

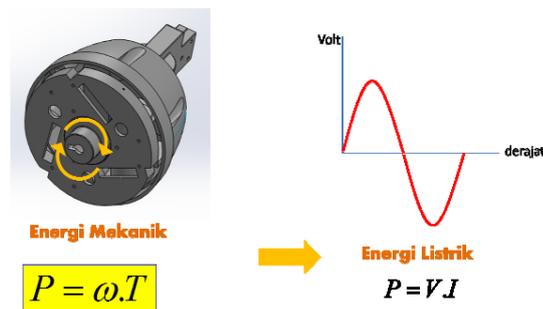


## BAB II

### TINJAUAN PUSTAKA

#### 2.1 Generator

Generator merupakan alat konversi energi mekanik menjadi energi listrik. Generator mengubah torsi ( $T$ ) dan Kecepatan putar rotor ( $\omega$ ) yang diterimanya dari blade menjadi nilai tegangan ( $V$ ) dan arus ( $I$ ). Hasil keluaran dari generator ini berupa listrik AC 3 fasa<sup>1</sup>.



Gambar 2.1 Generator dan energi yang dihasilkan

Adapun jenis jenis generator berdasarkan putaran medan dibagi menjadi generator asinkron dan generator sinkron.

##### 2.1.1 Generator asinkron

Generator asinkron adalah mesin induksi yang berkerja sebagai generator, oleh karena itu mesin induksi mempunyai persamaan kontruksi yang sama untuk generator maupun untuk rotor. Generator ini mendapat eksitasi dari luar, syarat utama tegangan dapat timbul untuk generator induksi adalah jika  $N_r > N_s$  dengan  $N_r$  = kecepatan rotor dan  $N_s$  = Kecepatan sinkron.

<sup>1</sup> Sumber : *Energi Angin*, Lentera Angin Nusantara. Hal 17



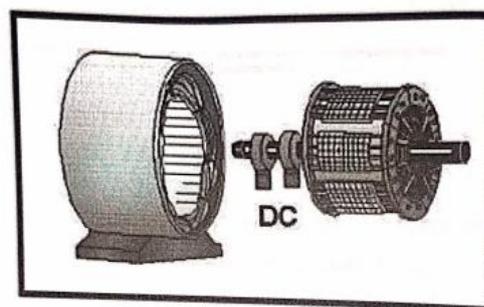
### 2.1.2 Generator sinkron

Generator sinkron adalah mesin listrik arus bolak-balik yang menghasilkan tegangan dan arus bolak-balik (*Alternating Current, AC*) yang berkerja dengan cara merubah energi mekanik (gerak) menjadi energy listrik dengan adanya induksi medan magnet. perubahan energi ini terjadi karena adanya pergerakan relative antara medan magnet dengan kumparan generator. Pergerakan relative adalah terjadinya perubahan medan magnet pada kumparan jangkar (tempat terbangkitnya tegangan pada generator) karena pergerakan medan magnet terhadap kumparan jangkar atau sebaliknya. Generator ini disebut sinkron karena kecepatan perputaran medan magnet yang terjadi sama dengan kecepatan perputaran rotor generator. Generator sinkron ini menghasilkan energi listrik AC dan biasa diproduksi untuk menghasilkan listrik AC 1-fasa atau 3-fasa<sup>2</sup>.

## 2.2` Konstruksi Generator Sinkron

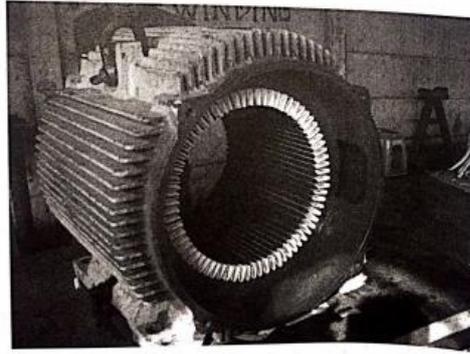
Dalam generator sinkron. Medan magnet rotor dihasilkan baik dengan merancang rotor sebagai magnet permanen atau dengan menerapkan arus dc ke belitan rotor untuk membuat electromagnet. Rotor generator kemudian diputar oleh penggerak utama, menghasilkan medan magnet yang berputar di dalam mesin. Medan magnet yang berputar ini menginduksi tegangan tiga fasa dalam gulungan stator generator. Generator memiliki dua bagian utama yaitu stator dan rotor.

