

B A B I V
G E N E R A T O R

4.1. Dasar Elektromagnet

Medan magnet berperan sangat penting sebagai rangkaian proses konversi energi.. Melalui medan magnet, bentuk energi mekanik dapat diubah menjadi energi listrik. alat konversinya disebut generator. Atau sebaliknya, dari bentuk energi listrik menjadi energi mekanik, alat konversinya disebut motor. Pada transformator, gandengan medan magnet, berfungsi untuk memindahkan dan mengubah energi listrik dari rangkaian primer ke sekunder melalui prinsip induksi elektromagnetik.

Keutamaan medan magnet sebagai perangkai proses konversi energi disebabkan terjadinya bahan-bahan magnetik yang memungkinkan diperolehnya kerapatan energi yang tinggi, kerapatan energi yang tinggi ini akan menghasilkan kapasitas tenaga per unit volume mesin yang tinggi pula. Jelaslah bahwa pengertian kuantitatif tentang medan magnet dan rangkaian magnet merupakan bagian penting untuk memahami proses konversi energi listrik.

4.2. Medan Magnet dan Medan Listrik

Medan magnet terbentuk dari gerak elektron. Mengingat arus listrik yang melalui suatu hantaran merupakan aliran elektron, maka pada sekitar kawat hantaran listrik tersebut akan ditimbulkan suatu medan

magnet.

Magnet	Simbol	Listrik	simbol
Gaya gerak Magnet Fluks	J Φ	Gaya gerak listrik Arus listrik	E I
Reluktansi	R	Tahanan	R
Kerapatan Fluks	B	Kerapatan Arus	I/A
Kuat Medan	H	Intensitas Medan Listrik	ϵ
Permeabilitas	u	Konduktivitas	σ

Tabel 4.1. Analogi Rangkaian Listrik dan Magnet

Medan magnet memiliki arah, kerapatan dan intensitas yang digambarkan sebagai "garis-garis fluks" dan dinyatakan sebagai : Φ = fluks (weber).

Besaran kerapatan medan magnet dinyatakan dengan banyaknya garis-garis fluks yang menembus suatu luas bidang tertentu yang dinyatakan sebagai :

$$B = \text{kerapatan fluks (weber/m}^2\text{)}.$$

Intensitas medan magnet disebut sebagai kuat medan dan dinyatakan dengan besarnya fluksi sepanjang jarak tertentu, mempunyai simbol :

$$H = \text{kuat medan (ampere/meter)}$$

Kerapatan medan B maupun kuat medan H merupakan besaran vektoris yang mempunyai besaran dan arah. Yang besarnya :

$$B = \mu . H \dots \dots \dots \quad (4.1)$$

dimana μ = permeabilitas (henry/meter)

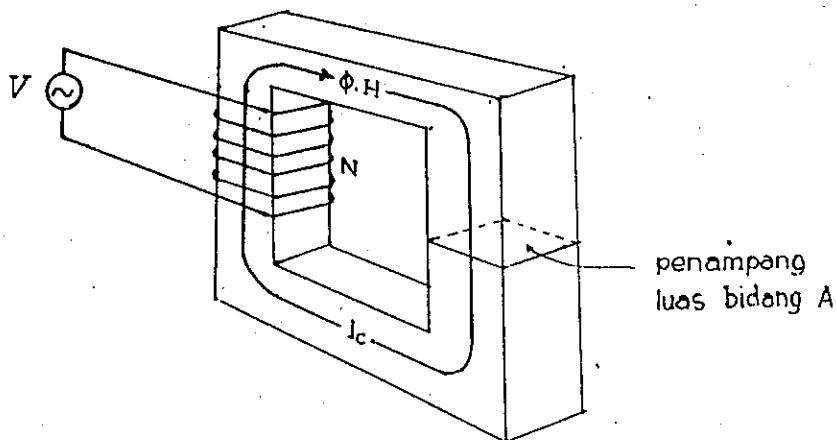
Besaran fluks dapat juga dinyatakan dengan

$$\Phi = \int B dA + \int A dB \dots \dots \dots \quad (4.2)$$

dimana dA adalah unsur luas

Apabila seperti terlihat pada gambar 4.1, suatu sumber tegangan (V) mengalirkan arus listrik (i) melalui suatu kumparan dengan jumlah lilitan (N), maka pada inti

besi akan dihasilkan suatu kuat medan (H).



