



BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Angin

Angin adalah udara yang bergerak akibat adanya perbedaan tekanan udara dari daerah bertekanan tinggi ke daerah bertekanan rendah atau dari daerah yang suhu rendah ke daerah bersuhu tinggi. Proses terjadinya angin dimulai karena adanya perbedaan penyinaran matahari.

2.2 Potensi Angin di Indonesia

Potensi angin di Indonesia

No.	Provinsi	Potensi (MW)	No.	Provinsi	Potensi (MW)
1	Nusa Tenggara Timur	10.188	18	Kepulauan Riau	922
2	Jawa Timur	7.907	19	Sulawesi Tengah	908
3	Jawa Barat	7.036	20	Aceh	894
4	Jawa Tengah	5.213	21	Kalimantan Tengah	681
5	Sulawesi Selatan	4.193	22	Kalimantan Barat	554
6	Maluku	3.188	23	Sulawesi Barat	514
7	Nusa Tenggara Barat	2.605	24	Maluku Utara	504
8	Bangka Belitung	1.787	25	Papua Barat	437
9	Banten	1.753	26	Sumatera Barat	428
10	Bengkulu	1.513	27	Sumatera Utara	356
11	Sulawesi Tenggara	1.414	28	Sumatera Selatan	301
12	Papua	1.411	29	Kalimantan Timur	212
13	Sulawesi Utara	1.214	30	Gorontalo	137
14	Lampung	1.137	31	Kalimantan Utara	73
15	DI. Yogyakarta	1.079	32	Jambi	37
16	Bali	1.079	33	Riau	22
17	Kalimantan Selatan	1.006	34	DKI Jakarta	4
Sumber : RUEN			TOTAL		60.647

Potensi angin Indonesia memang cukup besar. Rencana Umum Energi Nasional (RUEN) mencantumkan angka 60.647,0 MW untuk kecepatan angin 4 meter perdetik atau lebih.



2.3 Persamaan Umum Perhitungan PLT Angin

Daya angin berbanding lurus dengan kerapatan udara dan kubik kecepatan angin dinyatakan dengan persamaan : (Hau Erich. 2006)

$$P = \frac{1}{2} \rho V^3 \dots\dots\dots (2.1)$$

P= daya angin(watt)

ρ = massa jenis angin(kg/m³)

V= kecepatan angin(m/s)

Untuk menghitung energi persatuan luas yang dihasilkan oleh turbin angin adalah menggunakan persamaan berikut :

$$P = \frac{1}{2} \rho V^3 A \dots\dots\dots (2.2)$$

P= daya angin(watt)

ρ = massa jenis angin(kg/m³)

V= kecepatan angin(m/s)

A= luas penampang sudu atau bilah(m²)

Menghitung daya yang dihasilkan turbin angin, dapat dihitung dengan persamaan sebagai berikut :

$$P = C_p \frac{1}{2} \rho V^3 D^2 \dots\dots\dots (2.3)$$

P= daya efektif turbin angin(watt)

C_p= koef. Daya

ρ = massa jenis angin(kg/m³)

V= kecepatan angin(m/s)

D= diameter kincir angin(m)

Dari kecepatan angin diameter, dapat dihitung nilai putaran yang dihasilkan oleh turbin sebesar dengan menggunakan persamaan berikut :

$$RPM = 60 \frac{\lambda V}{\pi D} \dots\dots\dots (2.4)$$

RPM= kecepatan putar permenit

D= diameter kincir angin(m)

λ = tip speed ratio

V= kecepatan angin(m/s)



Selanjutnya sistem konversi energi angin untuk membangkitkan tenaga listrik dihitung dengan persamaan berikut :

$$(P_{syst}/A)Wp = Cp \times \eta t \times \eta g \times \eta b \times \frac{1}{2} \times \rho \times V^3$$

C_p = koef. Daya

ηt = efisiensi transmisi

ηg = efisiensi generator

ηb = efisiensi baterai

ρ = massa jenis angin (kg/m^3)

V = kecepatan angin (m/s)

Koefisien daya (Power coefficient) :

$$Cp = \frac{P}{P_0} = \frac{\frac{1}{4} \rho A (v_1^2 - v_2^2) (v_1 + v_2)}{\frac{1}{2} \rho A V^3}$$

$$Cp = \frac{P}{P_0} = \frac{1}{2} \left[\left[1 - \left(\frac{v_2}{v_1} \right) \right] \left[1 + \frac{v_2}{v_1} \right] \right]$$

P = daya rotor (watt)

P_0 = daya angin (watt)

ρ = massa jenis angin (kg/m^3)

V_1 = kecepatan angin bagian depan bilah (m/s)

V_2 = kecepatan angin bagian belakang bilah (m/s)

A = luas penampang sudu atau bilah (m^2)

Menghitung Tip speed ratio (TSR) :

$$\lambda = \frac{\pi D}{v} \dots\dots\dots (2.5)$$

λ = tip speed ratio

D = diameter kincir angin (m)

V = kecepatan angin (m/s)

Daya yang dihasilkan turbin angin :

$$Pr = Cp \frac{1}{2} \rho V^3 D^2 \dots\dots\dots (2.6)$$

Pr = daya kincir angin (watt)



C_p = koef. Daya

ρ = massa jenis angin (kg/m^3)

D = diameter kincir angin (m)

V = kecepatan angin (m/s)

Penentuan torsi :

$$\mathbf{T} = \frac{30 P}{\pi \cdot \text{RPM}} \dots\dots\dots (2.7)$$

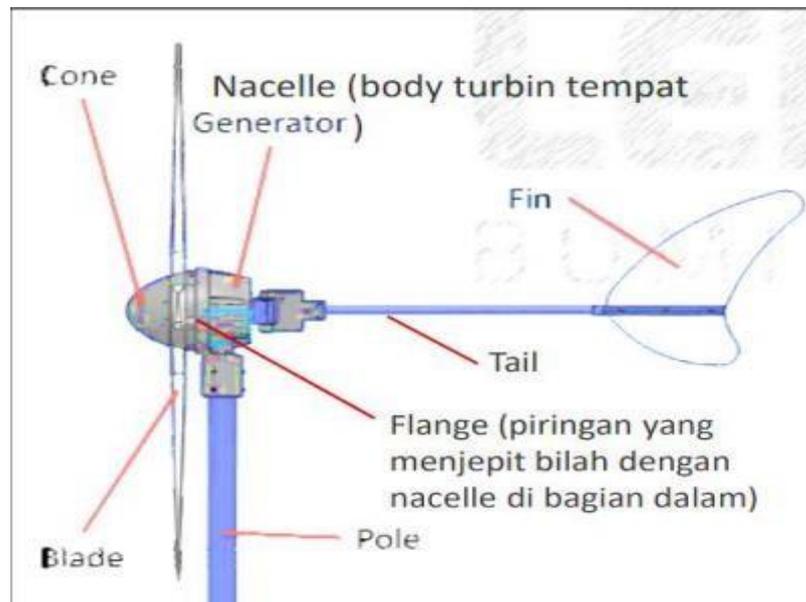
T = torsi (N.m)

P = daya rotor (watt)

RPM = kecepatan putar permenit

2.4 Turbin Angin

Turbin angin atau yang disebut pula dengan kincir angin, adalah merupakan alat yang dipergunakan untuk menangkap energi angin yang berupa gerak translasi untuk diubah menjadi gerak rotasi dan merupakan sarana pengubah energi kinetik menjadi energi mekanik. Berikut adalah skema turbin angin dapat dilihat pada gambar berikut.



Gambar 2.1 Wind Turbine The Sky Dancer – 500

(Lentera Angin Nusantara, Energi Angin, 2014)



1. Cone : alat untuk melindungi bagian dalam turbin dari pengaruh luar seperti, generator.
2. Blade : bagian untuk menangkap angin atau bisa disebut komponen yang mengubah energi angin menjadi energi gerak agar generator berputar.
3. Nacelle : body turbin tempat meletakkan generator dan tempat meletakkan tail dari turbin.
4. Tail : penghubung bagian turbin dengan ekor.
5. Fin : alat untuk mengarahkan turbin ke arah datangnya angin.