### 2.2.1 Stator



Gambar 2.2 Bentuk sederhana kontruksi generator sinkron

<sup>2</sup> Sumber : Zuriman Anthony, *Mesin Listrik Arus Bolak-Balik*, 2019. Hal 2



Gambar 2.3 Bentuk konstruksi stator pada generator sinkron

Dengan memperhatikan gambar 2.2 Dan gambar 2.3 Maka konstruksi stator terdiri dari :

a. Rangka stator

Kerangka atau gandar dari besi tuang untuk menyangga inti jangkar.

b. Inti Stator

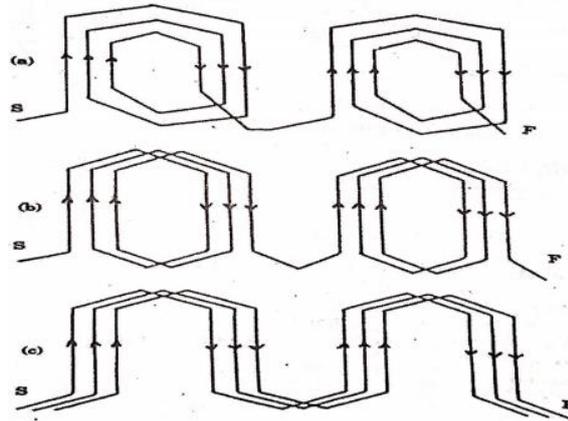
Inti jangkar yang terbuat dari laminasi-laminasi besi lunak/baja silicon yang terpasang pada rangka stator.

c. Alur/parit/slot dan gigi

alur dan gigi sebagai tempat meletakkan belitan (kumparan). Adapun bentuk-bentuk dari alur yaitu terbuka, setengah terbuka, dan tertutup.

d. Belitan Stator

Belitan stator terbuat dari tembaga yang diletakan pada alur.gambar bentuk lilitan stator dalam membentuk kutub magnet pada stator untuk menyesuaikan dengan kutub magnet rotor diperlihatkan pada gambar 2.4



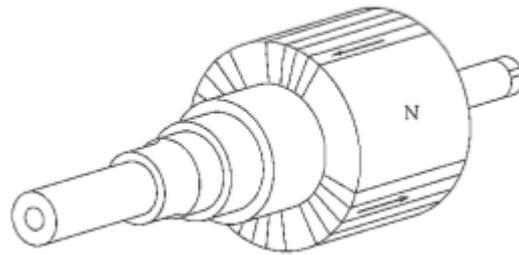
Gambar 2.4 Rangkaian belitan jangkar di stator generator sinkron

Kumaran stator biasanya disebut belitan stator. Untuk generator 3-fasa biasanya kumaran dapat dirangkai dalam 2 jenis yaitu belitan satu lapis (*single layer winding*) dan belitan dua lapis (*double layer winding*<sup>3</sup>).

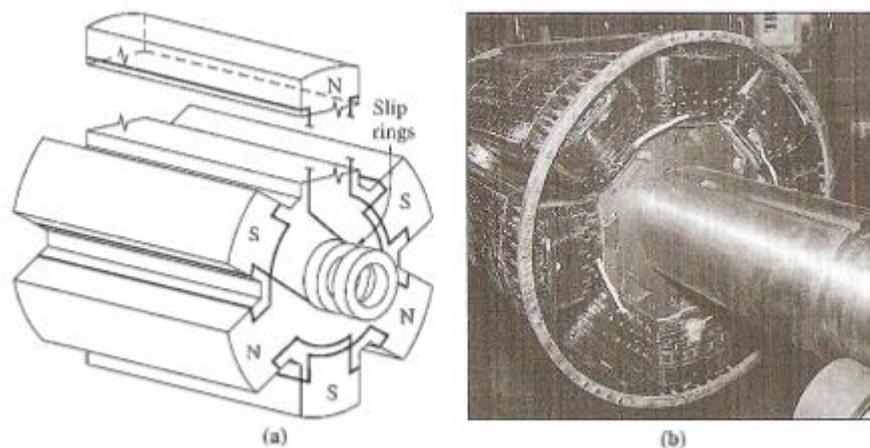
### 2.2.2 Rotor

Rotor dari generator sinkron pada dasarnya adalah sebuah electromagnet besar. Kutub magnet pada rotor dapat berupa konstruksi yang menonjol (*salient*) atau tidak menonjol (*non salient*). Kutub yang menonjol adalah kutub magnet yang menjulur secara radial dari poros rotor. Di samping itu kutub yang tidak menonjol adalah kutub dengan belitan yang tertanam rata dengan permukaan rotor. Rotor yang tidak menonjol ditunjukkan pada gambar 2.5 perhatikan bahwa belitan electromagnet tertanam pada permukaan rotor. Rotor yang kutubnya menonjol ditunjukkan pada gambar 2.6 perhatikan bahwa disini gulungan electromagnet dililitkan di sekitar kutub itu sendiri, bukannya tertanam pada permukaan rotor.

<sup>3</sup> Sumber : Zuriman Anthony, *Mesin Listrik Arus Bolak-Balik*, 2019. Hal 4



Gambar 2.5 Generator sinkron dengan rotor yang tidak menonjol



Gambar 2.6 Generator sinkron dengan rotor yang menonjol

Karena rotor mengalami perubahan medan magnet, rotor dibuat dari laminasi tipis untuk mengurangi rugi-rugi arus. Arus searah (*direct Current, DC*) harus dipasang ke sirkuit medan pada rotor jika merupakan elektromagnet. Karena rotor berputar, diperlukan pengaturan khusus untuk mendapatkan daya dc ke belitan medan. Ada dua cara untuk memasok daya yaitu :

- a. Mensuplai daya dc dari sumber dc eksternal ke rotor melalui slip ring dan brush.
- b. Suplai daya dc dari sumber daya dc khusus yang dipasang langsung pada poros generator sinkron<sup>4</sup>.