Gambar 4.1 Timbulnya Kuat Medan

Hubungan antara arus listrik dan medan magnet dinyatakan oleh Hukum Ampere, dan untuk rangkaian sederhana seperti pada Gambar 4.1, persamaannya dinyatakan :

$$N \cdot i = H \cdot l \quad \dots \dots \dots \quad (4.3)$$

dimana :

N = jumlah lilitan

i = arus listrik (A)

H = kuat medan (A/m)

l = panjang jalur.

4.3. Gaya Gerak Listrik

Apabila sebuah konduktor digerakkan tegak lurus sejauh dS memotong suatu medan magnet dengan kerapatan fluks B , maka perubahan fluks pada konduktor dengan panjang l ialah :

$$d\Phi = B \cdot l \cdot dS \quad \dots \dots \dots \quad (4.4)$$

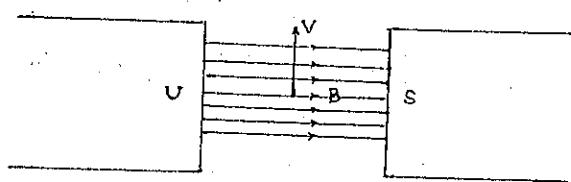
Dari hukum Faraday diketahui bahwa gaya gerak listrik

(gg1) :

$$\varepsilon = \frac{d\Phi}{dt} \quad \dots \dots \dots \dots \quad (4.5)$$

maka diperoleh :

$$\varepsilon = B l v \sin \alpha \quad \dots \dots \dots \dots \quad (4.6)$$

dimana $\frac{dS}{dt} = v$ = kecepatan.

Gambar 4.2. Terjadinya gaya gerak listrik dalam medan magnet..

Arah gaya gerak listrik ditentukan oleh aturan Tangan Kanan. Persamaan $\varepsilon = B l v$ dapat diartikan bahwa apabila dalam medium medan magnet diberikan energi mekanik (untuk menghasilkan kecepatan v), maka akan dibangkitkan energi listrik ε , dan ini merupakan prinsip dasar sebuah generator.

4.4. Kopel

Arus listrik I yang dialirkan di dalam suatu medan magnet dengan kerapatan fluks B akan menghasilkan suatu gaya F sebesar :

$$F = I i \times B \quad \dots \dots \dots \dots \quad (4.7)$$

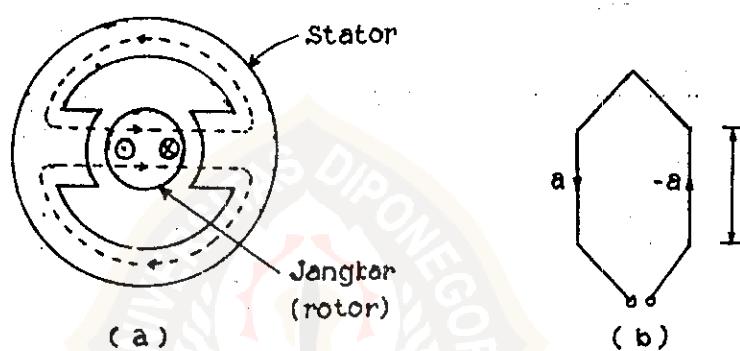
Persamaan 4.7. merupakan prinsip sebuah motor, dimana terjadi proses perubahan energi listrik (i) menjadi energi mekanik (F). Bila jari-jari rotor (r), kopel yang

dibangkitkan :

$$\begin{aligned} T &= F \times r \\ &= B \times i \cdot l \cdot r \quad (\text{Newton.meter}) \quad \dots \dots \dots (4.8) \end{aligned}$$

4.5. Mesin Dinamik Elementer

Pada umumnya mesin dinamik terdiri dari bagian yang berputar disebut rotor dan bagian yang diam disebut stator. Diantara stator dan rotor terdapat celah udara.



Gambar 4.3. Bagian-bagian mesin dinamik.

Pada gambar 4.3.a. stator merupakan kumparan medan yang berbentuk kutub sepatu dan rotor merupakan kumparan jangkar dengan belitan konduktor (kumparan) saling dihubungkan. Kumparan yang terletak pada setiap alur rotor perlu saling dihubungkan ujungnya untuk mendapatkan tegangan induksi (ggl) yang lebih besar.