2.5 Pengontrolan daya turbin angin

Umumnya dalam perancangan turbin angin, terdapat beberapa parameter yang harus diperhitungkan, yaitu kecepatan cutin, kecepatan rating dan kecepatan cut-off yang merupakan kecepatan dimana turbin angin harus berhenti beroperasi untuk menghindari kerusakan akibat kecepatan angin yang melewati turbin angin melebihi batas ketahanan turbin. (Piggott Hugh, 2005)

2.5.1 Pasive Stall Control

Lengkungan dan ketebalan baling-baling rotor yang dibentuk sedemikian rupa akan menyebabkan turbulensi pada balingbaling ketika kecepatan angin melebihi bataskecepatan yang ditentukan. Turbulensi ini akan menyebabkan energi angin yang ditransfer menjadi kecil saat kecepatan angin tinggi. (Notosudjono, 2017).

2.6 Bilah

Bilah turbin mengonversikan energi kinetik dari angin menjadi energi mekanik untuk memutar generator dan menghasilkan energi listrik. Bilah turbin yang efisien dan efektif secara aerodinamika dibutuhkan untuk menghasilkan daya maksimal PLT-Angin.



2.7 Generator

Generator yang digunakan pada turbin angin LBN adalah Permanent magnet synchronous generator (PMSG), yakni generator yang eksitasinya dilakukan sendiri (self-excitation) dengan menggunakan magnet permanen. Magnet permanen pada generator ini terdapat pada rotornya.

Generator bekerja menggunakan hukum lorentz, yang berbunyi:

“Gaya akan dihasilkan oleh arus listrik yang mengalir pada suatu penghantar yang berada diantara medan magnetik”

Atau bisa dirumuskan sebagai berikut:

$$\mathbf{F} = \mathbf{B} \cdot \mathbf{q} \cdot \mathbf{v} \text{ atau } \mathbf{F} = \mathbf{B} \cdot \mathbf{i} \cdot \mathbf{l} \dots\dots\dots (2.8)$$

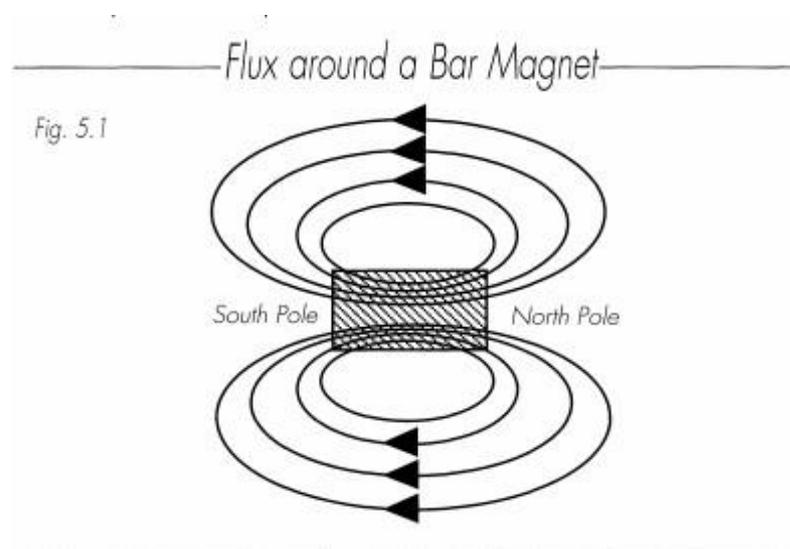
I = arus listrik(ampere)

L = panjang kawat listrik

B= medan magnet

2.7.1 Magnet

Magnet punya dua kutub, utara dan selatan. Flux keluar dari kutub utara dan mencari jalan untuk kembali ke kutub selatan



Gambar 2.2 Arah fluks magnet di medan magnet



Ini adalah sirkuit magnetik. Flux menyukai besi, logam, dan material magnetik lainnya. Flux tidak hanya mendekati mereka, tetapi juga jumlah flux di dalam sirkuit magnetik bisa menjadi jauh lebih besar jika sirkuit tersebut terbentuk dari material tersebut.

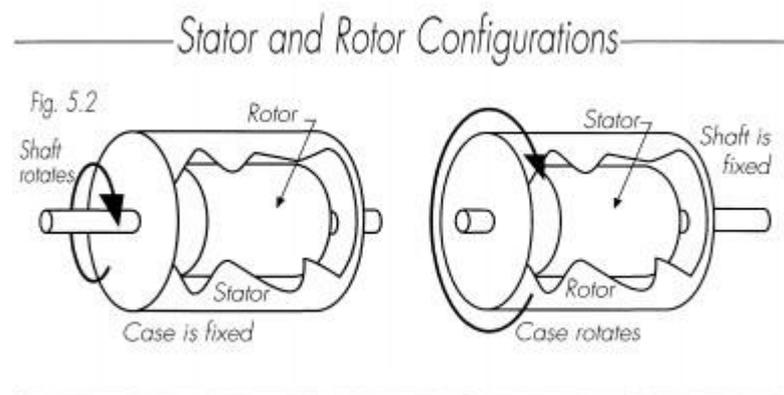
2.7.2 Kumputaran

Generator juga mengandung kumputaran dari kawat tembaga, sering juga disebut belitan. Kawat tembaga diselubungi dengan pelapis tipis, yang menginsulasi tiap putaran dari kawat dari sekelilingnya. Sebuah kumputaran juga biasanya dibelitkan pada 'pembentuk lilitan' dari kayu, setelah itu dilepas, dimasukkan ke dalam mesin, dan diberikan resin untuk membentuk gumpalan padat. Kumputaran bisa jadi satu dari dua tipe berikut:

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

2.7.3 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 2.3).



Gambar 2.3 gambar stator dan rotor



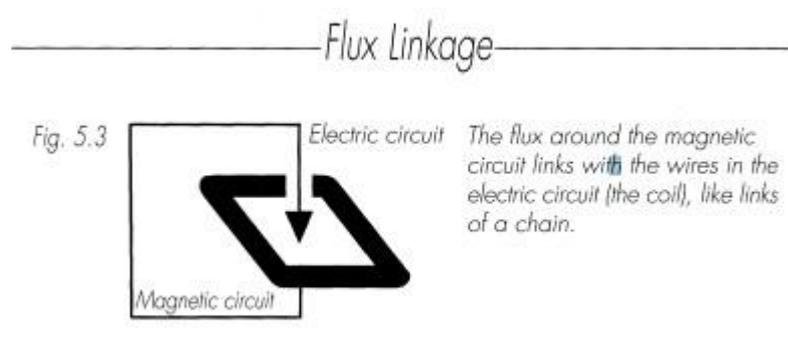
Walaupun begitu, susunan sebaliknya juga memungkinkan, dan faktanya hal tersebut cukup biasa dalam konteks kincir angin. *Shaft*-nya diam, dan *case*-nya berputar. Susunan ini disebut sebagai '*case driven*' yang berkebalikan kepada bentuk konvensional '*shaft driven*'. Jika kincir angin tidak mau memiliki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

2.7.4 Flux memotong kawat

Magnet dan kumparan di generator telah dikonfigurasi dalam cara tertentu sehingga flux magnet menembus kumparan (Gambar 2.3).