<sup>4</sup> Sumber : Stephen J. Chapman, *Electric Machinery Fundamentals*, 2012. Hal 192

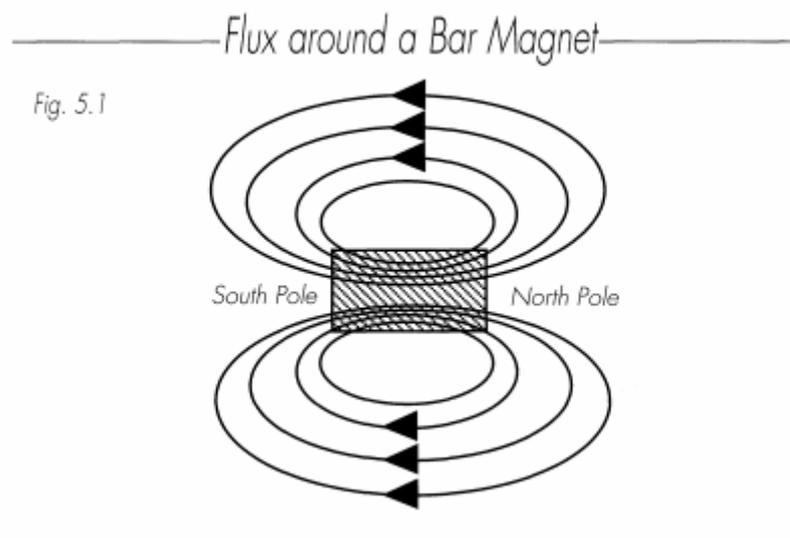


### 2.3 Prinsip Kerja Generator

Generator ini dapat menghasilkan energi listrik karena adanya pergerakan relative antara medan magnet homogen terhadap kumparan jangkar pada generator (magnet yang bergerak dan kumparan jangkar diam atau sebaliknya magnet diam dan kumparan jangkar bergerak).

#### 2.3.1 Magnet

Sebuah magnet memiliki dua kutub, utara dan selatan. Fluks muncul dari kutub utara dan menemukan jalannya kembali ke kutub selatan (Gambar 2.7). ini adalah 'sirkuit magnetik'. Fluks menyukai besi, baja, dan bahan magnetik lainnya. Fluks tidak hanya menarik mereka, tetapi jumlah fluks dalam sirkuit bias menjadi jauh lebih besar jika sirkuit tersebut terbentuk dari material tersebut.



Gambar 2.7 Arah medan magnet

#### 2.3.2 Kumparan

Generator juga mengandung kumparan dari kawat tembaga, sering juga disebut belitan. Kawat tembaga diselubungi dengan pelapis tipis, yang menginsulasi tiap putaran dari kawat dari sekelilingnya. Sebuah kumparan juga biasanya dibelitkan pada 'pembentuk lilitan' dari kayu, setelah itu dilepas,

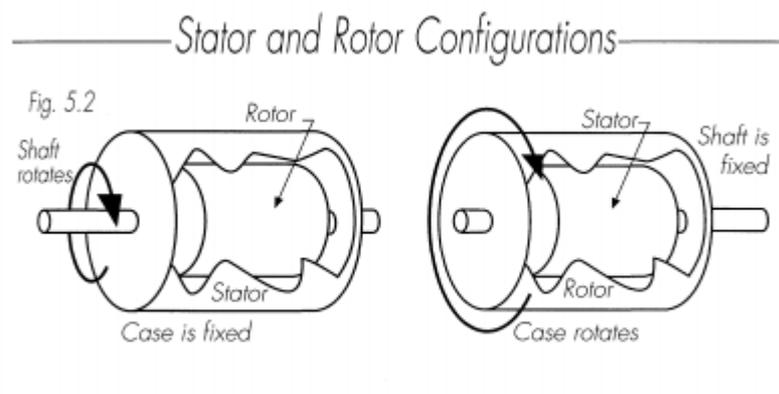


dimasukkan ke dalam mesin, dan diberikan resin untuk membentuk gumpalan padat. Kumaran terbagi menjadi dua :

- a. Kumaran utama, atau kumaran keluaran dimana daya dibangkitkan.
- b. Kumaran medan atau eksitasi yang harus dialiri arus untuk membangkitkan medan magnet di dalam mesin. Biasa disebut sebagai mesin eksitasi.

### 2.3.3 Stator dan rotor

Generator punya dua bagian: bagian tidak bergerak (stator) dan bagian yang bergerak (rotor). Stator biasa dibuat di bagian luar, menyelimuti mesin. Rotor biasa dipasang pada shaft berputar di tengah (Gambar 2.8).



