

BAB II

LANDASAN TEORI

2.1 Generator

Generator merupakan mesin yang berfungsi untuk menghasilkan energi listrik dengan cara mengubah energi mekanik menjadi energi listrik, tenaga mekanik tersebut dapat bersumber dari panas uap, air, angin dan gelombang laut. Energi listrik yang dihasilkan generator dapat berupa listrik bolak-balik (AC) maupun listrik searah (DC) (Sunarlik, n.d.). Generator bekerja berdasarkan hukum Faraday yaitu apabila suatu penghantar diputar dalam sebuah medan magnet sehingga memotong garis-garis gaya magnet maka pada ujung penghantar tersebut akan timbul garis gaya listrik (GGL).

Pada generator dibagi menjadi generator AC yang pada *output* nya langsung didapatkan sementara, lalu generator DC memerlukan komutator untuk menyearahkan *output*. Perbedaan prinsip antara generator DC dengan generator AC adalah letak kumparan jangkar dan kumparan statornya. Pada generator DC kumparan jangkar terletak pada bagian rotor sementara kumparan medan terletak pada bagian stator. Sedangkan pada generator AC kumparan jangkar terletak pada bagian stator dan kumparan medan terletak pada bagian rotor.

Generator sinkron atau disebut sebagai alternator adalah generator yang membangkitkan tegangan listrik, frekuensi didapat melalui perkalian antara jumlah kutub dengan putaran dari generator, singkatnya kecepatan putaran medan magnet yang terjadi sama dengan kecepatan putaran rotor. Sedangkan untuk generator asinkron adalah generator dengan frekuensi yang dihasilkan bukan dari hasil perkalian antara jumlah kecepatan perputaran dan jumlah kutub.

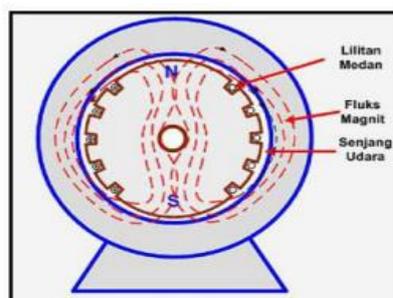
Bagian dari sebuah generator ada rotor yaitu tempat untuk diamnya magnet, lalu bagian yang berputar pada sumbu rotor yang berfungsi membangkitkan medan magnet sebuah tegangan lalu disalurkan ke stator. Jenis kutub medan magnet rotor terdiri yaitu:

a. Jenis Kutub Menonjol (*Silent Pole*)

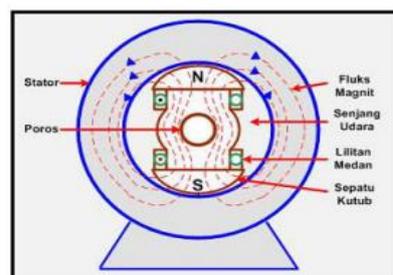
Pada jenis ini kutub magnet menonjol keluar dari permukaan rotor, ketika belitan medan disuplai maka kutub yang berdekatan akan membentuk kutub secara berlawanan.

b. Jenis Kutub Silindris (*Non Silent Pole*)

Jenis kutub ini dapat digerakan oleh turbin yang memakai hidrolis. Pada gambar 2.1 ada dua bentuk rotor untuk medan rotor yang digunakan dalam kecepatan tinggi biasanya memakai rotor bentuk silinder lalu untuk mesin dengan kecepatan rendah seperti generator listrik diesel biasanya menggunakan rotor kutub menonjol.



(a)

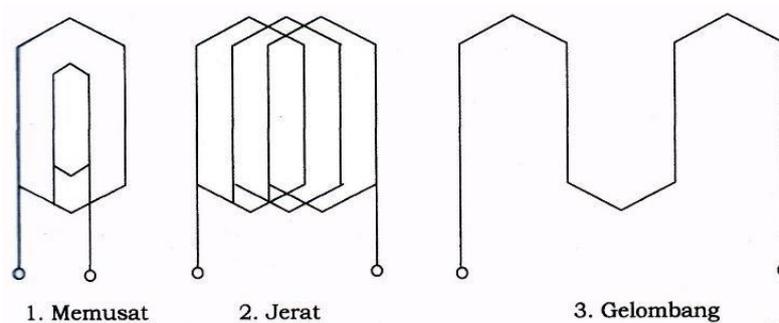


(b)

Gambar 2.1 (a) Bentuk Rotor Kutub Menonjol (b) Bentuk Rotor Silindris (Sunarlik, n.d.).

Stator yaitu tempat menerima induksi magnet dari rotor. Stator terdapat beberapa slot untuk tempat melilitnya kawat. Stator ini terdiri dari plat-plat besi yang disusun sama besarnya dengan rotor lalu akan menyebabkan fluks medan putar yang mengakibatkan rotor berputar karena adanya induksi magnetik.

Tegangan terbangkit, salah satunya bergantung pada banyak jumlah lilitan yang ada pada kumparan, kumparan stator generator dapat dililit dengan tiga metode antara lain secara terpusat (*concentric winding*), secara gelombang (*wave winding*), dan secara jerat atau bertumpuk (*lap winding atau spiral*). Umumnya metode lilitan spiral digunakan pada generator dengan kapasitas besar, sedangkan untuk lilitan terpusat umumnya digunakan pada generator dengan kapasitas kecil dan lilitan gelombang umumnya digunakan pada motor dengan kapasitas besar.



Gambar 2.2 Jenis Lilitan Kumparan (Dinamo, 2015).

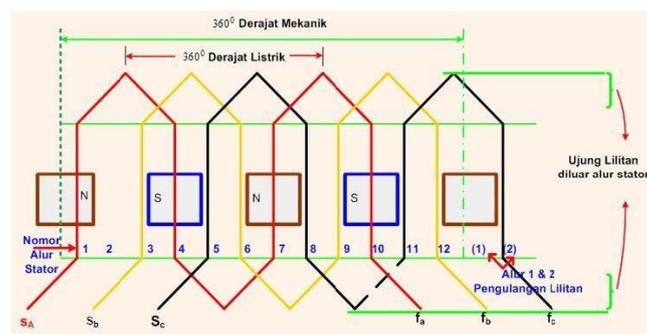
Kumparan Sepusat (konsentris) umumnya digunakan untuk motor atau generator dengan kapasitas daya relative kecil walaupun ada juga secara khusus motor-motor berkapasitas kecil menggunakan kumparan jenis spiral. Kumparan Jerat banyak digunakan untuk motor atau generator dengan kapasitas daya yang relative besar. Umumnya dari menengah keatas walaupun ada secara khusus mesin berkapasitas relative besar kumparan statornya menggunakan tipe konsentris (sepusat). Kumparan

gelombang/wave winding untuk motor dengan belitan sistem ini banyak digunakan kapasitor besar

Ada dua jenis belitan jangkar stator yang umum digunakan oleh mesin sinkron tiga fasa yaitu:

a. Belitan Satu Lapis (*Single Layer Winding*)

