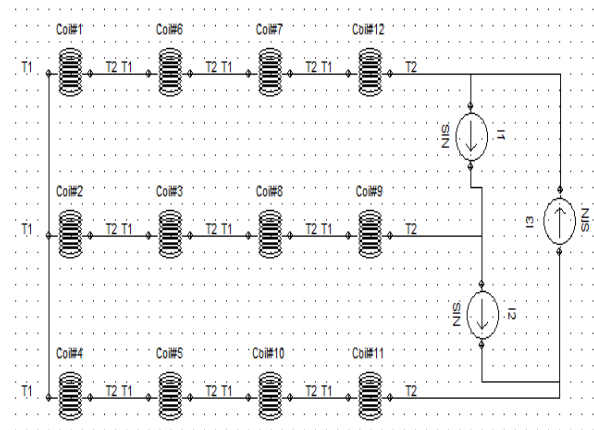
Gambar 3. Design PMSG 12s10p



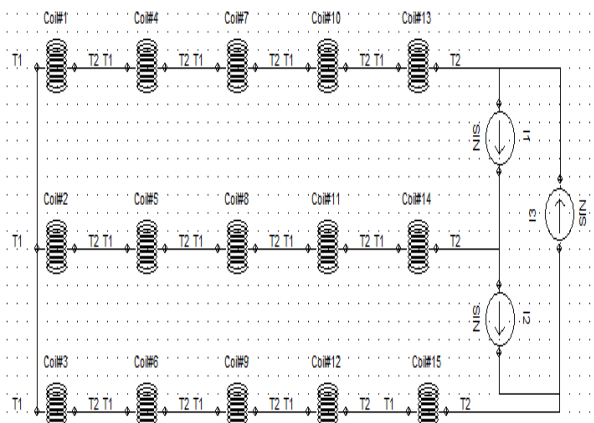
Gambar 5. Design PMSG 15s10p

Tabel 3. Perhitungan Jarak *Electrical* antar *Coil* PMSG 15s10p

Bagian	Jumlah	Satuan
Slot	15	
Pole	10	
Slot/degree	24	Deg mech
Pole/degree	36	Deg mech
Slot/degree	120	Deg E
Pole/degree	180	Deg E



Gambar 4. Winding PMSG 12s10p



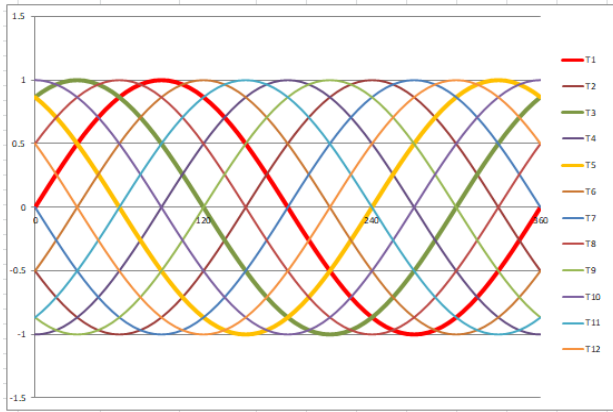
Gambar 6. Winding PMSG 15s10p

statornya, perhitungan jarak *electrical*, grafik fasa antar *coil* dan *winding* ditunjukkan pada Tabel 3, Gambar 5, dan Gambar 6.

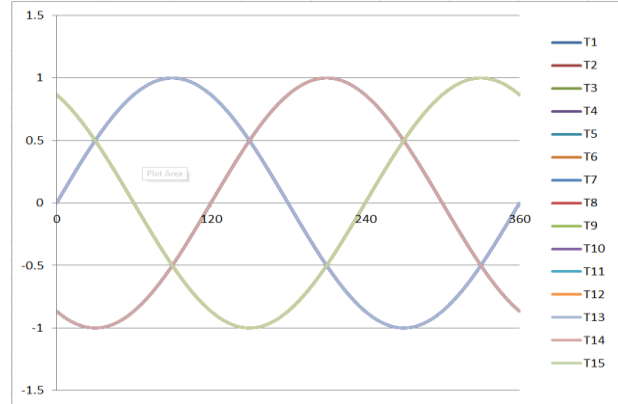
### 3. Hasil dan Pembahasan

Setelah didapatkan grafik fasa setiap *coil*, langkah berikutnya adalah pengelompokan *coil* atau fasa-fasa

tersebut agar didapatkan *output* 3 fasa dengan jarak *electrical* setiap fasa adalah 120°. Caranya pertama-tama cari 3 buah induk fasa yang berjarak 120°. Setelah didapatkan fasa induk langkah selanjutnya adalah mengelompokan *coil* (fasa) yang puncaknya berada paling dekat dengan fasa induk dan jika puncaknya berada berseberangan dengan puncak induk fasa terdekat