Pasangan kumparan a-a (gambar 4.3.a) merupakan dua konduktor a dan -a yang dihubungkan seperti pada gambar 4.3.b. Kumparan a-a tersebut bila diputar dengan arah berlawanan jarum jam akan membangkitkan tegangan yang arahnya mendekati kita pada konduktor a dan menjauhi kita

pada konduktor -a. Dengan demikian, tegangan yang dibangkitkan berubah-ubah arahnya setiap setengah putaran, sehingga merupakan tegangan bolak-balik (ac).

$$\epsilon = \epsilon_{\max} \sin \omega t \quad \dots \dots \dots \dots \quad (4.9)$$

$$\begin{aligned} \epsilon_{\max} &= N \Phi_m \omega \\ &= N B A \omega \end{aligned} \quad \dots \dots \dots \dots \quad (4.10)$$

dimana :

N = banyaknya kumparan

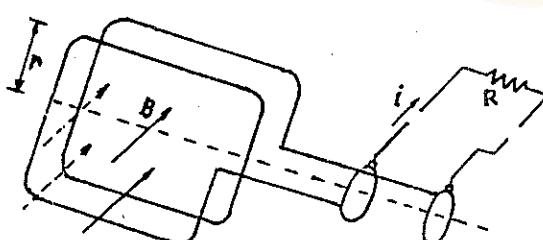
Φ_m = fluks maksimum yang menembus kumparan
(weber)

ω = frekwensi sudut putaran (radian/detik)

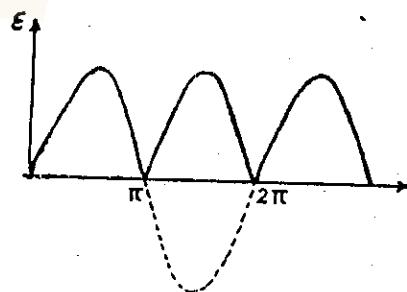
B = medan magnet yang diberikan (weber/meter²)

A = luas bidang kawat (meter²)

Untuk mendapatkan tegangan searah DC diperlukan penyearah yang disebut komutator dan sikat, lihat gambar 4.4.a dan 4.4.b.



(a)

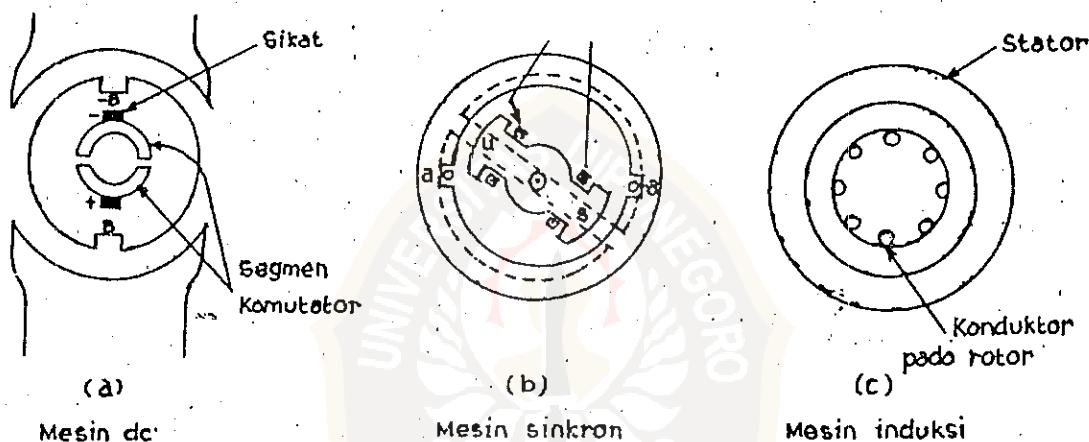


(b)

Gambar 4.4 Penyearah Tegangan DC

- (a). Model generator searah dc.
- (b). grafik ggl induksi.