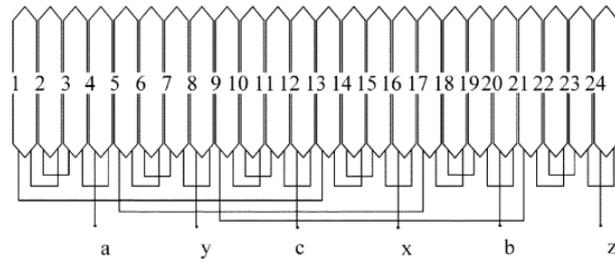
Belitan ini mempunyai satu lapis dan satu lilitan tiap masing-masing alur. Jarak antar kumparan fasa biasanya 120° listrik dan 60° mekanik dengan satu siklus gaya gerak listrik (GGL) penuh apabila rotor dengan 4 kutub berputar 180° mekanik maka satu siklus gaya gerak listrik (GGL) yaitu 360° listrik. Dimana pada gambar 2.3 ditunjukkan hubungan antara S dan F. Pada kumparan tiga fasa hubungan dimulai pada S_a , S_b , dan S_c dan berakhir di F_a , F_b , dan F_c yang disatukan dengan hubungan segitiga dan bintang.



Gambar 2.3 Belitan Satu Lapis (Politeknik Negeri Sriwijaya, 2016).

b. Belitan Berlapis Ganda (*Double Layer Ganda*)

Kumparan jangkar mempunyai satu lilitan tiap fasa pada masing-masing kumparan akibatnya pada tiap kumparan hanya ada dua lilitan secara seri. Gambar 2.4 adalah sebuah kumparan yang lilitannya *double* biasanya terdapat pada generator tiga fasa. Pada setiap alur lilitan terdapat dua sisi lilitan yang mempunyai satu putaran lebih.



Gambar 2.4 Belitan Berlapis Ganda (Niu et al., 2008).

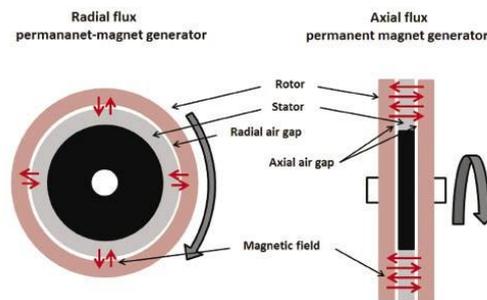
2.2 Permanen Magnet Synchronous Generator

Permanent Magnet Synchronous Generator (PMSG) sebuah generator yang menggunakan sebuah magnet permanen yang dipasang pada rotor yang nantinya akan berputar mengelilingi kumparan stator, lalu menghasilkan sebuah gaya gerak listrik (GGL) induksi dari proses tersebut dapat menghasilkan sebuah energi listrik tanpa adanya rugi-rugi eksitasi. Makna sinkron atau *synchronous* pada *Permanent Magnet Synchronous Generator* (PMSG) yaitu sebuah frekuensi listrik yang dihasilkannya sinkron dengan putaran mekanis generator tersebut. Stator dan rotor berputar dengan sinkron, akibatnya fluks yang dihasilkan tidak dibangkitkan secara bersamaan.

Perbedaan dengan generator sinkron magnet permanen dengan generator yang biasa yaitu pada pada magnet yang menggunakan sebuah magnet permanen untuk penguatannya bukan menggunakan sebuah kumparan. Magnet permanen pada rotor akan berputar, lalu stator yang diposisi diam menghasilkan sebuah gaya gerak listrik (GGL) sehingga akan menghasilkan listrik tanpa penguatan. Kelebihan dari *Permanent Magnet Synchronous Generator* (PMSG) yaitu:

- a. Desain konstruksi yang sederhana.
- b. Umur generator yang lebih lama.
- c. Tidak membutuhkan sumber listrik DC untuk membangkitkan magnet.

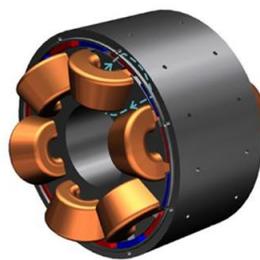
Permanent Magnet Synchronous Generator (PMSG) sebuah generator yang mempunyai dua arah fluks radial maupun fluks axial (MAGNETIC INNOVATIONS, 2021).



Gambar 2.5 Struktur Generator Fluks Radial dan Axial (UGM, 2014).

a. Fluks Radial

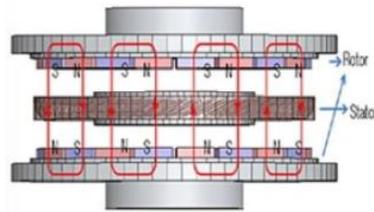
Generator pada fluks radial memiliki arah fluks radial yang sumbu putarnya yang searah dengan arah putar rotor karena fluks magnet yang melingkari kumparan. Gambar 2.6 sebuah generator sinkron dengan fluks radial yang dapat beroperasi di putaran rendah dan tinggi.



Gambar 2.6 Generator Fluks Radial (MAGNETIC INNOVATIONS, 2021).

b. Fluks Axial

Generator magnet permanen fluks axial adalah sebuah generator magnet permanen yang arah medan fluks sejajar dengan putarannya. Jadi untuk fluks tersebut merupakan hasil dari gaya tarik menarik dari dua buah magnet yang berbeda kutub.



Gambar 2.7 Kontruksi Generator Fluks Axial (UGM, 2014).

2.2.1 Prinsip Kerja Permanen Magnet Synchronous Generator

“Setiap perubahan medan magnet pada kumparan akan menyebabkan gaya gerak listrik (GGL) induksi yang sebanding dengan laju perubahan fluks”. Ketika sebuah magnet yang terdapat pada rotor di putar pada kecepatan yang konstan maka kumparan akan terinduksi tegangan begitupun dengan kumparan yang diputar konstan maka medan magnet akan terinduksi tegangan.

Tegangan akan diinduksikan pada konduktor apabila konduktor tersebut bergerak pada sebuah medan magnet sehingga memotong garis gaya magnet. Sedangkan prinsip kerja menurut hukum lenz ketika arus listrik pada stator akan menimbulkan momen elektromagnetik bersifat melawan putaran rotor akan menimbulkan EMF (*electromotive force*) lalu menghasilkan arus jangkar.

Hubungan antara putaran medan magnet pada mesin dengan frekuensi elektrik pada stator dapat dihitung dengan menggunakan persamaan 2.1.

$$f = \frac{Ns.P}{120} \quad (2.1)$$

Keterangan:

f : Frekuensi listrik (Hz)

N_s : Kecepatan putar rotor (rpm)

P : Jumlah kutub magnet

2.2.2 Stator Permanen Magnet Synchronous Generator



Gambar 2.8 Stator Generator Sinkron (Ramdhany et al., 2021).