Gambar 2.8 Stator dan rotor konfigurasi

Walaupun begitu, susunan sebaliknya juga memungkinkan, dan faktanya hal tersebut cukup biasa dalam konteks kincir angin. *Shaft*-nya diam, dan *case*-nya berputar. Susunan ini disebut sebagai '*case driven*' yang berkebalikan kepada bentuk konvensional '*shaft driven*'. Jika kincir angin tidak mau memiliki gear, bilah rotor bisa dibautkan langsung kepada rotor magnetnya.

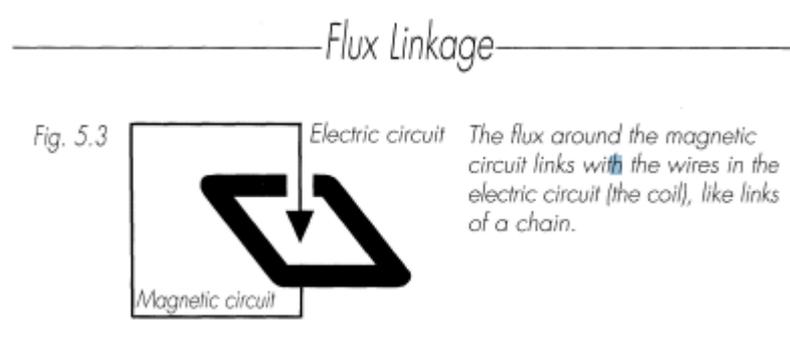


Generator bekerja dengan menggerakkan magnet melewati kumparan, atau menggerakkan kumparan melewati magnet; dan hasilnya sama saja. Yang berpengaruh adalah pergerakan relatifnya. Maka dari itu, magnet bisa berada di stator ataupun di rotor. Mereka juga bisa berada di dalam atau di luar

Keuntungan kita memiliki kumparan di dalam stator adalah bahwa mereka mudah dihubungkan tanpa *sliding contacts*.

### 2.3.4 Flux memotong kawat

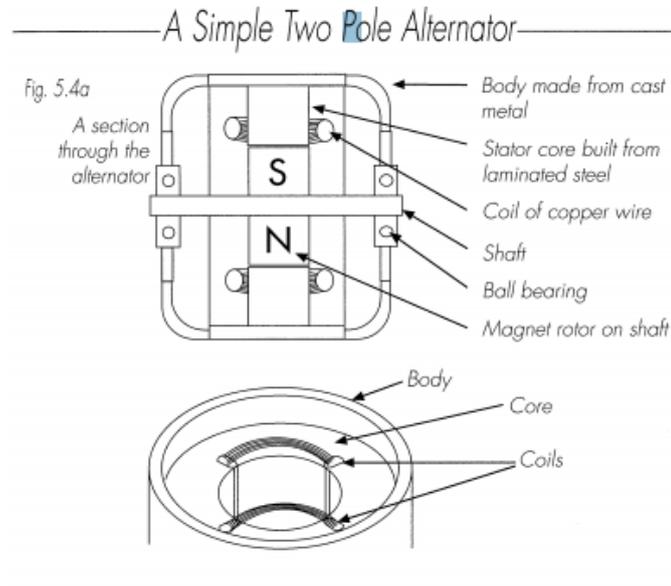
Magnet dan kumparan di generator telah dikonfigurasi dalam cara tertentu sehingga flux magnet menembus kumparan (Gambar 2.9).



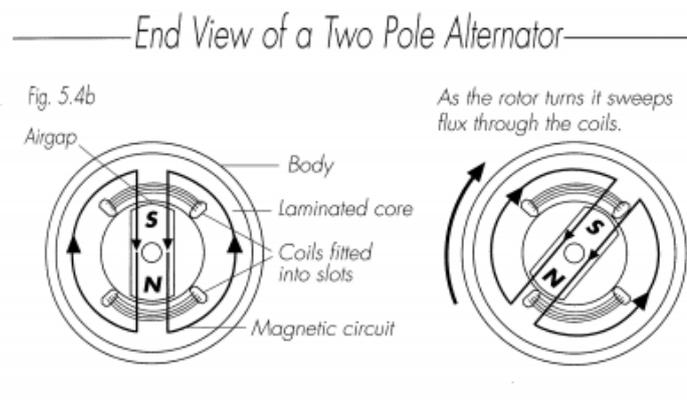
Gambar 2.9 Fluks yang memotong kawat

Di satu posisi dari rotor, flux magnetik yang menembus kumparan terkonsentrasi dalam satu arah. Saat rotor bergerak, flux yang menembus kumparan melemah sampai nilai nol dan berganti arah sepenuhnya. Flux mengalir di siklus tanpa akhir, seperti gelombang lautan, mereka memotong kumparan bersamaan dengan gerakan rotornya. Saat garis-garis flux memotong melewati mereka, voltase diproduksi di dalam kumparan. Inilah yang dinamakan induksi elektromagnetik.