Gambar 7. Grafik fasa setiap coil PMSG 12s10p



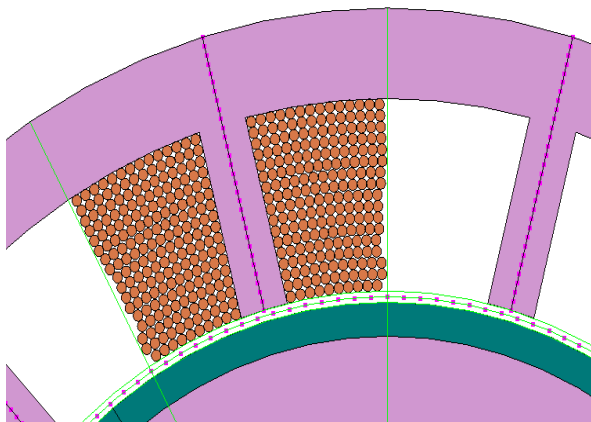
Gambar 8. Grafik fasa setiap coil PMSG 15s10p

Tabel 4. Pengelompokan Coil dan Arah lilitan PMSG 12s10p

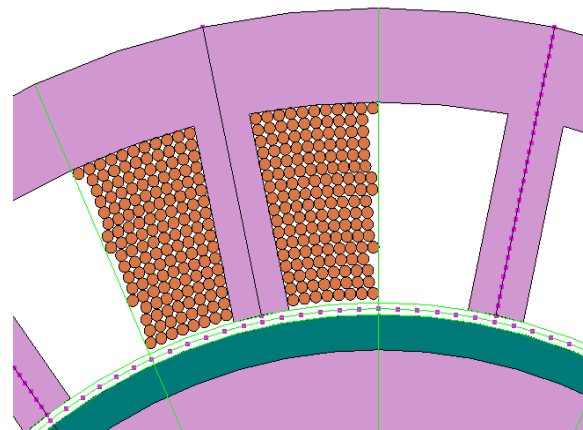
U	V	W
T1 CW	T3 CCW	T5 CW
T6 CW	T2 CW	T4 CCW
T7 CCW	T9 CW	T11 CCW
T12 CCW	T8 CCW	T10 CW