Stator yaitu bagian dari generator sebagai komponen untuk menerima fluks magnet dari bagian rotor yang didalamnya ada sebuah magnet permanen, lalu sebagai komponen untuk menghasilkan dan mengalirkan arus listrik yang menuju ke beban, stator memiliki lilitan kawat konduktor yang banyak. Kumbaran ini biasanya dibuat dari bahan kawat tembaga maupun alumuniun. Untuk menentukan kumbaran dengan persamaan 2.2.

$$N_s = p \frac{N_{ph}}{2} \quad (2.2)$$

Keterangan:

N_s : Jumlah Kumbaran

P : Jumlah Kutub

N_{ph} : Jumlah Fasa

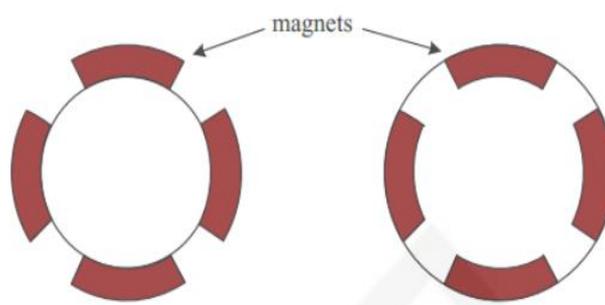
2.2.3 Rotor Permanen Magnet Synchronous Generator

Rotor adalah bagian yang berputar di generator sinkron, rotor ini untuk menyimpan sebuah magnet permanen. Kecepatan sebuah rotor akan mempengaruhi fluks magnet ataupun frekuensi karena terdapat jumlah kutub magnet yang akan mempengaruhi banyak putaran yang harus bekerja untuk menghasilkan sebuah fluks magnet atau frekuensi. Bahan magnet neodymium bisa membuat pergerakan atau perputarannya menjadi lebih cepat (rotor mengelilingi stator) atau *inrunners* (stator yang mengelilingi rotor) (Harjono & Widodo, 2021)

Pada gambar 2.10 ada dua model peletakan magnet permanen yaitu magnet yang ditempatkan di permukaan rotor (*Surface Mounted Permanent Magnet*) dan magnet permanen yang ditempatkan di bagian dalam rotor (*Interior Permanent Magnet*).



Gambar 2.9 Rotor Generator Sinkron Fluks Radial.



Gambar 2.10 Magnet Permanen Yang Ditempatkan Dibagian Luar Rotor (*Surface Mounted Permanent Magnet*) dan Magnet Permanen Yang Ditempatkan Dibagian Dalam Rotor (*Interior Permanent Magnet*) (Suparyanto dan Rosad, 2020).

2.2.4 Celah Udara Permanen Magnet Synchronous Generator

Celah udara berada diantara stator dan rotor dengan adanya celah udara ini medan magnet yang ada pada rotor bisa menembus kumparan stator, selain itu juga celah udara ini berfungsi ketika rotor berputar magnet tidak akan bergesekan dengan stator. Celah udara ini bertujuan untuk membatasi kumparan kutub magnet dan mengurangi arus hubung singkat, namun untuk menghindari gesekan-gesekan antar komponen generator dibutuhkan celah udara yang longgar. Semakin besar generator semakin besar celah udaranya, celah udara ini terdapat gaya gerak magnet (*magnetomotive force*) dari stator yang membuat rotor menjadi berputar sesuai dengan polaritasnya.

2.2.5 Kecepatan Putar

Kecepatan putar pada generator berdasarkan frekuensi yaitu 50 Hz sesuai dengan SNI 04-3892 dan pada PUIL 2011 standar frekuensi di Indonesia. Jumlah kutub yang diinginkan kecepatan putar dibagi menjadi tiga bagian yaitu:

1) Kecepatan tinggi

Generator dengan kecepatan tinggi digunakan pada generator yang memiliki jumlah kutub sebanyak 2 buah dengan kecepatan rotor 3.000 putaran per menit.

2) Kecepatan sedang

Generator dengan kecepatan sedang digunakan pada generator yang memiliki jumlah kutub berkisar sebanyak 4–10 dengan kecepatan rotor 1.500-600 *rpm*.

3) Kecepatan rendah

Generator dengan kecepatan rendah digunakan pada generator yang memiliki jumlah kutub sebanyak 12-80 buah dengan kecepatan rotor berkisar 500-75 rpm.

Tabel 2.1 Kecepatan putar dan jumlah kutub (Wardoyo et al., 2011).

P	Kecepatan pada Frekuensi (rpm)			P	Kecepatan pada Frekuensi (rpm)		
	25 Hz	50 Hz	60 Hz		25 Hz	50 Hz	60 Hz
2	1500	3000	3600	28	112	214	257
4	750	1500	1800	32	94	118	225
6	500	1000	1200	36	83.5	167	200
8	375	750	900	40	75	150	180
10	300	600	720	48	62.5	125	150
12	250	500	600	56	53.5	107	125
16	187.5	375	450	64	47	94	112.5
20	150	300	360	71	41.5	83	100
24	250	250	300	80	37.5	75	90

2.3 Hukum-Hukum Generator

Hukum disini adalah hukum atau sebuah aturan yang berkaitan dengan generator.

2.3.1 Hukum Faraday

“Setiap perubahan medan magnet pada kumparan akan menyebabkan gaya gerak listrik (GGL) induksi yang sebanding dengan laju perubahan fluks”. Jadi menurut hukum faraday saat sebuah medan magnet memotong suatu pada kumparan maka menghasilkan tegangan begitupun sebaliknya ketika medan magnet dipotong oleh kumparan. Hukum Faraday mempunyai rumus dengan sesuai persamaan 2.3.

$$E_{in} = -N \frac{d\Phi}{dt} \quad (2.3)$$

Keterangan:

E_{in} : Tegangan Induksi (Volt)

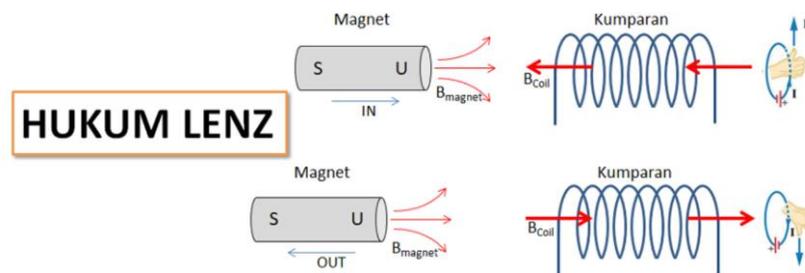
N : Jumlah Lilitan

$d\Phi$: Perubahan Fluks Magnetik (Wb)

dt : Perubahan Waktu (detik)

2.3.2 Hukum Lenz

“Arus induksi memiliki arah sedemikian rupa sehingga medan magnet mengakibatkan arus akan menentang perubahan fluks magnet yang menginduksi arus”. Pada gambar 2.11 medan magnet akan memotong sebuah kumparan lalu menghasilkan tegangan induksi di ujung kawat konduktor. Arus induksi akan muncul berlawanan arah dengan perubahan fluks yang akan menyebabkan arus induksi mengalir akan menghasilkan medan magnet yang berlawanan arah, tetapi pada hukum faraday tidak menjelaskan akan arah induksi ini. Jadi pada awal rumus hukum faraday yaitu menandakan tanda negatif yaitu gaya gerak listrik (GGL).