Gambar 2.10 menunjukkan alternator kutub pole yang simpel. Shaft membawa magnet yang berputar, sehingga membawa flux dapat melewati kumparan yang menempel di inti stator (gambar 2.11).

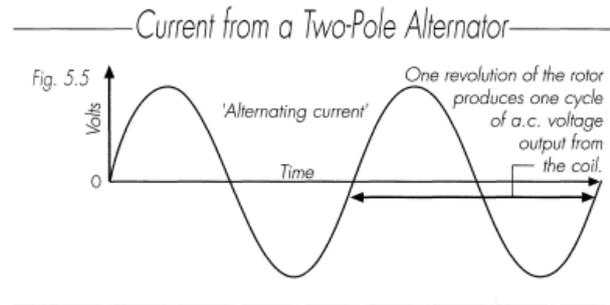


Gambar 2.10 Alternator dengan dua kutub



Gambar 2.11 Fluks yang menempel pada inti stator

Gambar 2.12 adalah grafik yang menunjukkan bagaimana tegangan kumparan berubah sepanjang waktu dengan keadaan rotor yang berputar.



Gambar 2.12 Grafik tegangan yang dihasilkan

### 2.3.5 Memaksimalkan fluks di dalam mesin

Sirkuit magnetik seringkali dibandingkan dengan sirkuit elektrik dengan analogi bahwa flux dianalogikan dengan arus listrik. Celah udara di sirkuit magnetiknya bekerja seperti resistansi di sirkuit elektrik. Celah udara yang besar membatasi besarnya flux di sekitar sirkuit.

Untuk menjaga celah udaranya tetap kecil, kumparan dari alternator (generator) simpel kita dimasukkan kepada slot di inti stator. Besi diantara slot menyediakan jalur yang mengandung resistansi kecil untuk flux saat menembus kumparan.

### 1.3.6 Rugi-rugi besi

Fakta bahwa flux berubah-ubah di inti setiap waktu mempengaruhi tidak hanya kumparan di sekitarnya, tetapi juga baja di inti itu sendiri. Kita tidak mau melihat efek samping di inti; mereka membuang-buang daya. Mereka disebut rugi-rugi besi, dan terjadi karena dua alasan:

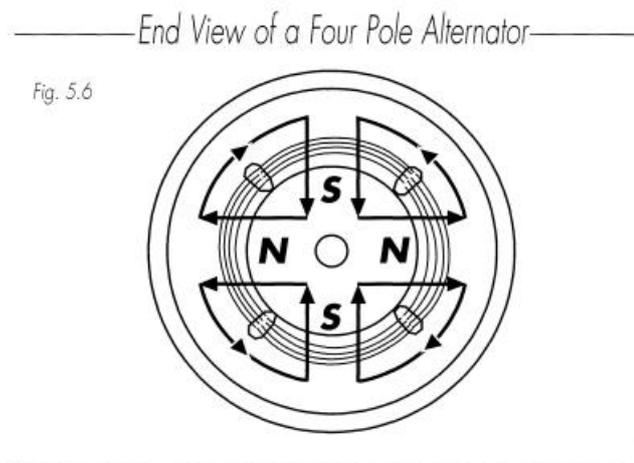
- a. Baja sedang dimagnetisasi dan didemagnetisasi dalam kecepatan yang sangat cepat. Proses ini juga mengikutsertakan hysteresis, dan mengonsumsi energi. Baja spesial yang dapat dimagnetisasi dengan mudah dapat dipakai untuk mengurangi rugi-rugi hysteresis.
- b. Perubahan flux cenderung memproduksi arus memutar di dalam baja, diikuti terbentuknya jalur konduktif yang berhubungan di antara garis-garis flux yang berubah. Sebuah inti dibentuk dari laminasi pipih



(terinsulasi dari satu sama lain) bisa dipakai untuk meruntuhkan jalur sirkuit yang besar sehingga meminimalisasi arus eddy atau arus berputar tadi.

### 2.3.7 Banyaknya kutub

Sejauh ini, kita telah melihat kepada rotor dengan hanya dua pole: utara dan selatan. Magnet punya dua pole, tetapi bisa saja ada banyak pole di dalam generator. Jumlah pole selalu genap, karena tidak akan ada kutub utara tanpa kutub selatan, dan kebalikannya juga berlaku. Gambar 2.13 menggambarkan alternator (generator) empat pole.