Tabel 5. Pengelompokan coil dan arah lilitan PMSG 15s10p

U	V	W
T1 CW	T2 CW	T3 CW
T4 CW	T5 CW	T6 CW
T7 CW	T8 CW	T9 CW
T10 CW	T11 CW	T12 CW
T13 CW	T14 CW	T15 CW



Gambar 9. Jumlah lilitan PMSG 12s10p

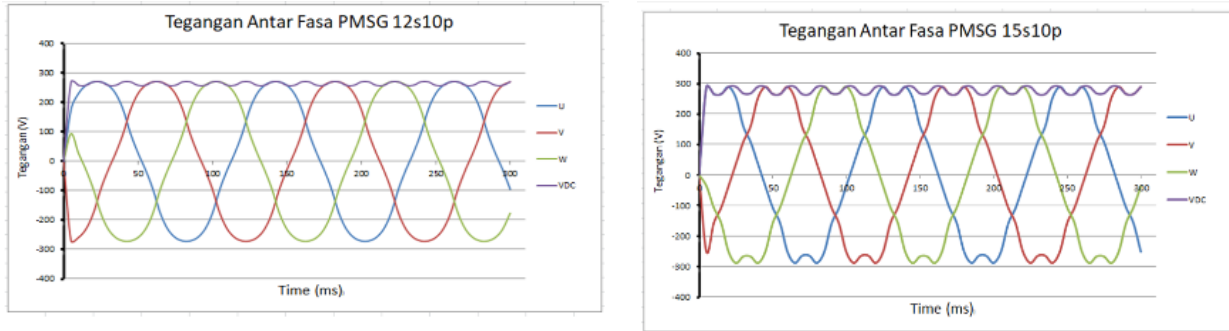


Gambar 10. Jumlah lilitan PMSG 15s10p

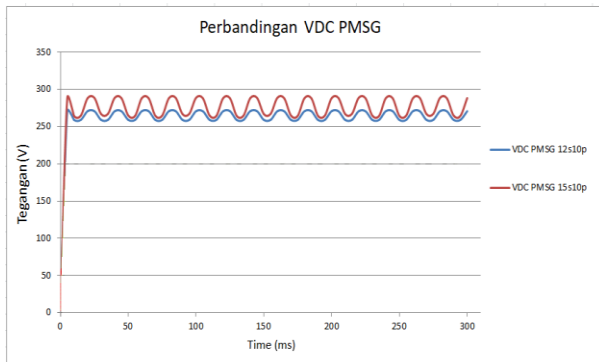
maka untuk membalikinya cukup dengan membalik arah lilitannya menjadi berlawanan arah jarum jam (*counter clockwise*) hal ini juga berlaku bagi fasa induk yang puncaknya terbalik maka perlu untuk membalik arah lilitannya, seperti pada PMSG 12s10p Induk fasanya adalah T1, T3 dan T5, puncak T3 ternyata terbalik maka T3 perlu dilit berlawanan arah jarum jam (*counter clockwise*). Pengelompokan coil dan arah lilitan PMSG 12s10p ditunjukkan pada Tabel 4, dan Gambar 4 menunjukkan *winding* pada *software* design berbasis

FEM. Serta fasa setiap coil PMSG 12s10p ditunjukkan pada Gambar 7.

Pada PMSG 15s10p, setiap kumparan mempunyai induk fasa yang sudah berjarak 120° jadi menggabungkannya sesuai urutan pada Tabel 5 dan untuk *winding* pada *software* design berbasis FEM ditunjukkan pada Gambar 6. Serta fasa setiap coil PMSG 12s10p ditunjukkan pada Gambar 8. Untuk mengetahui berapa banyak lilitan yang bisa ditampung pada slot di setiap variasi maka perlu dilakukan pemodelan dan perhitungan,



Gambar 11. Tegangan antar fasa dan tegangan DC PMSG



Gambar 12. Perbandingan VDC PMSG

Tabel 6. VDC Rata-rata dan KE

	VDC rata-rata	KE
PMSG 12s10p	256,138	2,53
PMSG 15s10p	277,340	2,64

V. Konstansi Elektrik (KE) didapatkan dari VDC rata-rata dibagi 104,667 rad/s (konversi 1000 rpm ke rad/s). Nilai KE untuk masing-masing variasi PMSG sebesar 2,53 (PMSG 12s10p), dan 2,64 (PMSG 15s10p). PMSG dengan 15s10p menghasilkan nilai back EMF dan KE yang paling optimal, nilai ini akan menghasilkan tegangan output generator yang paling besar.

diameter kawat yang digunakan adalah 1mm. Pemodelan lilitan dapat dilihat pada Gambar 9.

Dari Gambar 9 sampai Gambar 10 diketahui bahwa jumlah lilitan yang dapat ditampung masing-masing variasi PMSG adalah 188, dan 158. Setelah dilakukan *design* dan *setting* parameter, dilakukan pemutaran rotor dengan kecepatan 1000 rpm dan didapatkan hasil tegangannya antar fasa dan tegangan DC untuk masing-masing model seperti pada Gambar 11 dan Gambar 12. Tegangan DC diperoleh dari rumus nilai absolut maksimum tegangan antar fasa. Secara numerik, hasil simulasi nilai KE dan VDC rata rata ditampilkan pada Tabel 6.