Berbeda dengan mesin arus searah, kumparan medan mesin sinkron terdapat pada bagian yang berputar (rotor), sedangkan kumparan jangkaranya merupakan bagian yang diam (stator). Arus medan dialirkkan ke rotor melalui cincin. Kumparan medan mesin sinkron, dapat berbentuk seperti kutub sepatu atau berbentuk silinder. Mesin induksi (asinkron) mempunyai kumparan medan pada stator, dan karena mesin ini menggunakan prinsip imbas-elektrromagnetik, maka kumparan rotor akan dibangkitkan gaya gerak listrik (ggl).



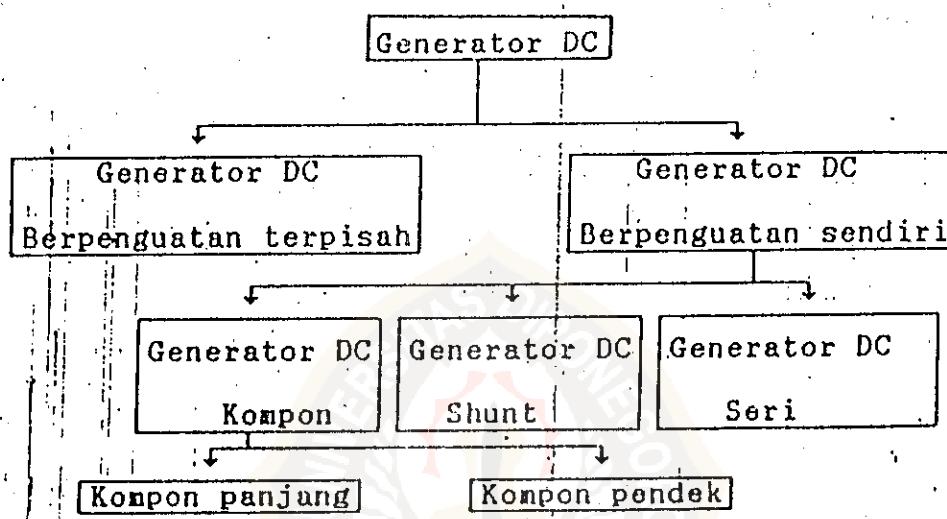
Gambar 4.5. Mesin Dinamik Elementer

Suatu mesin listrik (generator atau motor) akan berfungsi bila memiliki :

1. Kumparan medan, untuk menghasilkan medan magnet.
2. Kumparan jangkar, untuk mengimbaskan ggl pada konduktor konduktor yang terletak pada alur-alur jangkar.
3. Celaudara, yang memungkinkan berputarnya jangkar dalam medan magnet.

4.6. Jenis-jenis Generator Arus Searah.

Berdasarkan cara memberikan fluks pada kumparan medannya, generator arus searah dapat dikelompokkan menjadi dua yaitu generator berpenguatan bebas dan generator berpenguatan sendiri.



Gambar 4.5. Skema Pembagian Generator DC

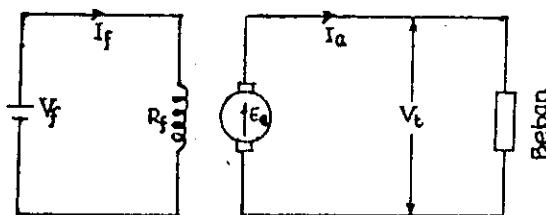
4.6.1. Generator Berpenguatan Terpisah

Tegangan searah yang dipasangkan pada kumparan medan yang mempunyai tahanan R_f akan menghasilkan Arus I_f dan menimbulkan fluks pada kedua kutub.

Tegangan induksi akan dibangkitkan pada generator. Jika generator dihubungkan dengan beban, dan R_a adalah tahanan dalam generator, maka hubungan yang dapat dinyatakan adalah :

$$V_f = I_f R_f \dots\dots\dots\dots\dots (4.11)$$

$$E_a = V_t + I_a R_a \dots\dots\dots\dots\dots (4.12)$$



Gambar 4.7. Rangkaian Listrik Generator Berpenguatan Terpisah

Jadi generator berpenguatan bebas adalah generator dc dimana arus kemagnetannya diperoleh dari sumber tenaga listrik arus searah di luar generator tersebut.

Sehingga besar-kecilnya arus kemagnetannya tidak terpengaruhi oleh nilai-nilai arus atau tegangan generatornya.