Gambar 2.11 Prinsip Hukum Lenz (Dickson Kho, 2023).

2.3.3 Fluks Magnet

Sebuah jumlah garis gaya yang menembus permukaan dengan luas tertentu dapat berbeda, tergantung dari kuat dan sudut medan magnet. Fluks magnetik dilambangkan (ϕ) dengan satuan Wb (Weber).

Saat ini magnet permanen merupakan magnet yang banyak digunakan pada generator karena memiliki keunggulan dari segi efisiensi, yaitu tidak memiliki rugi-rugi pada sistem eksitasi. Magnet permanen NdFeB memiliki arah fluks dari kutub utara ke kutub selatan dan pada saat kutub yang sama didekatkan maka akan timbul gaya tolak menolak dari masing-masing magnet, agar mengetahui besaran fluks yang ada maka digunakan persamaan sebagai berikut (Pramono et al., 2017).

$$\Phi = \vec{B} \cdot \vec{A} \quad (2.4)$$

Keterangan :

Φ : Fluks magnet (Weber)

\vec{B} : Medan magnet (Wb/m^2)

\vec{A} : Luas bidang (m^2)

a. Rumus mencari nilai keliling rotor

$$Kr = \pi \cdot dr \quad (2.5)$$

Keterangan :

Kr : Keliling rotor

π : Keliling lingkaran

dr : Diameter rotor

b. Rumus mencari keliling rotor yang termagnetisasi

$$Kr\% = \frac{\pi dr - df Ndf}{\pi dr} \times 100\% \quad (2.6)$$

Keterangan :

Kri : Keliling rotor termagnetisasi (%)

Kr : Keliling rotor

dr : Diameter rotor

df : Jarak antar magnet

Ndf : Jumlah jarak antar magnet

a. Rumus mencari luas kutub magnet

$$Am = (pm \cdot wm)^2 \cdot Kri\% \quad (2.7)$$

Keterangan :

Am : Luas permukaan magnet (m^2)

Pm : Panjang magnet (m)

Wm : Lebar magnet (m)

Kri : Keliling rotor termagnetisasi (%)

b. Rumus medan magnet maksimum

$$B_{maks} = Br \frac{lm}{lm + \delta} \quad (2.8)$$

Keterangan :

B_{maks} : Medan magnet maksimal (T)

Br : Medan magnet relatif (T)

L_m : Tinggi magnet (m)

δ : Panjang celah udara (m)

c. Rumus mencari fluks magnet

$$\Phi = B_{maks} \cdot Am \quad (2.9)$$

Keterangan :

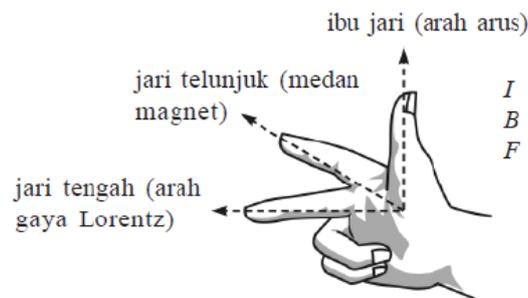
Φ : Fluks magnet (Wb(=))

Am : Luas permukaan magnet (m^2)

B_{maks} : Kerapatan fluks maksimum magnet (T)

2.3.4 Kaidah Tangan Kanan

Kaidah tangan kanan atau *fleming* adalah aturan menggunakan tangan kanan untuk membantu menentukan arah gaya dan medan magnet berdasarkan arus listriknya. Untuk menentukan arah vektor dari tiga komponen hukum Faraday yaitu gaya gerak listrik, medan magnet dan arus listrik (Di et al., 1945).



Gambar 2.12 Kaidah Tangan Kanan (Kelas Teknisi, 2023).

2.3.5 Hukum Ohm

Hukum Ohm menyatakan bahwa besar arus listrik yang mengalir pada penghantar akan berbanding lurus dengan sebuah tegangan yang yang dialirkan, besarnya arus yang mengalir tidak akan meningkat karena terdapat nilai resistansi pada suatu penghantar. Hukum Ohm dijelaskan menggunakan persamaan 2.11.

$$V = I \cdot R \quad (2.11)$$

Keterangan:

V : Tegangan (V)

I : Arus (A)

R : Resistansi (Ohm)

2.4 Karakteristik Generator PMSG

Parameter digunakan untuk mengetahui karakteristik generator sinkron pada tahanan jangkar dan reaktansi sinkron. Nilai tahan jangkar dapat diukur ketika mesin keadaan mati dan ukur arus yang mengalir pada kumparan jangkar.

Tegangan pada generator sinkron akan dibangkitkan melalui kumparan nantinya tegangan yang dihasilkan tidak akan sama dengan pada terminal generator. Tegangan induksi akan dianggap sama jika ada arus yang mengalir pada kumparan, karena disebabkan beberapa faktor yang terjadi.

$$V_{\phi} = e_a - jXI_a - R_a I_a \quad (2.12)$$

Keterangan:

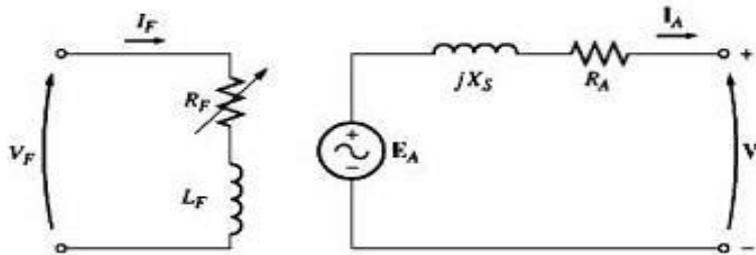
V_{ϕ} : tegangan terminal (V)

e_a : tegangan terbangkit (V)

jX : reaktansi kumparan (Ω)

R_a : tahanan kumparan (Ω)

I_a : arus jangkar (A)



Gambar 2.13 Rangkaian Ekuivalen Generator Sinkron (Armansyah, 2016)

Pada gambar 2.13 adalah rangkaian ekuivalen digunakan untuk parameter dari karakteristik generator sinkron.

2.5 Parameter Genertor Sinkron

Sebuah variabel yang terkandung dalam konsep pembangkitan energi listrik.