#### 4. Kesimpulan

Penelitian ini menganalisis pengaruh jumlah slot dan lilitan terhadap nilai *back EMF* dan *KE*. Desain *Permanent Magnet Synchronous Generator* (PMSG) menggunakan kawat berdiameter 1mm sebagai lilitan, jumlah lilitan yang dapat ditampung oleh slot masing-masing variasi PMSG adalah sebanyak 188 lilitan untuk PMSG 12s10p, dan 158 lilitan untuk PMSG 15s10p. Tegangan DC rata-rata pada PMSG 12s10p, 15s10p adalah masing-masing sebesar 256,138 V, dan 277.340

#### Daftar Pustaka

- Azka, M., & Gunawan, R. (2013). Analisis Perancangan dan Simulasi Generator Sinkron Magnet Permanen dengan Rotor Berlubang. Skripsi, Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Indonesia.
- Razi, M. F. (2019). Simulasi Permanent Magnet Synchronous Generator 12 Slot 8 Pole dengan Variasi Lebar Teeth dan Jumlah Lilitan Terhadap Tegangan di PT. Lentera Bumi Nusantara. Jurusan Teknik Elektro, Politeknik Negeri Padang.
- Sunarlik, W. (2017). Prinsip Kerja Generator Sinkron. Prinsip Kerja Generator Sinkron, 6.
- Irfan, M., Erwin, & Wiyono, S. (2021). Perancangan Permanent Magnet Synchronous Generator Sultan Wind Turbine V-5. *Jurnal Ilmiah Rekayasa Dan Inovasi*, 3(2), 131-142. <https://doi.org/10.35814/asiimetrik.v3i2.2055>
- Citrassa, I. B. F., & Adnyani, I. A. S. (2022). Pengaruh Ketebalan Magnet Rotor terhadap Back EMF dan Efisiensi Permanent Magnet Synchronous Generator 12S8P. *Dielektrika*, 9(1), 11- 17. <https://doi.org/10.29303/dielektrika.v9i1.293>

- Bagus, W.C., & Bambang, W. (2021). Simulasi Perubahan Tegangan Keluaran Permanent Magnet Synchronous Generator (PMSG) 12s8p Terhadap Variasi Kecepatan Putar Rotor dengan Software Berbasis Finite Element Method (FEM). Departemen Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro.
- Dintaariyadi, V. L. (2018). Analisa Desain Coggingless pada Generator Sinkron Permanen Magnet Menggunakan Software Magnet. Universitas Islam Sultan Agung.
- Chapman, J. S. (2012). *Electric Machinery Fundamental*. McGraw-Hill, New York.
- Arifianto, I., & Rangga, M.H.S. (2018). Analisa Efisiensi dan Rancang Generator Permanent Magnet 12 Slot 8 Pole Menggunakan Software Magnet 7.5. *Seminar Nasional Microwave, Antena dan Propagasi (SMAP)*.
- Buana, U. C., & Santosa, D. B. (2022). Analisis Pengaruh Lebar Teeth Terhadap Penurunan Nilai Cogging Torque pada PMSG 18S16P. *Electrician*, 16 (1), 1-8. <https://doi.org/10.23960/elc.v16n1.2245>
- Albarohin, I. A., & Latifa, U. (2021). Analisa Pengaruh Perbedaan Winding terhadap Back EMF dan Ke pada PMSG 18s16p. *CIRCUIT: Jurnal Ilmiah Pendidikan Teknik Elektro*, 5 (2), 189-200. <http://dx.doi.org/10.22373/crc.v5i2.9401>
- Soedjanaatmadja, A. M., Puspanegara, F. C. A., Hardiansyah, Z., Nainggolan, B., & Jannus, M. (2019). Pengaruh Kecepatan Putar Terhadap Back emf Pada Permanent Magnet Synchronous Generator. *Prosiding Seminar Nasional Teknik Mesin Politeknik Negeri Jakarta*.
- Ramadhan, A., & Tamam, M. T. (2021). Perancangan Permanent Magnet Synchronous Generator Kapasitas 22 KVA Menggunakan Metode Finite Element Method. *Jurnal Riset Rekayasa Elektro*, 3(2), 83-90. 10.30595/jrre.v3i2.11516
- Putri, T. D., & Liliana. (2022). Analisis Pengaruh Karakteristik Generator Sinkron Radial 18 Slot 16 Pole. *Jurnal Power Elektronik*, 11 (1), 45-50. <http://dx.doi.org/10.30591/polekro.v11i1>