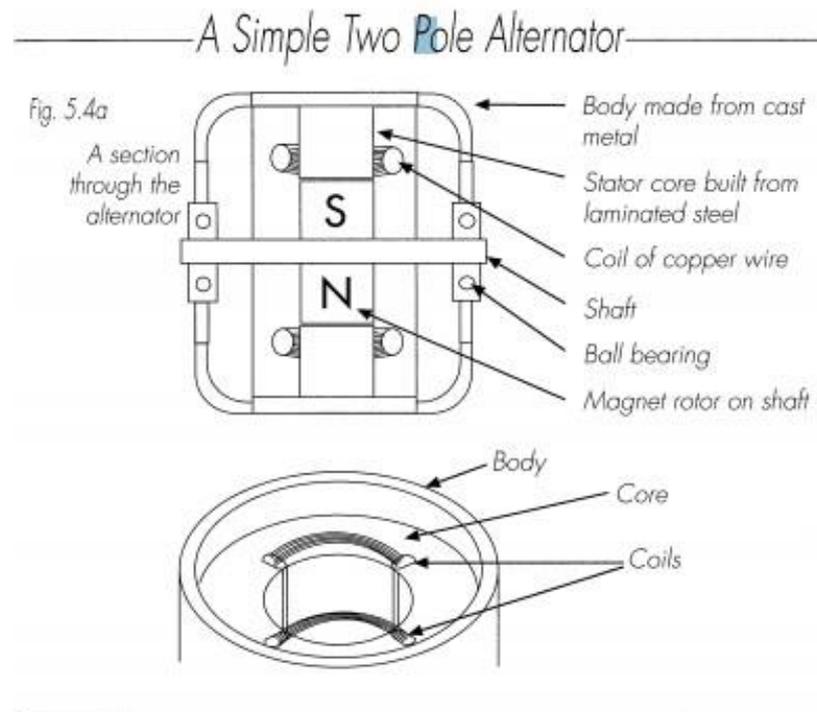


Gambar 2.4 flux linkage

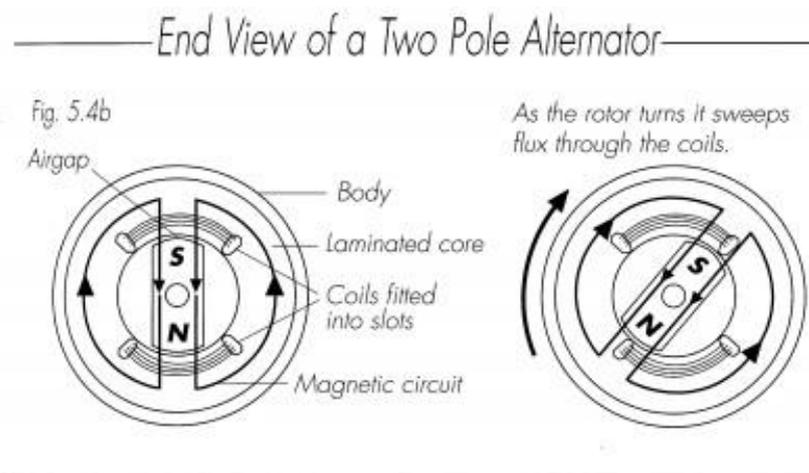
Dengan kata lain, sirkuit magnetik dan sirkuit elektrik berhubungan satu sama lain. Di satu posisi dari rotor, flux magnetik yang menembus kumparan terkonsentrasi dalam satu arah. Saat rotor bergerak, flux yang menembus kumparan melemah sampai nilai nol dan berganti arah sepenuhnya. Flux mengalir di 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



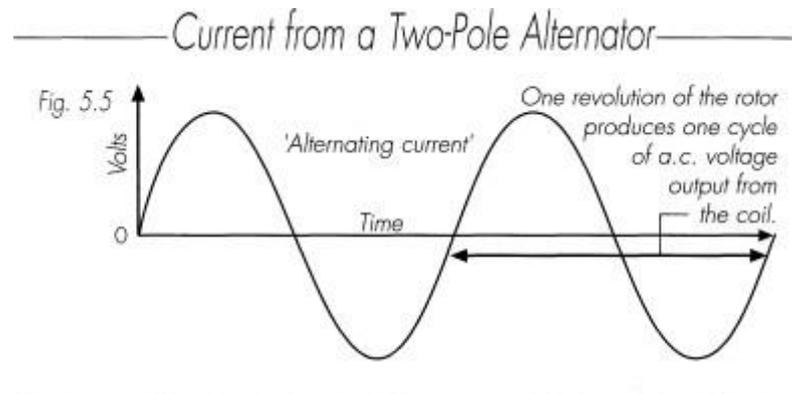
Gambar 2.4a menunjukkan alternator 2 pole yang simpel. Shaft membawa magnet yang berputar, sehingga membawa flux dapat melewati kumparan yang menempel di inti stator (gambar 2.4b)



Gambar 2.4a



Gambar 2.4b



Gambar 2.5 Tegangan Generator

2.7.5 Memaksimalkan flux 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.

2.7.6 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:

- 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.



- 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

2.7.7 Kontruksi Generator Sinkron

Pada generator sinkron, medan magnet pada rotor diproduksi dari disain rotor permanent magnet atau dari menggunakan arus DC pada lilitan rotor untuk membuat elektromagnetik. Rotor pada generator digerakkan dengan penggerak mula, untuk menghasilkan medan magnet putar pada mesin. Perputaran 3 fasa menghasilkan tegangan melau lilitan stator pada generator.

Dua istilah yang biasanya digunakan untuk menjelaskan lilitan adalah Field Winding dan Armature Winding. Secara umum, istilah field winding digunakan untuk menghasilkan belitan medan magnet pada mesin. Dan istilah armature winding digunakan untuk belitan dimana tegangan di induksikan. Untuk mesin sinkron field winding pada rotor. Atau dengan istilah rotor winding, dan field winding digunakan untuk pertukaran yang cepat.

Magnet pada pole di rotor bisa di menerapkan salah satu dari 2 buah model yaitu Salient Pole dan Non-Salient Pole

2.7.8 Kecepatan Putar dari Geneartor Sinkron

Generator sinkron secara defenisi berarti sinkron bahwa frekuensi listrik yang dihasilkan terkunci atau tersinkronisasi dengan laju rotasi generator secara mekanis. Rotor generator sinkron terdiri dari magnet elektro dimana arus dipasok. Titik medan magnet rotor mengarah kearah mana rotor berputar. Sekarang, laju rotasi medan magnet mesin berhubungan dengan stator dengan persamaan :

$$f = (n.P)/120 \dots\dots\dots (2.9)$$

f = frekuensi(Hz) P = jumlah kutub

n = kecepatan putar(RPM)



Karena perputaran rotor pada kecepatan yang sama dengan medan magnet, persamaan ini menghubungkan kecepatan rotasi rotor dengan frekuensi listrik dihasilkan. Tenaga listrik dihasilkan pada kecepatan 50 atau 60 Hz, sehingga generator harus berputar pada kecepatan tetap tergantung pada jumlah pole pada mesin. Misalnya untuk menghasilkan tenaga 60 Hz pada mesin 2 kutub, rotor harus berputar pada 3600 RPM. Untuk menghasilkan tenaga 50 Hz, rotor harus berputar pada 1500 RPM. tingkat rotasi yang dibutuhkan selalu dapat dihitung dari persamaan di atas.

2.8 Permanent Magnet Synchronous Generator

Generator sinkron magnet permanen atau Permanent Magnet Synchronous Generator (PMSG) adalah generator yang medan eksitasinya dihasilkan oleh magnet permanen bukan kumparan sehingga fluks magnetik dihasilkan oleh medan magnet permanen. Istilah sinkron disini merujuk pada fakta bahwa rotor dan medan magnet berputar dengan kecepatan yang sama karena medan magnet dihasilkan melalui magnet permanen yang terpasang pada permukaan ataupun tertanam pada rotornya.

Permanent Magnet Synchronous Generator (PMSG) yang biasa dipakai pada pembangkit listrik tenaga bayu (PLTB) bekerja mengubah torsi (T) dan kecepatan putar rotor (ω) yang diterimanya dari blade menjadi nilai tegangan (V) dan arus (I). Hasil keluaran dari generator ini berupa listrik AC 3 fasa.

2.9 Kelebihan dan Kekurangan Generator Sinkron Magnet Permanen

PMSG mempunyai keuntungan secara ekonomi dan teknik, sehingga PMSG sering dipakai sebagai generator turbin angin. Keuntungannya meliputi:

2.9.1 Kelebihan

- a. Desain yang sederhana.
- b. Umur generator lebih awet (reliable)
- c. Efisiensi dan energi yang dihasilkan lebih tinggi.
- d. Tidak membutuhkan sumber arus listrik DC dari luar untuk membangkitkan medan magnet.