2.5.1 Torsi Generator

Untuk mencari torsi dapat menggunakan persamaan 2.13.

$$\omega = \frac{n \cdot 2 \cdot \pi}{60}$$

$$K = \frac{V_{ac}}{\omega}, \text{dimana } Kt = Ke \quad (2.13)$$

$$T = Kt \cdot I$$

2.5.2 Arus Generator

Untuk mencari arus dapat menggunakan persamaan 2.14.

$$I = S \cdot E_{rms} \quad (2.14)$$

Keterangan :

I : Arus (Ampere)

S : Daya semu (VA)

E_{rms} : Tegangan (Volt)

2.5.3 Frekuensi

Hubungan kecepatan putar dan frekuensi generator dapat dihitung dengan sebuah persamaan 2.16.

$$N = \frac{120 \cdot f}{p} \quad (2.16)$$

Keterangan :

N : Putaran (Rpm)

f : Frekuensi (Hz)

p : Jumlah kutub magnet

2.5.4 Efisiensi

Untuk mencari efisiensi dapat menggunakan persamaan 2.17.

$$n = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100\% \quad (2.17)$$

Keterangan :

n : Efisiensi

P_{out} : Daya *output* (Watt)

P_{in} : Daya *input* (Watt)

2.5.5 Daya Listrik

Dalam mencapai nilai efisiensi maka perlu perhitungan besar daya listrik yang dihasilkan oleh sebuah generator menggunakan persamaan 2.18.

$$P = D^2 L (0.5\pi^2) K_w N_s B_g ac \cos\theta \quad (2.18)$$

Keterangan:

D : Diameter dalam stator (M)

L : Tebal stator (M)

P : Daya (Watt)

K_w : Faktor lilitan

N_s : Kecepatan putar rotor (Rps)

B_g : Kerapatan medan magnet pada air gap (T)

ac : Kuat medan magnet (A/m)

2.5.6 Penentuan Jumlah Lilitan

$$N_c = \frac{E_{rms}}{4,44 \cdot f \cdot \Phi \cdot \frac{N_s}{N_{ph}}} \quad (2.19)$$

Keterangan:

E_{rms} : Tegangan (Volt)

F : Frekuensi (Hz)

Φ : Fluks magnet

N_s : Jumlah magnet

N_{ph} : Jumlah fasa

2.5.7 Daya Semu Generator

Untuk mencari daya semu dapat dihitung menggunakan persamaan 2.20.

$$S = V \cdot I \quad (2.20)$$

Keterangan :

S : Daya semu (VA)

V : Tegangan (Volt)

I : Arus (Ampere)

2.5.8 Daya Masukan

Untuk mencari daya aktif atau daya output dapat dihitung menggunakan persamaan 2.21.

$$P_{in} = V_{AC \text{ no load}} \cdot I_{AC \text{ load}} \quad (2.21)$$

Keterangan :

$V_{AC \text{ no Load}}$: Tegangan tidak berbeban (Volt)

$I_{AC \text{ load}}$: Arus berbeban (A)

2.5.9 Daya Keluaran

$$P_{out} = VAC\ load \cdot IAC\ load \quad (2.22)$$

Keterangan :

VAC Load : Tegangan berbeban (Volt)

IAC load : Arus berbeban (A)

2.5.10 Regulasi Tegangan

$$V_{reg} = \frac{VAC\ no\ load - VAC\ load}{VAC\ load} \times 100\% \quad (2.23)$$

Keterangan :

VAC no Load : Tegangan tidak berbeban (Volt)

VAC load : Tegangan berbeban (Volt)

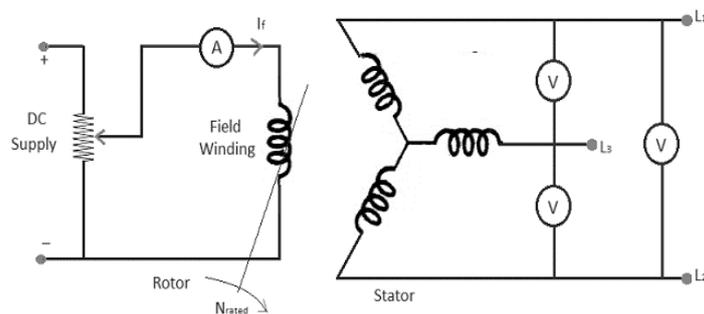
2.6 Pengujian Karakteristik Generator

Pengujian karakteristik generator dengan menghubungkan generator menggunakan *v-belt* yang diputar dengan motor induksi tiga fasa diatur kecepatan putar *prime mover* menggunakan VSD (*Variable Speed Drive*) dengan pengujian *open circuit*, *short circuit* dan *full load*.

2.6.1 Pengujian Open Circuit

Pada saat generator dijalankan dengan kecepatan yang stabil pada terminal beban akan terbuka, jadi semua beban tersebut akan terputus lalu arus medan akan bernilai nol. Pengujian menggunakan cara generator diputar hingga pada kecepatan nominal dan menginjeksi arus eksitasi mulai dari nol sampai tegangan terminal mencapai tegangan

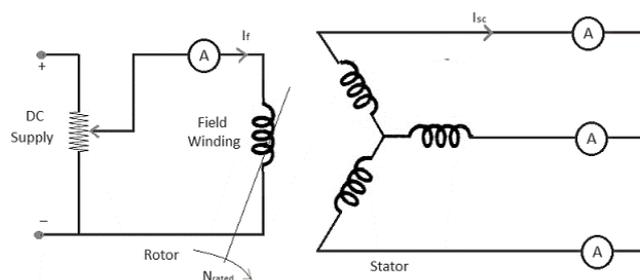
nominalnya lalu pasang alat pengukur tegangan yaitu menggunakan avometer ataupun *power quality analyzer* dipasang pada terminal generator. Pada pengujian ini generator pada saat keadaan tidak berbeban, pada saat kecepatan putar dinaikan maka komponen magnetik akan berpengaruh yaitu pada resistansi celah udara pada lilitan stator akan ada sebuah tegangan yang naik secara linier/*air gap line*. Jika arus eksitasi terus naik karena sirkuit magnetik sudah jenuh nantinya akan terjadi tegangan terinduksi yang tidak akan naik secara linier lagi (Rimbawati et al., 2019).



Gambar 2.14 Rangkaian open circuit (Rimbawati et al., 2019).

2.6.2 Pengujian Short Circuit

Pengujian ini menggunakan rangkaian *short circuit* yang dapat mempresentasikan arus stator. Terminal pada tiap fasa pada generator dihubungkan pada saat generator lalu pasang alat ukur pada terminal yaitu memakai avometer atau tang ampere, setelah itu generator diputar dengan kecepatan yang sudah ditentukan (Rimbawati et al., 2019).



Gambar 2.15 Rangkaian Short Circuit (Rimbawati et al., 2019)

2.6.3 Pengujian Full Load

Pengujian berbeban merupakan pengujian untuk mengetahui performa dari generator ketika diberikan sebuah beban. Pengujian bisa menggunakan lampu ataupun dengan pengujian elektrolisis yaitu menggunakan sebuah larutan garam. Lalu nantinya akan mendapatkan arus dan tegangan ketika generator sedang diberikan sebuah beban.