4.6.2. Generator Berpenguatan Sendiri.

Generator penguatan sendiri memperoleh arus kemagnetannya dari dalam generator itu sendiri. Oleh karena itu arus kemagnetannya terpengaruh oleh nilai-nilai tegangan dan arus yang terdapat pada generator. Dalam hal ini medan magnet yang dapat menimbulkan ggl mula-mula ditimbulkan oleh adanya remagnensi magnet pada kutub-kutubnya.

Berdasarkan cara pemasangan lilitan atau kumparan penguatnya dibedakan atas :

1. Generator dc seri.

Generator penguat sendiri dimana lilitan penguat magnetnya dihubungkan seri dengan lilitan jangkar.

(gambar 4.8.a)

$$V_t = I_a \cdot R_a \quad \dots \dots \dots \quad (4.13)$$

$$E_a = I_a (R_a + R_f) + V_t \dots \dots \dots (4.14)$$

2. Generator dc Shunt.

Generator dc berpenguatan sendiri dimana lilitan penguat magnetnya dihubungkan shunt (paralel) dengan lilitan jangkar.

(gambar 4.8.b)

$$V_t = I_f \cdot R_f \dots \dots \dots (4.15)$$

$$E_a = I_a \cdot R_a + V_t \dots \dots \dots (4.16)$$

3. Generator dc Kompon (campuran).

Generator dc kompon ialah arus searah yang lilitan penguat magnetnya terdiri dari lilitan penguat shunt dan lilitan penguat seri (gambar 4.8.c dan 4.8.d).

Ada dua cara meletakkan lilitan penguat serinya :

a. Generator Kompon Panjang

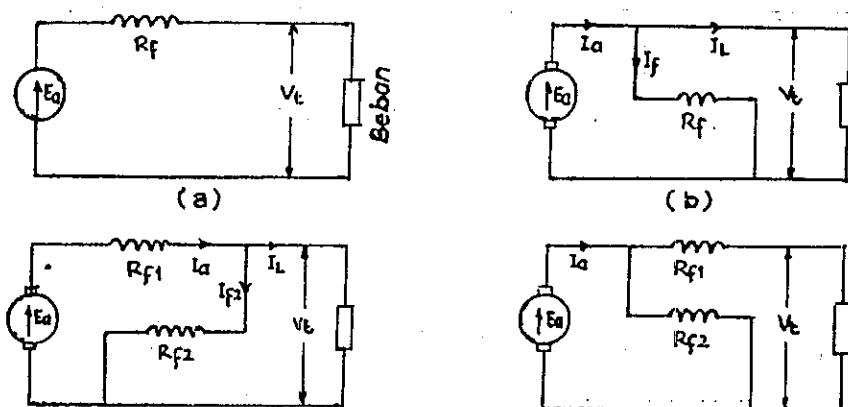
$$I_a = I_{f1} = I_L + I_{f2} \dots \dots \dots (4.17)$$

$$E_a = V_t + I_a (R_a + R_{f1}) \dots \dots \dots (4.18)$$

b. Generator Kompon Pendek

$$I_a = I_{f1} + I_{f2} = I_L + I_{f2} \dots \dots \dots (4.19)$$

$$E_a = V_t + I_L R_{f1} + I_a R_a \dots \dots \dots (4.20)$$



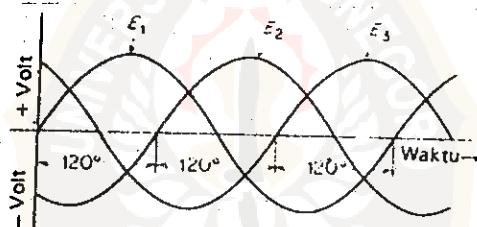
Gambar (4.8) Rangkaian Listrik Generator Berpenguatan Sendiri
(a). Berpenguatan Seri.

- (b). Berpenguatan Shunt.
- (c). Berpenguatan Kompon Panjang.
- (d). Berpenguatan Kompon Pendek.