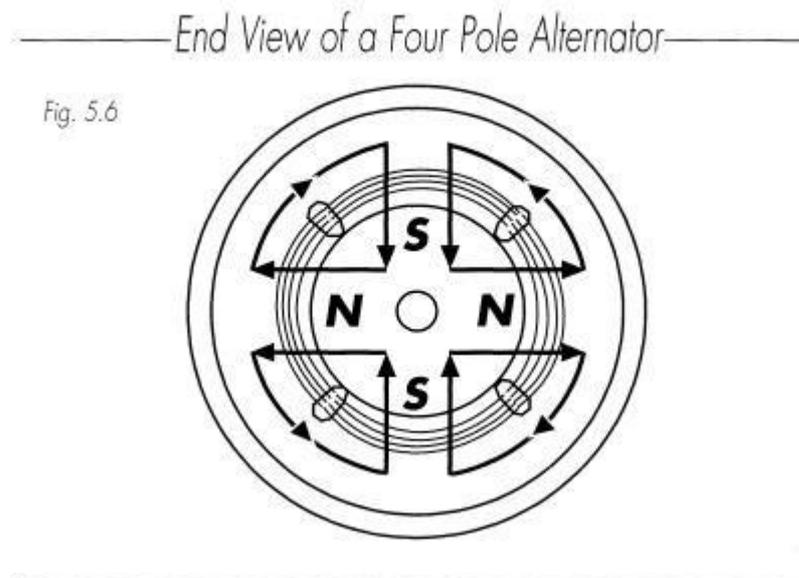
- e. Perubahan karakteristik efisiensi dan panas dari mesin karena tidak adanya rugi-rugi medan.
- f. Keandalan yang lebih tinggi karena tidak digunakannya slip rings

2.9.2 Kekurangan

- a. Tidak efisien jika menggunakan magnet permanen dengan produksi fluks magnet rendah.
- b. Pembangkitan daya listrik terbatas sejauh kemampuan magnet dalam membentuk medan magnet, sehingga tidak cocok digunakan dengan skala besar.

2.10 Mesin banyak pole

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

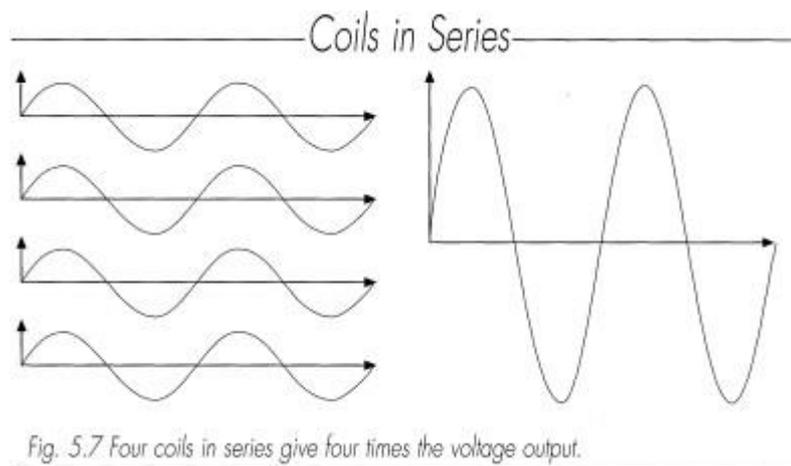


Gambar 2.6 alternator (generator) 4 pole



2.10.1 Frekuensi

Jika terdapat 2 pole (Gambar 5.5), 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).

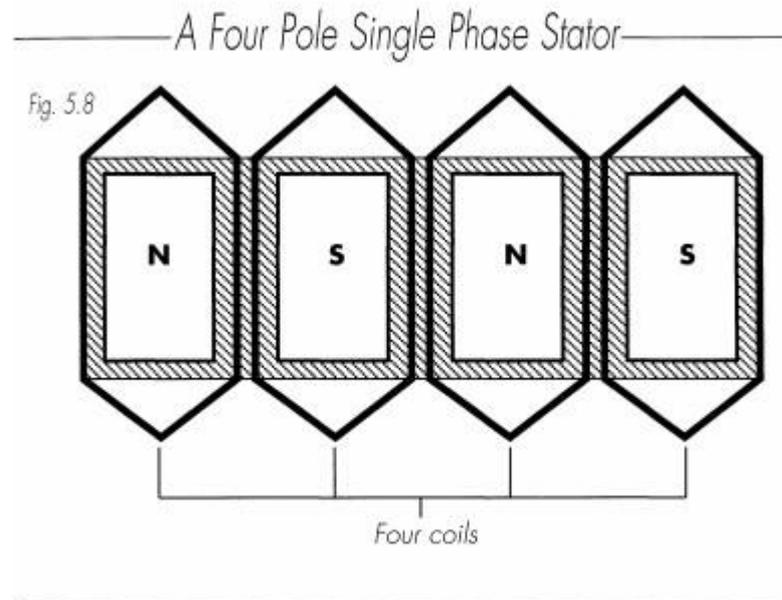


Gambar 2.7 gelombang tegangan

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.

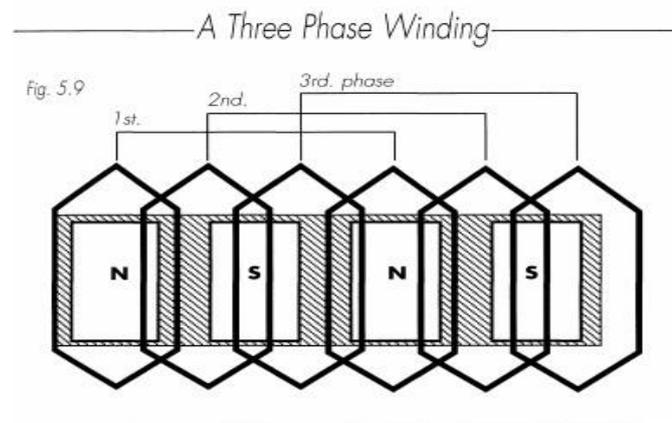
Jika kita melakukan suplai kepada beberapa jumlah sirkuit, atau jika sumber tersebut tujuannya untuk dikonversi ke DC untuk pengecasan baterai, maka lebih sering dipilih menggunakan generator tiga fasa, dengan tiga set kumparan, semuanya memproduksi listrik AC dengan voltase dan frekuensi yang sama, 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 2.8 stator dari mesin 4 pole

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 2.9 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 2.10), kita menemukan bahwa semua sinyal memberikan voltase yang sama dengan frekuensi yang sama, tetapi mereka berbeda langkah satu sama lain (beda fasa)

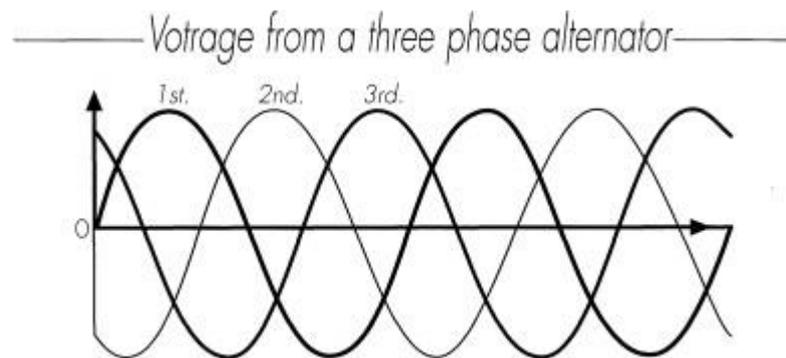


Fig. 5.10 How the voltage from each of the three phases varies with time.