Gambar 2.13 Generator dengan empat kutub

### 2.3.8 Frekuensi

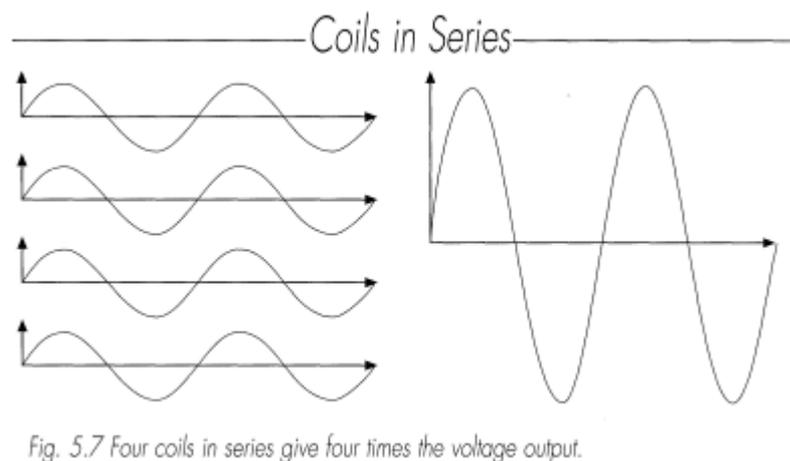
Jika terdapat 2 pole (Gambar 2.12), tegangannya mengalami satu siklus setiap putaran mesin. Jika ada 4 pole, maka akan ada 2 siklus tiap putaran. Kecepatan dari siklus tegangan ini disebut sebagai frekuensi sumber. Frekuensi juga bervariasi sebanding dengan kecepatan putar (lihat rumus daya angin). Jika tegangan mengalami 50 siklus dalam satu detik (seperti listrik utama), maka frekuensinya 50 Hertz (50Hz).



### 2.3.9 Fasa

Banyak alternator punya lebih dari satu kumparan keluaran. Dalam alternator satu fasa, kita bisa mengoneksi semua kumparan bersama-sama untuk mengalirkan daya kepada satu sirkuit yang sama. Hal ini mungkin dilakukan karena jumlah siklus dari tegangan keluaran dari kumparan semuanya memiliki pola yang sama satu sama lain. Secara teknik, kita bisa mengatakan bahwa kumparan-kumparan tersebut satu fasa dengan yang lain.

Pada gambar 2.13, terdapat empat pole dan empat kumparan. Saat rotor berputar, tiap kumparan menghadap kepada sebuah pole dalam momen yang sama. Kita bisa menghubungkan semua kumparan tersebut secara seri (Gambar 2.14), sehingga kita bisa menghubungkan sel-sel individu itu bersama-sama di dalam baterai untuk memproduksi sumber tegangan yang lebih tinggi. Alternatif lain adalah mengkoneksikan kumparan-kumparan itu secara paralel untuk mendapatkan arus yang lebih besar (pada tegangan yang lebih rendah) daripada rangkaian seri.

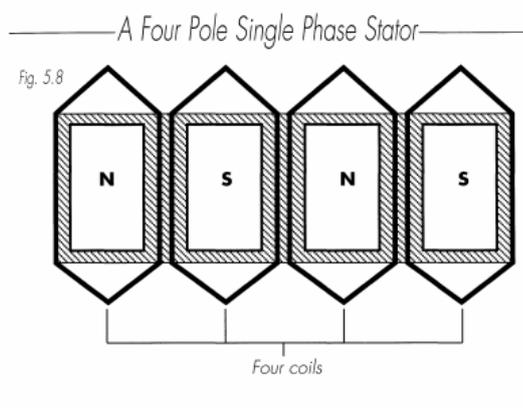


Gambar 2.14 kumparan seri

Pada generator dimana satu kumparan menghadap kutub selatan, dan kumparan lain menghadap kutub utara pada waktu yang bersamaan, koneksi kepada satu kumparan hanya butuh dibalik, sehingga kumparannya bisa bekerja bersama-sama.

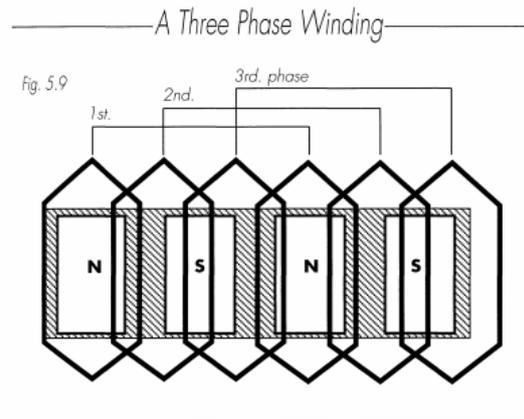


Jika kita melakukan suplai kepada beberapa jumlah sirkuit, atau jika sumber tersebut tujuannya untuk dikonversi ke DC untuk pengecasan baterai, maka lebih sering dipilih menggunakan generator tiga fasa, dengan tiga set kumparan, semuanya memproduksi listrik AC dengan voltase dan frekuensi yang sama, tapi memiliki beda fasa yang berbeda. Kumparannya didistribusikan di stator (atau bisa juga di rotor) di cara yang bagaimana pole menembus satu kumparan satu persatu, dalam sukseksi yang halus. Kebanyakan insinyur elektro akan berasosiasi dengan kata-kata tiga fasa dengan sumber 415 volt, tetapi voltase lainnya juga mungkin dipakai secara sempurna. Contoh dari yang punya belitan tiga fasa adalah alternator mobil.