2.7 Bahan Lilitan Kumparan

Bahan lilitan biasanya menggunakan sebuah kawat yang merupakan konduktor yang berfungsi untuk menghantarkan arus listrik. Tembaga dan alumunium merupakan bahan yang sering digunakan untuk keperluan bahan lilitan mesin listrik, trafo dan kabel listrik. Perbedaan kedua sifat bahan ini yaitu

a. Konduktivitas

Konduktivitas dari tembaga maupun alumunium dari segi nilai lebih tinggi konduktivitas kawat tembaga karena kemudahan dalam penggunaan dan kemampuan tembaga dalam menghantarkan listrik lebih baik daripada alumunium.

b. Bobot

Berat dari kedua bahan tersebut berbeda, lebih berat kawat tembaga sedangkan kawat alumunium lebih ringan.

c. Harga

Dari segi harga kawat alumunium lebih terjangkau daripada kawat tembaga yang masih mahal.

d. Ekspansi Termal

Kawat alumunium memiliki sifat mengembang pada suhu tinggi dan menyusut pada suhu rendah. Sedangkan untuk kawat tembaga proses itu tidak terjadi karena

memiliki ekspansi termal yang rendah jadi tidak akan mengembang saat terkena panas dan menyusut ketika suhu rendah.

e. Korosif

Kawat aluminium dapat menyebabkan sebuah kecelakaan seperti kebakaran karena sifat korosifnya, tetapi tidak dengan kawat tembaga.

f. Bahan Non Korosif

Kawat tembaga dianggap non korosif jadi tidak bereaksi.

g. Kekuatan

Kawat tembaga lebih kuat daripada kawat aluminium.

h. Fleksibilitas

Kawat aluminium lebih fleksibel daripada kawat tembaga sehingga lebih mudah di gulung.

i. Daya Dukung Arus

Kawat tembaga memiliki daya dukung arus yang lebih tinggi daripada kawat aluminium .

j. Resistivitas

Resistivitas kawat aluminium lebih tinggi daripada tembaga.

2.8 Regresi Kuadratic

$$\hat{Y} = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + \dots + b_nx_n \quad (2.24)$$

$$\hat{B} = \begin{bmatrix} b_0 \\ b_1 \\ b_2 \end{bmatrix} = (x^1 x)^{-1} (x^1 y)$$

$$(x^1 y) = \begin{bmatrix} \Sigma y \\ \Sigma x_1 y \\ \Sigma x_2 y \end{bmatrix}$$

$$(x^1 x)^{-1} = \frac{1}{\det(x^1 x)} \begin{bmatrix} \Theta_{11} & \Theta_{12} & \Theta_{13} \\ \Theta_{21} & \Theta_{22} & \Theta_{23} \\ \Theta_{31} & \Theta_{32} & \Theta_{33} \end{bmatrix}$$

$$(x^1 x) = \begin{bmatrix} n & \Sigma x_1 & \Sigma x_2 \\ \Sigma x_1 & \Sigma x_1^2 & \Sigma x_1 x_2 \\ \Sigma x_2 & \Sigma x_1 x_2 & \Sigma x_2^2 \end{bmatrix}$$

$$\Theta_{ij} = (-1)^{i+j} |A|$$

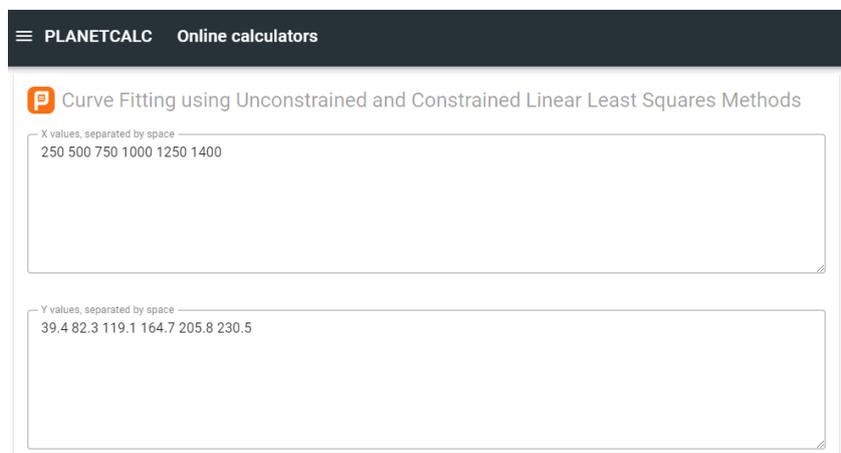
// (ij) adalah unsur baris dan kolom yang diarsir // |A| adalah unsur baris dan kolom yang tidak terarsir

$$\text{Misal pada } \Theta_{11} = (-1)^{1+1} \begin{bmatrix} \Sigma x_1^2 & \Sigma x_1 x_2 \\ \Sigma x_1 x_2 & \Sigma x_2^2 \end{bmatrix}$$

$$= -1 \left((\Sigma x_1^2 \cdot \Sigma x_2^2) - (\Sigma x_1 x_2 \cdot \Sigma x_1 x_2) \right)$$

$$\text{Det } x^1 x = a_{11} \cdot \Theta_{11} + a_{12} \cdot \Theta_{12} + a_{13} \cdot \Theta_{13}$$

Website untuk mempermudah dalam menentukan persamaan regresi kuadratik dapat menggunakan website planetcalc Gambar 2.17 adalah salah satu website kalkulator online yang membantu mempermudah mencari persamaan regresi kuadratik. Data variable kecepatan putaran dimasukan pada kolom “X values”, data tegangan rata-rata dari tiap fasa dimasukan pada kolom “Y values” menghasilkan persamaan 2.24.



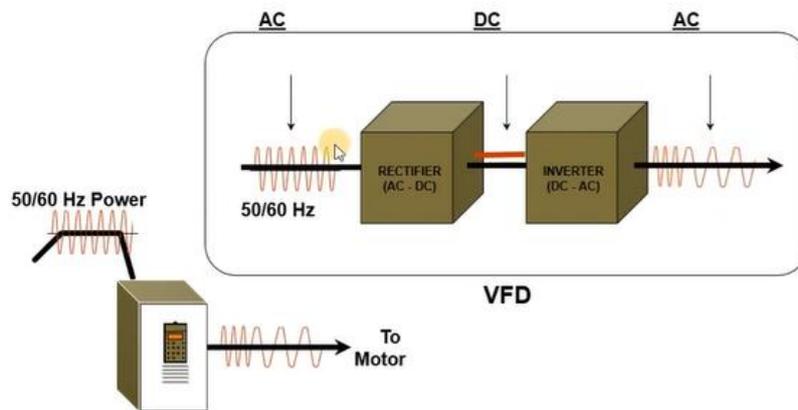
Gambar 2. 16 Website Planetcalc (Kalkulator Online).