Gambar 2.10 gelombang generator 3 fasa

Sekarang kita memiliki total dari 6 kumparan ('tails') yang keluar dari satu mesin. Ada beberapa alasannya :

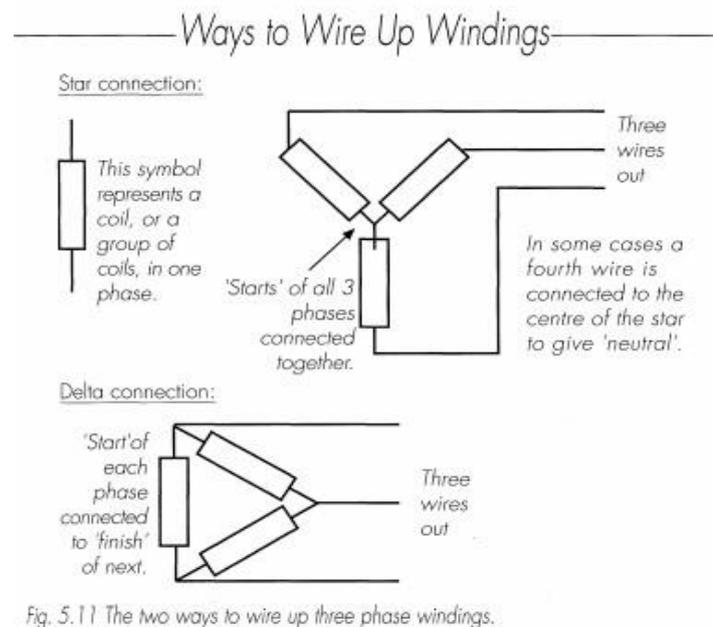
- Pada mesin satu fasa, semua kumparan ingin berada di tempat yang sama, dan ada area luas yang tidak terpakai. Kumparan tiga fasa membuat area luas itu lebih terpakai sehingga dapat membuat turbin angin lebih efisien.
- Mesin satu fasa memproduksi daya dalam bentuk *pulse* (gambar 5.5), dimana mesin tiga fasa tersebut memproduksi daya secara terus menerus (gambar 5.10). Ada getaran yang jauh lebih banyak. Artinya adalah turbin angin yang lebih tidak berisik
- Listrik AC tiga fasa dapat memanfaatkan kabel dengan lebih baik daripada sumber satu fasa berjumlah tiga buah yang terpisah (yang membutuhkan jumlah kawat tembaga yang lebih banyak dua kali lipat untuk pekerjaan yang sama). Hal ini tidak lebih penting untuk sistem



pengelasan baterai karena listrik DC memiliki rugi-rugi kabel yang lebih kecil daripada AC 3 fasa.

2.11 Koneksi Bintang dan Delta

Cukup biasa 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 2.11)



Gambar 2.11 hubungan bintang dan delta

2.12 Voltase

Voltase adalah dorongan yang menjalankan arus di sirkuit. Semua komponen dari sistem elektrik harus didesain untuk bekerja pada voltase yang sama (*rated voltage*). Kita biasa berpikir bahwa sumber listrik punya suatu nilai voltase, dan kita menerimanya secara gamblang bahwa voltase tersebut akan selalu konstan. Kita mungkin tidak menyadari bahwa mempertahankan kekonstanan voltase tersebut membutuhkan usaha juga.

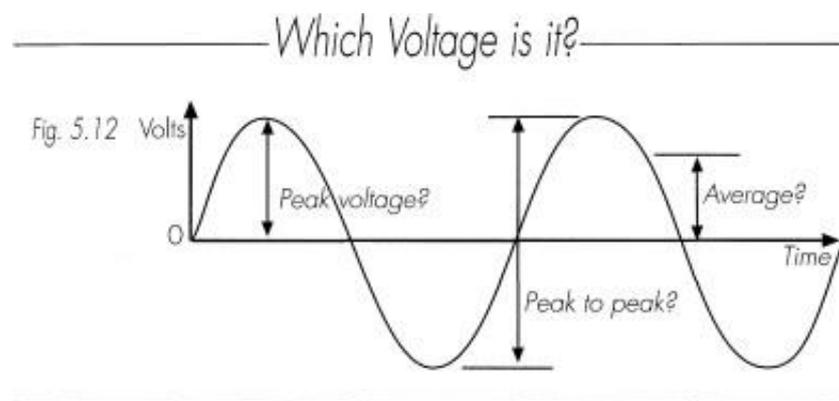
Voltase ditentukan dari kecepatan kumparan dilewati oleh flux. Voltase bisa ditingkatkan dengan meningkatkan :



- Kecepatan rotasi;
- Kekuatan flux;
- Jumlah putaran per kumparan

Tapi apa yang kita maksud dari voltase? Voltase bukanlah unsur yang simpel dengan sumber AC karena voltase terus berubah setiap waktu, turun ke nilai nol, berbalik arah, dan lain-lain. Voltmeter dapat memberikan kita pembacaan voltase yang cukup konstan, tetapi apa representasi nilai itu?

(Gambar 2.12)



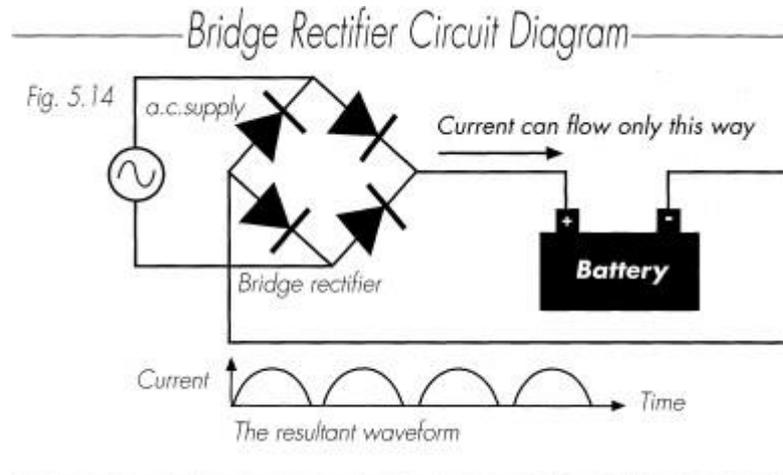
Gambar 2.12 Gelombang tegangan dc

Faktanya, pengukur akan menunjukkan voltase RMS. RMS adalah ‘root mean square’, yang merupakan nilai dari voltase DC yang dapat membnyalakan lampu dengan tingkat terang yang sama. Jika kita merencanakan untuk mengecas baterai dari sumber AC ini, maka voltase puncaknya (sekitar 40% lebih tinggi) juga bisa jadi penting.

2.13 Sumber DC

Mayoritas turbin angin kecil yang memproduksi listrik dipakai untuk mengecas baterai. Jika turbin angin memakai alternator, listrik AC harus dikonversi kepada DC dan dilakukan memakai devais semikonduktor bernama dioda, yang berperan sebagai katup satu arah untuk arus listrik. Beberapa dioda digabungkan

menjadi sirkuit bridge yang dapat dilihat di gambar 2.13. Bridge tiga fasa dapat dibuat memakai prinsip yang sama.



Gambar 2.13 Rangkaian recitifier

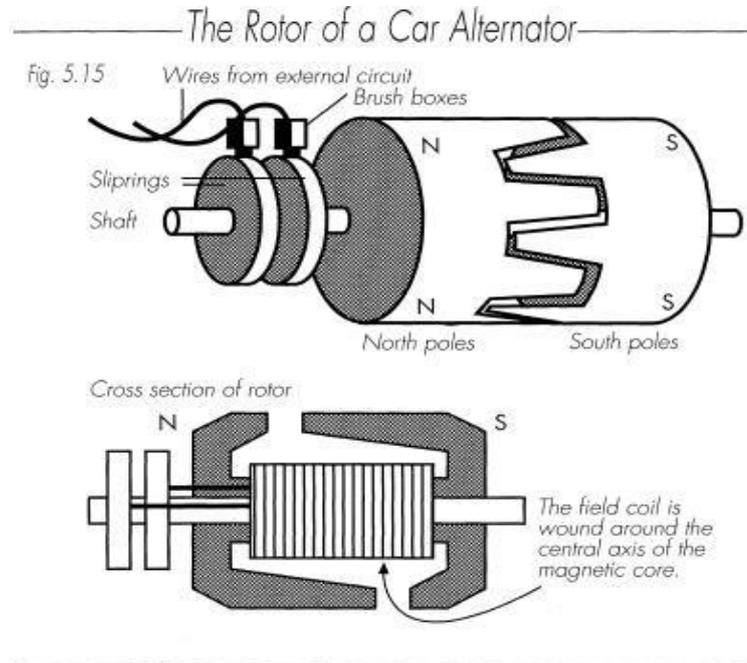
Saat arus melewati tiap dioda, terdapat drop voltase 0.7 volt. Untuk mengecas baterai, arus harus melewati dua dioda di *bridge*. Sehingga untuk mengecas baterai 12 volt, diperlukan input 13.4 volt. Sesuai yang kita lihat, sekitar 10% daya hilang di dioda. Penyearah *bridge* harus dipasang *heat sink* (sebuah alumunium dengan sirip) yang akan membuang panas buangan dan mencegah terbakarnya alat.