Gambar 2.15 Empat kutub dengan satu fasa

Gambar 5.8 menunjukkan bahwa stator dari mesin 4 pole yang diluruskan menjadi kotak pipih, sehingga bentuk dari kumparan satu fasa lebih mudah diikuti. Posisi dari 4 pole (di rotor, menghadap kumparan) terlihat 'N, S, N, S', untuk memperlihatkan bahwa semua coilnya satu fasa.



Gambar 2.16 lilitan dengan 3 fasa

Untuk melihat perbedaan kontrasnya, gambar 2.16 menunjukkan bentukan dari kumparan mesin tiga fasa.

Terdapat 6 kumparan, tiga pasang, yang terlihat terhubung melewati kawat tipis. Pasangan pertama sefasa satu sama lain, dan bisa dikoneksi secara seri untuk menjadi sumber untuk satu sirkuit. Pasangan kedua bisa dikoneksikan satu sama lain, namun *timing* nya sedikit berbeda dari fasa pertama, sehingga mereka harus menjadi sumber untuk sirkuit kedua. Sekali lagi, pasangan ketiga akan memproduksi sumber elektrik yang independen secara pewartuan dari mesin tersebut.

Melihat *timing* dari puncak dan palung dari ketiga sumber (gambar 2.17), kita menemukan bahwa semua sinyal memberikan voltase yang sama dengan frekuensi yang sama, tetapi mereka berbeda langkah satu sama lain (beda fasa).

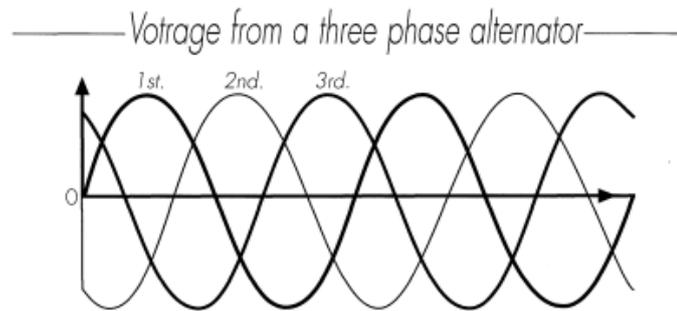
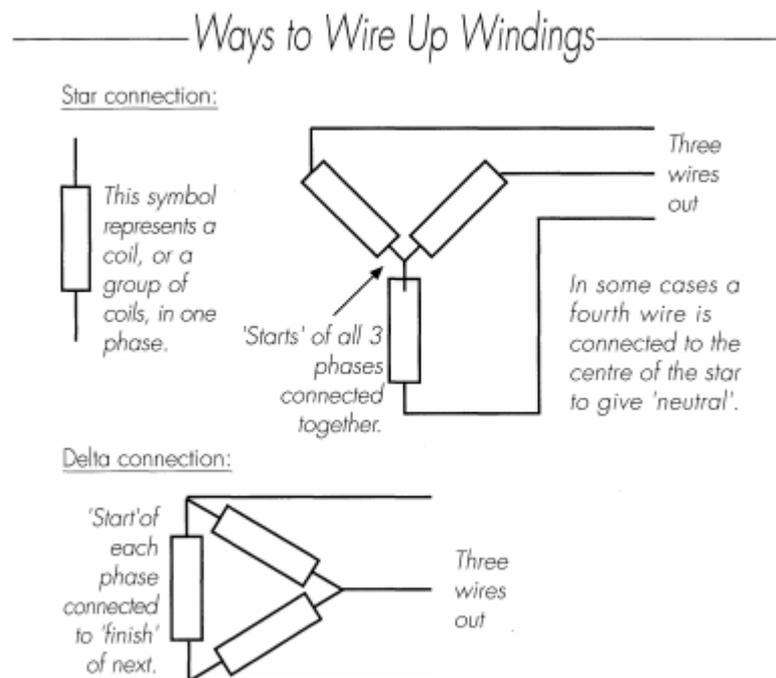


Fig. 5.10 How the voltage from each of the three phases varies with time.

Gambar 2.17 Tegangan dari Generator tiga fasa

### 2.3.10 Konfigurasi star dan delta

Terdapat dua macam untuk menghubungkan tiga sirkuit bersama-sama. Kita tidak bisa mengkoneksikan mereka secara seri (atau paralel) karena *time lag*, tetapi mereka bisa berbagai beberapa kumparan yang mirip. Ada dua opsi untuk mengkoneksikan ujung kabel (Gambar 2.18)



Gambar 2.18 Cara menghubungkan kumparan



### 2.3.11 Cogging

Inti yang memiliki slot memiliki *teeth* (untuk flux) diantara slot. Setiap rotor berputar, magnetnya tertarik kepada *teeth* tersebut. Hasilnya adalah efek torka seperti pulsa, yang diketahui dengan nama *cogging*. Fenomena ini bisa menyebabkan kesusahan untuk menyalakan generatornya dari keadaan diam, dan juga menyebabkan adanya kebisingan saat bekerja. Efek tersebut bisa diminimaslisasi dengan memiringkan slotnya sedikit<sup>5</sup>.