2.9 *Variable Speed Drive (VSD)*

Variable speed drive merupakan sebuah alat yang digunakan untuk mengatur kecepatan motor dengan mengubah nilai frekuensi masukan yang menuju ke motor. Pengaturan nilai frekuensi ini dimaksudkan untuk mendapatkan kecepatan putaran yang diinginkan atau sesuai kebutuhan dengan mempertahankan agar power pada motor tetap konstan.

Penggunaan VSD bisa untuk mengaplikasikan motor AC maupun DC. Akan tetapi istilah inverter sering digunakan untuk aplikasi motor AC. Inverter menggunakan frekuensi tegangan masuk untuk mengatur kecepatan putaran motor. Jadi dengan memainkan perubahan frekuensi tegangan yang masuk pada motor, maka kecepatan putaran motor akan berubah. Karena itu inverter disebut juga *variable speed drive*.

Untuk mengubah tegangan AC menjadi DC dibutuhkan penyearah (converter AC-DC) dan biasanya menggunakan penyearah tidak terkendali (rectifier dioda) namun juga ada yang menggunakan penyearah terkendali (thyristor rectifier). Setelah tegangan sudah diubah menjadi DC maka diperlukan perbaikan kualitas tegangan DC dengan menggunakan tandon kapasitor sebagai perata tegangan. Kemudian tegangan DC diubah menjadi tegangan AC kembali oleh inverter dengan teknik PWM (Pulse Width Modulation). Dengan teknik PWM ini bisa didapatkan amplitudo dan frekuensi keluaran yang diinginkan. Selain itu teknik PWM juga menghasilkan harmonisa yang jauh lebih kecil dari pada teknik yang lain serta menghasilkan gelombang sinusoidal, dimana kita tahu bahwa harmonisa ini akan menimbulkan rugi-rugi pada motor yaitu cepat panas. Maka dari itu teknik PWM inilah yang biasanya dipakai dalam mengubah tegangan DC menjadi AC (Inverter).



Gambar 2.17 Blok Diagram Prinsip Kerja VSD.

Gambar 2.17 merupakan blok diagram prinsip kerja *Variable Speed Drive (VSD)* yaitu:

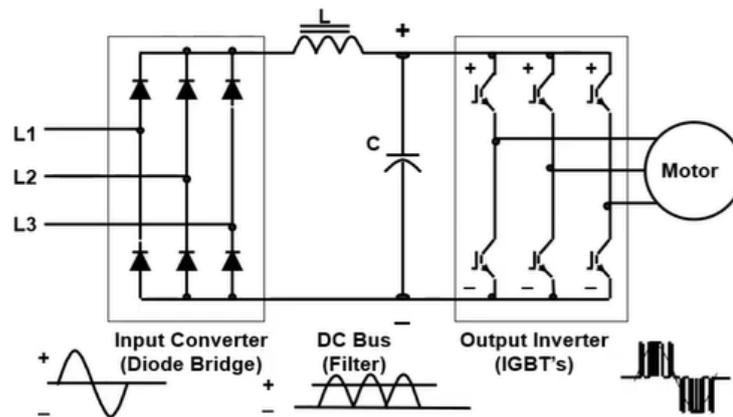
- a. Tegangan yang masuk 220/380 volt dan frekuensi 50 hz merupakan tegangan arus bolak-balik (AC) dengan nilai tegangan dan frekuensi yang konstan. Kemudian tegangan dan frekuensi yang masuk dialirkan ke board Rectifier/ penyearah DC.
- b. Untuk meratakan tegangan DC, maka tegangan dimasukkan ke DC link. Komponen yang terdapat pada DC link berupa kapasitor atau induktor
- c. Tegangan DC kemudian diumpankan ke board inverter untuk dijadikan AC kembali dengan frekuensi sesuai kebutuhan. Jadi dari DC ke AC yang komponen utamanya adalah Semikonduktor aktif seperti IGBT (*insulated gate bipolar transistor*). Dengan cara tegangan DC dicacah dan dimodulasi sehingga keluar tegangan dan frekuensi yang diinginkan.

VSD mengontrol kecepatan motor induksi dengan mengubah frekuensi dari grid untuk nilai disesuaikan pada sisi mesin sehingga memungkinkan motor listrik dengan cepat dan mudah menyesuaikan kecepatan dengan nilai yang diinginkan. Dua fungsi utama dari variabel frekuensi drive adalah untuk melakukan konversi listrik dari satu

frekuensi ke yang lain, dan untuk mengontrol frekuensi keluaran. Bentuk rangkaian dari *variable speed drive* (VSD) terdiri dari beberapa bagian seperti rectifier, DC link, dan Inverter. Rangkaian dari Variabel speed drive (VSD) seperti pada gambar 2.18.

Pada gambar 2.18 fungsi komponen VSD (*Variable Speed Drive*) yaitu:

- a. *Diode rectifier* yaitu bagian yang berfungsi untuk pengubah sinyal AC (*Alternating Current*) menjadi DC (*Direct Current*) karena dioda memiliki karakteristik melewatkan arus listrik kesatu arah dan menghambat arus listrik dari arah sebaliknya. Jika sebuah dioda dialiri arus bolak-balik (AC), maka dioda tersebut hanya akan melewatkan setengah gelombang, sedangkan setengah gelombangnya lagi diblokir.
- b. DC bus atau filter yaitu bagian yang berfungsi untuk sebagai filter atau perata tegangan DC (*Direct Current*) yang dihasilkan tegangan dari *dioda rectifier*, komponen di DC bus ini ada induktor berfungsi untuk mengatasi arus dan kapasitor untuk mengatasi tegangan nya.
- c. PWM inverter merupakan sebuah rangkaian elektronika yang berfungsi pengubah arus DC (*Direct Current*) menjadi arus AC (*Alternating Current*) dengan metode *switching* dengan frekuensi yang dapat diatur, komponen di dalamnya yaitu ada IGBT (*Insulated Gate Bipolar Transistor*) berfungsi sebagai *switching* semikonduktor yang diperlukan untuk pengoprasian dari inverter PWM, dengan menggunakan frekuensi carrier (bisa sampai 20 kHz), tegangan DC akan dicacah dan dimodulasi sehingga keluar tegangan dan frekuensi yang diinginkan.



Gambar 2.18 Rangkaian *Variable Speed Drive*.

2.10 Motor Induksi

Secara umum pengertian motor induksi adalah motor listrik arus bolak-balik (AC) yang bekerja berdasarkan arus induksi. Putaran rotor pada motor induksi tidak sama dengan putaran medan putar pada stator, hal ini mengakibatkan terjadinya slip atau terdapat perbedaan selisih putaran antara putaran rotor dan putaran medan pada stator.