Arus mulai mengalir dalam *pulse* sesaat setelah voltase puncak melebihi voltase baterai ditambah voltase drop dari dioda. Saat voltase input naik, arus naik menjadi lebih kuat dan lebih stabil, terutama saat ada sumber tiga fasa.

2.14 Brush dan Slipring

kita telah melihat alternator magnet permanen dengan segala kumparan di stator. Kebanyakan generator dan motor juga mempunyai kumparan di rotor. Untuk mengkoneksikan kumparan kumparan itu ke sirkuit listrik eksternal, rotor tersebut biasa dilengkapi slipring. Slipring adalah permukaan tembaga halus yang dipasang kepada rotor dan diputar pada sebuah *lathe*. Kontak slide yang bernama *brush* menempel pada permukaan berputar dari slipring oleh per. Aslinya, susunan seperti brush memakai jalinan kabel yang baik, sekarang brush dibuat dari selemping karbon.

Contohnya, kumparan medan dari alternator mobil ada di rotor . Arus medan diberikan kepada kumparan lewat brush dan slipring.



Gambar 2.14 Rotor dari generator mobil lisrik

Arusnya juga melewati sirkuit regulator yang mencegah voltase outputnya melebihi batas aman maksimal voltase untuk pengisian baterai. Jika memakai magnet permanen, kita tidak membutuhkan brush, tetapi tidak ada kemungkinan untuk mengontrol outputnya jika memakai cara ini.

Brush akan rusak jika dipakai cukup lama, dan permukaan kontak dari slipring akan menjadi berbintik-bintik karena ulah dari percikan arus (terutama jika nilai arus terlalu tinggi atau terkontaminasi) sehingga generator tanpa brush lebih bisa diandalkan.

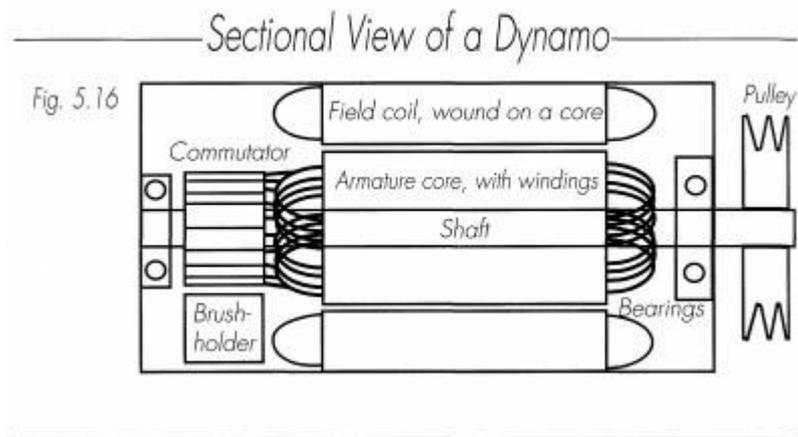
2.15 Komutator

Dahulu sebelum penyearah semikonduktor datang, sangat sulit mengecas baterai dari listrik AC. Kita harus memakai generator DC spesial yang bernama dinamo.

Tubuh dinamo (stator) membawa magnet untuk medan (gambar 2.15). Didalamnya ada rotor spesial yang bernama *armature*, yang memiliki banyak kumparan dan sebuah komutator. Cara memproduksi DC kuncinya ada di



komutator dan brush yang mengkoneksikan kumparan *armature* kepada sirkuit baterai eksternal.



Gambar 2.15 Komutator

Nama komutator benar-benar berarti *switcher* dan itulah yang benar-benar dilakukan. Kumparan-kumparan di *armature* dihubungkan kepada segmen segmen tembaga pada komutator. Brush diposisikan secara hati-hati relatif kepada pole medan pada posisi sehingga mereka pasti akan terkoneksi pada kumparan yang menembus flux pada hanya satu arah. Hasilnya adalah tegangan DC keluar dari mesin.

Komutator juga dipakai pada beberapa motor yang biasa disebut motor DC atau motor universal.

2.5.1 Mengganti Kecepatan Generator

Kecepatan generator adalah isu paling besar di desain turbin angin. Kebanyakan generator didesain untuk berputar terlalu cepat untuk bisa dipasangkan langsung ke rotor turbin angin secara sukses, namun ada beberapa cara yang bisa dipakai untuk mengurangi kecepatan operasi.

Kita bisa melihat bahwa voltase diproduksi dari kumparan dan tergantung kepada kecepatan, flux, dan jumlah putaran. Ada jumlah maksimal (saturasi) yang membatasi flux. Jadi untuk mengoperasikannya pada kecepatan rendah, kita harus bekerja di voltase yang lebih rendah, ubah hubungan kumparan dari paralel ke seri



(atau delta menjadi bintang) atau memakai jumlah putaran per kumparan yang lebih banyak.

Sedihnya, semua opsi itu mengurangi daya rated (maksimum) dalam watt, tanpa mengurangi rugi-rugi tembaga. Contohnya, kita bisa mengoperasikan alternator 24 volt pada kecepatan 2x lebih lambat sehingga mengecaskan baterai 12 volt. Tapi jika arusnya sama, kita hanya akan mendapatkan setengah daya, karena daya adalah voltase dikali arus. Rugi-rugi tembaga (karena efek aliran arus di belitan utama) akan sama saja nilainya. Rugi-rugi tembaga sekarang dua kali lebih besar dari fraksi dari daya output, sehingga efisiensi turun.

Jika kita mau menjaga efisiensinya saat mengurangi kecepatan, kita butuh memotong arus dan voltasenya. Daya rated lalu berkurang senilai akar dari pengurangan kecepatan rated. Pada setengah dari kecepatan, kita mendapatkan seperempat. Inilah pengorbanan operasi kecepatan rendah; kita butuh generator lebih besar yang berelasi dengan daya output. Tidak terlalu penting seberapa berat generator itu jika sudah kita taruh di udara, tetapi efisiensinya sangat penting. Jadi di banyak kasus, berat berlebih generator cukup layak.

Pada contoh di atas kita mengubah voltase untuk mendapatkan operasi dengan kecepatan yang dikurangi. Kita bisa juga mengubah jumlah putaran per belitan atau pola penggabungan belitan (menjadi seri atau bintang) untuk mengembalikan voltase awal, tetapi hal ini membuat resistansi internal menjadi lebih tinggi dan arus tersebut harus dikurangi dengan faktor yang sama, sehingga tidak ada kenaikan daya output. Alasan untuk melakukan perubahan itu adalah menjaga kompatibilitas dengan beberapa voltase baterai sembari bekerja dengan kecepatan lebih rendah (dan daya lebih rendah)

Jika ada juga kumparan medan, rugi-rugi konstan akan menjadi lebih signifikan dan rating daya akan berkurang, sehingga sebaiknya tidak memodifikasi generator untuk menjadi generator kecepatan rendah kecuali generator itu dari awal sudah memiliki efisiensi yang baik.



2.16 Komutator

Berikut tipe dari generator yang ada

2.16.1 Alternator Mobil dan Dinamo

Alternator mobil sangat populer untuk pejuang tenaga angin yang baru. Mereka selalu siap sedia, mereka punya rating daya yang cocok, dan mereka didesain untuk mengecras baterai. Namun, mereka tidak ideal untuk turbin angin. Efisiensi jika tidak beban penuh sangat buruk karena mereka butuh arus di kumparan medan. Alternator mobil modern dibuat murah, ringan, dan kecepatan tinggi.