## 2.4 *Permanent Magnet Synchronous Generator (PMSG)*

*Permanent Magnet Synchronous Generator (PMSG)* adalah generator yang medan eksitasinya dihasilkan oleh magnet permanen bukan kumparan sehingga fluks magnetic dihasilkan oleh medan magnet permanen. Jenis generator ini adalah salah satu jenis generator yang memiliki tingkat efisiensi tinggi karena tidak ada rugi-rugi eksitasi yang dihasilkan sehingga banyak digunakan pada pembangkit listrik tenaga angin<sup>6</sup>.

*Permanent Magnet Synchronous Generator (PMSG)* merupakan mesin listrik berputar 3-fase stator klasik yang seperti generator induksi pada umumnya. Magnet permanen bisa terpasang pada permukaan ataupun tertanam pada rotornya. Energi listrik yang dihasilkan oleh generator dapat berbentuk arus bolak-balis (AC) dan arus searah (DC).

Generator merupakan mesin listrik yang digunakan untuk mengubah energi mekanik (gerak) menjadi energi listrik dengan perantara induksi medan magnet. Perubahan energi ini terjadi karena adanya pergerakan relatif antara medan magnet dengan kumparan generator. Disebut generator sinkron adalah jika pada generator tersebut kecepatan perputaran medan magnet yang terdiri sama dengan ecepatan perputaran rotor generator. Generator ini menghasilkan energi listrik bolak-balik (AC) dan biasanya diproduksi untuk menghasilkan listrik AC 1 fasa atau 3 fasa.

<sup>5</sup> Sumber : Hugh Piggott, Windpower Workshop. Hal 63

<sup>6</sup> Sumber : Syukri Hilman, Energi Angin, 2019. Hal 146



## 2.5 Torsi Cogging

Suatu mesin listrik tidak selalu menghasilkan torsi secara sempurna. Torsi tersebut mengalami gejala ‘riak’ atau ripple sehingga torsi yang dihasilkan tidak halus. Menurut Gieras (2004), riak ini dapat disebabkan oleh beberapa faktor salah satunya *cogging*. *Cogging* adalah efek interaksi antara fluks magnetik di daerah *air gap*. Adanya efek tersebut menyebabkan munculnya *cogging torque*. Akibatnya mesin listrik magnet permanen memiliki kecenderungan rotor untuk mensejajarkan diri dengan stator pada beberapa posisi (terjadi efek tarik-menarik), meskipun dalam kondisi tidak bergerak (Zhu, 2000). Sehingga, untuk meningkatkan kinerja generator atau motor PM diperlukan optimasi terhadap efek *cogging torque*.

Dengan  $B_r$  adalah titik potong pada sumbu B kurva B-H material,  $l_m$  panjang magnet sepanjang arah magnetisasi,  $\Phi$  adalah fluks magnet, dan  $\theta$  sudut mekanik. Persamaan tersebut membantu desain untuk meminimalisasi besarnya nilai *cogging torque*.

$$T_{cog}(\theta) = \frac{1}{2} \Phi_r \frac{dF}{d\theta} = \frac{1}{2} B_r \frac{l_m}{\mu_0 \mu_r} \frac{d\Phi}{d\theta} \dots \dots \dots (2.1)$$

Metode untuk mengukur *cogging torque* pada generator 18S16P adalah dengan melakukan pemutaran rotor dengan sudut kecil (bergantung jumlah *slots* dan *poles*). Dengan meletakkan sensor torsi maka nilai *cogging torque* mampu didapatkan. Metode inilah yang digunakan dalam simulasi menggunakan software FEM. Dengan memutar rotor dalam derajat tertentu, dan nilai torsi rotor dapat dipetakan.

Untuk memastikan bahwa bentuk gelombang torsi *cogging* penuh diukur, dilakukan dengan memasukkan data step putaran mekanikal, untuk mendapatkan nilai sudut satu gelombang penuh mekanikal dapat dicari dengan :



$$Period\ cogging = \frac{360^\circ}{LCM(N_s, 2p)} \dots\dots\dots(2.2)$$

Keterangan :

*Period Cogging* : sudut satu gelombang peuh *cogging*

*LCM* : Least Common Multiple / kelipatan persekutuan terkecil slot dan pole

## 2.6 *Finite Element Method (FEM)*

FEM adalah metode komputasi dengan konsep memecah area hitungan menjadi luasan kecil-kecil lalu dihitung berbagai parameternya satu per satu di tiap luasan tersebut. Perangkat lunak berbasis *Finite Element Method (FEM)* ini juga dapat melakukan berbagai analisis terhadap kemampuan dan performa mesin elektromekanikal, mulai dari generator, motor, levitasi magnet, transformer, *inductioin heating*, dan lain-lain.