Motor induksi dibagi menjadi 2 yaitu motor induksi satu fasa dan motor induksi tiga fasa

a. Motor Induksi Satu Fasa

Motor induksi satu fasa adalah motor listrik yang menggunakan sumber energi listrik satu fasa untuk mengoperasikannya (Nuari, 2018). Pada bagian motor induksi satu fasa terdapat satu gulungan stator dengan rotor sangkar tupai dan memerlukan alat tambahan seperti saklar untuk menghidupkannya

b. Motor Induksi Tiga Fasa

Motor induksi tiga fasa merupakan salah satu motor listrik yang sering digunakan dalam dunia industri. Hal ini karena motor induksi tiga fasa dapat menghasilkan kapasitas lebih besar daripada motor induksi satu fasa. Motor induksi mempunyai medan magnet yang berputar yang dihasilkan oleh sumber energi listrik tiga fasa dan memiliki daya yang tinggi.

2.11 Penelitian Terkait

No.	Nama Jurnal	Nama Peneliti	Tempat Tahun Penelitian	Pembahasan
1	Perancangan dan Pembuatan Generator Fluks Radial Tiga Fasa Magnet Permanen Kecepatan Rendah	Andika dan Amir Hamzah	Kampus Binawidya, Pekanbaru, Indonesia Teknik Elektro Universitas Riau 2018.	<p>Penelitian yang dilakukan oleh Andika dan Amir Hamzah berjudul “Perancangan dan Pembuatan Generator Fluks Radial Tiga Fasa Magnet Permanen Kecepatan Rendah”. Perancangan generator kecepatan rendah ini medan magnet terbuat dari magnet neodinium. Generator dirancang dengan kecepatan 750 rpm, frekuensi 50 Hz, tegangan induksi 15 V dan 3 fasa. Magnet permanen yang digunakan berdiameter 20mm dan tebal 3mm.</p> <p>Pengujian yang dilakukan meliputi pengujian beban nol, pengujian beban, pengujian tahanan jangkar, pengujian hubung singkat dan perhitungan pengaturan</p>

No.	Nama Jurnal	Nama Peneliti	Tempat Tahun Penelitian	Pembahasan
				tegangan (Hamzah, 2018).
2	Analisa Pengaruh Jumlah Lilitan Stator Terhadap Generator Magnet Permanen Fluks Radial Tiga Fasa	Ahmad Sauky Al Farisi, Alex Wenda, Liliana dan Nanda Putri Miefthawati	Universitas Islam Negeri Sultan Syarif Kasim Kabupaten Kampar, Riau 2021.	<p>Penelitian yang dilakukan oleh Ahmad Sauky dkk, yang berjudul “Analisa Pengaruh Jumlah Lilitan Stator Terhadap Generator Magnet Permanen Fluks Radial Tiga Fasa”.</p> <p>Pembuatan generator magnet permanen untuk meningkatkan daya, tegangan dan kecepatan pada generator magnet permanen, hanya dengan mengubah parameter seperti fluks magnet, jumlah lilitan, jumlah belitan, jumlah magnet serta ukuran diameter kawat. Dalam penelitian ini, variabel yang akan disimulasikan adalah jumlah lilitan pada kumparan stator dengan variasi 10, 50, dan 75 lilitan. Penelitian ini menggunakan kombinasi 18 slot 16 pole dengan jenis magnet NdFeB. Kemudian generator diuji menggunakan beban 20 ohm (Farisi et al., 2021).</p>
3	Analisis Pengaruh Variasi Jumlah Kutub dan Jarak Celah Magnet Rotor Terhadap Performan Generator Sinkron Fluks Radial	Anizar Indriani	Universitas Bengkulu Kandang Limun Bengkulu, 2015	<p>Penelitian yang dilakukan oleh Anizar Indriani yang berjudul “Analisis Pengaruh Variasi Jumlah Kutub dan Jarak Celah Magnet Rotor Terhadap Performan Generator Sinkron Fluks Radial”.</p>

No.	Nama Jurnal	Nama Peneliti	Tempat Tahun Penelitian	Pembahasan
				<p>Penelitian ini generator yang akan digunakan di PLTMH, generator yang digunakan adalah generator satu fasa tipe fluks radial. pengaruh magnet rotor dengan variasi jumlah kutub dan jarak celah udara lilitan kumparan stator terhadap kinerja generator sinkron fluks radial. Hasil penelitian menunjukkan bahwa semakin kecil jarak celah udara magnet rotor dan stator coil maka tegangan yang dihasilkan lebih besar. Untuk jarak celah udara magnet rotor dan lilitan kumparan stator 1mm dan 2mm pada putaran rendah 200 rpm diperoleh tegangan 43,5 volt dan 39,2 volt untuk pengujian tanpa beban. Pada pengujian berbeban diperoleh tegangan 30 volt dan 26,8 volt dengan jarak celah udara (gap) yang sama dan besarnya arus yang dihasilkan 0,21 mA (Anizar Indriani, 2015).</p>
4	Modifikasi Motor Brushless DC Menjadi Generator Sinkron Magnet Permanen Fluks Radial Putaran Rendah	Dhea Gemilang Ramdhany, Nurul Hiron, Nundang Busaero	Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Siliwangi, Tasikmalaya, Indonesia, 2021	Penelitian yang dilakukan oleh Dhea Gemilang Ramdhany dengan judul “Modifikasi Motor Brushless DC Menjadi Generator Sinkron Magnet Permanen Fluks Radial Putaran Rendah”. Pada

No.	Nama Jurnal	Nama Peneliti	Tempat Tahun Penelitian	Pembahasan
				<p>penelitian ini yaitu memodifikasi motor BLDC menjadi sebuah generator sinkron magnet permanen fluks radial. Spesifikasi motor BLDC tipe outer rotor memiliki kumparan stator berbentuk roda gigi berinti besi berjumlah 36 coil 3 fasa, terdiri 90 lilitan tiap coil berbahan aluminium dengan jenis belitan <i>concentrated</i>. Rotor memiliki 12 batang magnet permanen berbahan Barium ferrite ($BaO \cdot 6Fe_2O_3$). Pengujian generator ini menggunakan tiga kali pengujian yaitu pengujian <i>open circuit</i>, <i>short circuit</i>, <i>full load</i> (Ramdhany et al., 2021).</p>
5	<p>Optimasi Kemiringan Magnet Pada Generator Magnet Permanen Kecepatan Rendah Fluks Radial</p>	<p>Pudji Irasari, Muhammad Kasim, Fitriana</p>	<p>Pusat Penelitian Tenaga Listrik dan Mekatronik Lembaga Ilmu Pengetahuan Indonesia (LIPI)</p>	<p>Beberapa peneliti mengkaji tentang generator fluks radial untuk putaran rendah secara numerik dan eksperimental. Pudji Irasari, Muhammad Kasim, dan Fitriana mengkaji tentang pengaruh kemiringan magnet pada generator fluks radial untuk kecepatan rendah dimana hasilnya menunjukkan posisi kemiringan akan menghasilkan distorsi harmonik dan bentuk gelombang tegangan yang berbeda (Pudji</p>

No.	Nama Jurnal	Nama Peneliti	Tempat Tahun Penelitian	Pembahasan
				Irasari, Muhammad Kasim, n.d.).