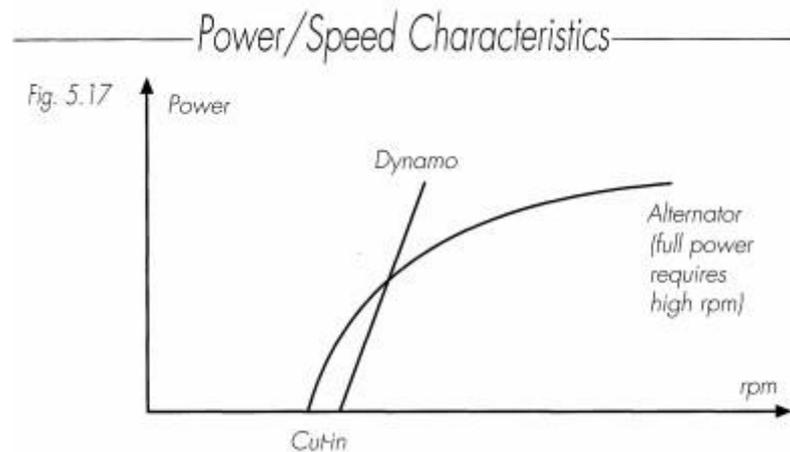
Dinamo juga membutuhkan arus medan tetapi mereka bisa menjadi pilihan baik untuk turbin angin, jika kita bisa menemukan yang cukup tua. Hal ini terkesan aneh, tetapi dinamo tua didesain untuk operasi kecepatan lebih rendah, dengan penekanan kepada efisiensi daripada kepada daya maksimum. Untuk turbin angin *direct drive*, kita membutuhkan dinamo yang besar dan berat (20kg untuk 300W). Kita membicarakan tentang peralatan tua, dan mereka sulit ditemukan.

Fakta Penting tentang Dinamo dan Alternator Mobil

Alternator mobil dan dinamo tereksitasi sendiri, yang artinya pada kecepatan tertentu yang membuat mereka mulai bekerja (*cut in*), mereka mengeksitasi medannya sendiri. Pada kedua kasus, kumparan medan terkoneksi paralel dengan keluaran. Mulai bekerjanya (*cut in*) alat ini terjadi secara spontan. Magnet memiliki kekuatan magnet *remanent* yang lemah, sehingga memproduksi voltase yang kecil. Hal ini memproduksi arus yang kecil yang memperkuat medan yang ada dan memproduksi arus yang lebih banyak, sehingga voltasenya meningkat. Voltase penuh dicapai sekitar satu detik. Alternator tidak mulai bekerja dengan mudah. Kumparan medan seringkali butuh arus kecil yang disediakan melewati lampu indikator .

Di atas kecepatan *cut in*, arus keluaran dinamo naik secara curam sembari naiknya kecepatan. Keluaran maksimal dicapai pada kecepatan realistis untuk

tenaga angin, dinamo dengan alternator kita butuh untuk mencapai tiga sampai empat kali kecepatan *cut in* sebelum keluaran *rated* bisa dicapai (Gambar 2.16)



Gambar 2.16 Karakteristik Daya terhadap kecepatan putar

Alternator mobil sebenarnya membatasi arusnya sendiri (dengan reaktansi induktif pada kumparan), yang berarti bahwa (jika didinginkan dengan benar) mereka hampir tidak mungkin mengalami *overload* (beban berlebih), dimana dinamo akan terbakar jika diminta bekerja terlalu keras. Rotor dari alternator juga bisa bertahan hidup pada kecepatan yang sangat tinggi, yang bisa saja menghancurkan *armature* dinamo.

Dinamo tua punya *bearing* yang luar biasa, sehingga kita bisa memasang rotor besar (2 s.d. 3 diameter) langsung kepada *pulley* dengan nyaman. *Bearing* dari alternator mobil kurang baik.

Tidak ada perbedaan esensial diantara dinamo dan motor listrik. Arus akan mengalir dari baterai kepada dinamo dan memutar turbin angin pada kecepatan tenang kecuali dioda penghambat (*blocking diode*) dipasang untuk mencegah arus *reverse*. Alternator tidak bisa langsung dijadikan motor, dan arus *reverse* diblok oleh *rectifier* (penyearah).

Dinamo tidak memperdulikan terminal mana yang positif atau negatif (polaritasnya). Dinamo mempelajari polaritasnya saat mengkoneksikannya kepada baterai dengan memutarnya atau menyalakan sirkuit medannya. Alternator akan terkena kerusakan parah jika kita mengkoneksikannya pada polaritas salah.



Alternator tidak memperdulikan arah mana kita memutar mereka (kecuali kipas pendingin mereka). Dinamo hanya akan bekerja pada satu arah. Dinamo tersebut akan berputar sebagai motor pada arah yang sama. Kita bisa membalikkan arah rotasinya dengan membalikkan polaritas kumparan medan (menukar kumparannya).

Dinamo hampir tidak bersuara saat beroperasi, namun alternator akan membuat adanya kebisingan *humming*.

2.16.2 Alternator Magnet Permanen

Alternator magnet permanen punya karakteristik yang mirip dengan alternator mobil kecuali mereka tidak memiliki kumparan medan. Mereka lah pilihan paling tepat untuk generator untuk turbin angin skala kecil karena mereka simpel dan efisien. Magnet di rotor tidak butuh brush atau slipring, sehingga bagian yang bisa rusak karena waktu hanyalah bearing. Tidak ada syarat untuk arus agar bisa mengeksitasi medan, sehingga rugi-rugi ada pada nilai minimal pada kecepatan angin yang rendah.

Masalahnya adalah mereka sulit ditemukan. Ada beberapa sumber yang mungkin (dan kekurangannya):

- *Exciter* untuk generator sinkron *brushless* (mahal);
- Sepeda dan alternator sepeda motor (daya *rating* rendah). Sepeda cukup berguna untuk turbin angin yang sangat kecil (5 Watt), karena mereka punya kecepatan operasi yang rendah. Alternator sepeda motor didesain untuk kecepatan yang tinggi, tetapi tidak bisa diadaptasi dengan mudah untuk *drive* langsung;
- Merek Mighty Midget dari pengelas (biasa didemagnetisasi dengan mudah);
- Manufaktur Cina dari turbin angin kecil. Coba cari di internet. Murah tetapi *tricky* dihadapi.

2.17 Motor digunakan sebagai generator

Seperti yang kita telah sebutkan di atas, motor dan generator sangatlah mirip dan seringkali dapat menggantikan satu sama lain dengan modifikasi kecil atau bahkan tidak ada modifikasi. Faktanya, motor selalu memproduksi voltase saat



mereka berputar. Voltase ini dinamakan back emf, dan lebih kecil dari voltase sumber, sehingga efek totalnya adalah arus tetap mengalir dari sumber kepada motor. Saat motor mempercepat dirinya, back emf naik dan arus sumber turun, sehingga motor diregulasikan kepada kecepatan yang ditentukan sumber voltase.

Perbedaan diantara menjadi motor dan menjadi generator hanyalah urusan kecepatan. Katakanlah kita mengkoneksikan dinamo kepada baterai 12 volt. Akan ada cut in speed yang sama dengan saat mesin yang sama memproduksi tepat 12 volt. Paksalah mesin itu untuk merotasi lebih cepat dan mesin akan memproduksi lebih banyak emf, menyebabkan arus mengalir kepada baterai. Membuatnya melambat dan memproduksi arus yang lebih rendah kepada baterai sehingga disebut motor.

Prinsip yang sama berlaku untuk motor AC. Faktanya, kebanyakan turbin angin besar terkoneksi ke sistem kelistrikan memakai motor induksi (lihat lebih banyak nanti) sebagai generator. Jika ada angin kecepatan rendah, mesin akan bergantian fungsi antara menjadi motor dan menjadi generator dengan cukup natural dan halus. Sistem kontrol turbin angin mengoneksikan dan memutus koneksinya dari sistem listrik pada kecepatan angin yang dipilih untuk keuntungan terbesar.

2.18 Motor Magnet Permanen

Wiper kaca mobil dan motor pada kipas di mobil utamanya tipe komutator dengan magnet permanen. Kecepatannya secara umum terlalu tinggi untuk dipakai tenaga angin, tetapi turbin angin mainan bisa dibuat dari mereka dengan aplikasi voltase rendah. Motor starter biasanya punya magnet permanen pada zaman ini, tetapi brush hanya didesain untuk operasi jarak pendek. Motor starter yang lebih tua punya kumparan medan seri yang tidak cocok dengan turbin angin.

Terdapat Motor DC magnet permanen yang lebih besar tersedia, dengan kecepatan lebih rendah dan efisiensi lebih baik. Kebanyakan mereka punya komutator dan bersikap hampir sama seperti dinamo. Jika motor tersebut tersedia pada harga yang lebih rendah (mungkin dari mesin pencuci bekas) lalu kita bisa



memakainya pada turbin angin. Cobalah untuk mencegah arus tinggi yang akan membakarnya atau merusak komutator.

2.19 Diameter Celah Udara

Bentuk terbaik untuk alternator kecepatan rendah adalah 'gendut'. Udara yang dideskripsikan dari celah udara harus besar. Dengan menambah diameter, kita menambah kecepatan yang membuat magnet menembus kumparan. Hal ini memperbaiki efisiensi untuk berat magnet dan koil yang sama, pada kecepatan yang diberikan.

Batas dari membuat alternator ini 'gendut' datang saat rotor tidak bisa dibuat cukup rigid untuk mencegah kontak dengan stator. Gaya magnet, gaya gyro, dan bearing yang buruk berkontribusi untuk risiko ini. Frekuensi operasi juga membatasi diameter.

2.20 Jumlah Pole

Jika diameter celah udara besar, ada ruang untuk banyak pole. Pilihan kita tentang jumlah pole cukup sembarang, karena ada beberapa pole lebar yang akan mendorong flux sedikit lebih banyak menembus kumparan daripada pole yang sempit. Pada setiap alternator, ada batas optimumnya, tergantung faktor faktor ini:

- Frekuensi tergantung kepada jumlah pole. Frekuensi lebih besar (lebih banyak pole) cukup membantu jika kita mau memakai transformator, tetapi berhujung kepada rugi-rugi besi yang lebih tinggi;
- Rugi-rugi tembaga tergantung kepada lebar kumparan dan lebih kecil jika pole lebih kecil;
- Beberapa flux gagal menembus stator tetapi loncat kepada pole sebelah. Jumlah flux yang bocor ini terjadi saat pole lebih banyak dan celah udara lebih besar;
- Sirkuit magnetik harus dibuat lebih berat agar bisa membawa lebih banyak flux tanpa terjadi saturasi, jika muka dari permukaan pole cukup besar



2.21 Bentuk kumparan

Kumparan sebaiknya berbentuk sehingga setiap pole menembus kumparan, kebanyakan flux akan terhubung lewat itu. Ketebalan kumparan akan bergantung kepada sisa tempat yang tersedia. Contohnya, kumparan di air gap alternator akan sama dengan ketebalan dari stator disk. Kumparan di inti terlamnasi harus didesain untuk cocok dengan slot, with due allowance for insulating liners. Jika kumparannya saling menindih (seperti kumparan tiga fasa) kita harus menyediakan slack yang cukup untuk ini.

2.22 Ketebalan Kawat

Pakailah kawat tertebal yang bisa masuk ke ruang yang tersedia, untuk meminimasi rugi-rugi tembaga. Jika kawat tebalnya terlalu kaku, kita bisa memakai dua atau lebih kawat yang lebih tipis dan dikumpulkan bersama.

Tidak seperti kabel, kawat belitan tidak punya arus spesifikasi yang bisa mereka bawa tanpa terjadi overheat. Hal ini karena pendinginan bergantung hanya kepada geometri kumparan. Dimana stator punya permukaan besar dan ventilasi yang baik, maka stator itu bisa mendisipasikan lebih banyak panas sebelum temperatur dimana insulasinya rusak.

Pakailah formula untuk memprediksi rugi-rugi tembaga di kawat (Lihat Appendix) untuk mengestimasi persenan dari daya yang hilang di kumparan. Cek bahwa efisiensinya bisa diterima (misalnya 50%). Kita juga bisa mengecek berapa banyak arus yang bisa diterima stator, dengan melewatinya dengan arus pada sebuah pengetesan, dan mengukur kenaikan temperaturnya. Pada turbin angin, pendinginan biasanya lebih baik. air box adalah rongga yang berada paling luar dari generator.

2.23 Prinsip Kerja PMSG

PMSG memiliki prinsip kerja yang sama dengan generator sinkron tetapi pada rotornya kumparan medan diganti dengan magnet permanen. PMSG menghasilkan flux pada kutub-kutub rotor yang memotong kumparan jangkar

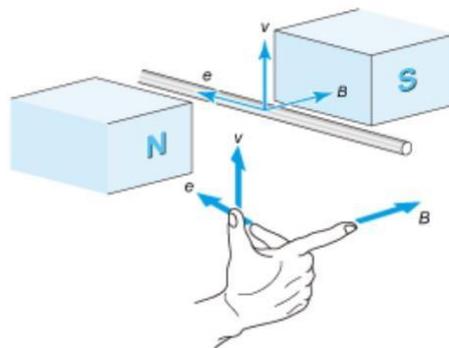


sehingga menghasilkan GGL bolak-balik pada ujung stator sehingga kumparan jangkar pada stator menghasilkan tegangan induksi.

Rotor merupakan bagian berputar yang ada pada generator. Pada PMSG, rotor merupakan tempat tersusunnya magnet permanent sebagai pembangkit medan magnet yang diperlukan untuk pembangkit listrik. Induksi elektromagnetik yang ada pada PMSG menggunakan hukum fareday yang berbunyi “adanya perubahan fluks magnetik yang melingkupi suatu kumparan akan menimbulkan GGL pada kumparan tersebut”. Tidak hanya hukum faraday, pada PMSG ini digunakan hukum lenz yang berbunyi “GGL induksi yang muncul berlawanan arah dengan perubahan fluks menyebabkan arus mengalir”.

2.23.1 Kaidah Tangan Kanan Fleming

Kaidah tangan kanan fleming adalah sebuah metode mneumonik untuk memudahkan menentukan arah vektor dari ketiga komponen hukum faraday, yakni arah gaya gerak kumparan kawat, arah medan magnet, serta arah arus listrik.



Gambar 2.17 Kaidah Tangan Kanan Fleming

Rumus dari tangan kanan fleming adalah :

$$\epsilon = \mathbf{b} \cdot \mathbf{l} \cdot \mathbf{V} \dots\dots\dots (2.10)$$

Keterangan :

B = kuat medan magnet (Tesla)

L = panjang kawat (m)

v = kecepatan sudut (rpm)



2.23.2 Fluks Magnetik

Fluks magnetik adalah ukuran atau jumlah medan magnet (B) yang melewati luas penampang tertentu. Satuan fluks magnetik adalah weber (Wb). Fluks magnet yang melalui bidang tertentu melewati bidang tertentu sebanding dengan jumlah medan magnet yang melalui bidang tersebut.

Rumus fluks magnetik yaitu :

$$\phi_{\max} = B_{\max} \cdot A \quad (2.11)$$

Keterangan :

ϕ_{\max} : fluks magnet (Wb)

B_{\max} : densitas fluks maksimum (T)

A : luas magnet (m²)

2.23.3 Kecepatan putar rotor

Generator untuk dapat menghasilkan tegangan dan arus harus dapat berputar dengan kecepatan tertentu. Kecepatan putar generator mempengaruhi tegangan dan arus yang dihasilkan. Rumus kecepatan putar rotor tersebut yaitu :

$$n = \frac{120 F}{P} \quad (2.12)$$

Keterangan :

n = kecepatan putar (rpm)

F = frekuensi (Hz)

Pada software magnet kecepatan putar (rpm) harus dirubah menjadi kecepatan angular menggunakan rumus tersebut.

$$\Omega = \frac{360^\circ}{60 s} \times n \quad (2.13)$$

Keterangan :

Ω = angular (deg/s) dan n = kecepatan putar rotor (rpm)

2.23.4 Daya Input

Daya input pada generator dihasilkan dari torsi dan kecepatan putar pada rotor dapat dirumuskan :



$$P_{IN} = \omega \times T \dots\dots\dots(2.14)$$

Keterangan :

P = Daya input

T = Torsi (Nm)

ω = Putaran (rpm)

2.23.5 Daya Output

Rumus Daya output pada generator ini adalah :

$$P_{OUT} = V \times I \dots\dots\dots(2.15)$$

Keterangan :

P = Daya output (watt)

V = Tegangan (volt)

I = Arus (ampere)

2.23.6 Efisiensi

Mutu sebuah generator sangat ditentukan oleh besarnya efisiensi generator tersebut. Makin besar efisiensi sebuah generator maka generator tersebut makin bagus. Efisiensi ini dihitung berdasarkan perbandingan antara daya keluaran generator terhadap daya masukan awal generator yang dapat dijabarkan sebagai berikut :

$$\text{Efisiensi}(\eta) = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100 \% \dots\dots\dots(2.16)$$