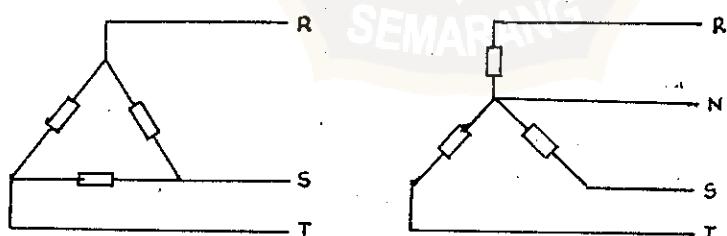
4.7. Generator Sinkron

Untuk generator sinkron, kumpparan medan diletakkan pada rotor dan kumpparan jangkar diletakkan pada stator. Konstruksi medan berputar dan jangkar diam akan menguntungkan karena dapat menyederhanakan masalah pengisolasian.

Pada generator AC (alternator) tiga fasa, stator tersusun dari belitan berjumlah tiga masing-masing terpisah 120° (gambar 4.9). Ketiga lilitan tersebut dapat dihubungkan dalam hubungan bintang (Y-connection) atau hubungan delta (D-connection) ditunjukkan pada gambar 4.10



Gambar 4.9. Tiga ggl gelombang sinus yang berbeda pada rangkaian tiga fasa.



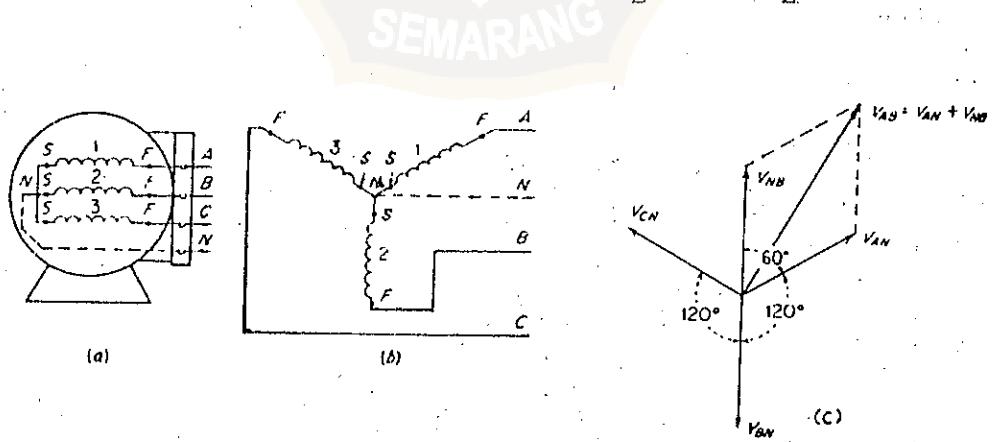
Gambar 4.10. Hubungan Delta (a) dan Bintang (b)

4.8. Rangkaian Tiga Fase

4.8.1. Hubungan Tegangan dalam Generator Hubungan-Y

Gambar 4.11.a mewakili tiga kumpparan atau lilitan fase sebuah generator. Lilitan-lilitan ini diletakkan pada permukaan jangkar sedemikian rupa sehingga ggl yang

dibangkitkan berbeda 120° . Tiap-tiap kumparan diberi huruf S dan F (start dan finish). Dalam gambar 4.11.a, semua ujung kumparan yang diberi tanda S dihubungkan ke titik bersama N yang disebut netral dan ketiga ujung kumparan yang diberi tanda F dikeluarkan ke terminal saluran A, B dan C membentuk catu tiga-fase kawat-tiga. Tipe hubungan ini disebut *hubungan-Y* (kadang disebut *hubungan bintang*). Kerap kali sambungan netral dikeluarkan ke papan terminal seperti ditunjukkan dalam gambar 4.11.a. dengan garis putus-putus, membentuk sistem tiga-fase kawat-empat. Tegangan yang dibangkitkan dalam setiap fase generator ac disebut *tegangan fase* (simbol E_p atau V_p). Jika sambungan netral dikeluarkan dari generator, tegangan dari masing-masing terminal saluran A, B, atau C ke sambungan netral N adalah tegangan fase. Tegangan antara setiap dua dari ketiga terminal saluran A, B, atau C disebut tegangan saluran-ke-saluran atau singkatnya *tegangan saluran* (simbol E_L atau V_L).



Gambar 4.11. (a) Hubungan lilitan fase dalam generator hubungan-Y. (b) Diagram konvensional hubungan Y. (c) Diagram fasor yang menunjukkan

hubungan antara tegangan fase dan saluran.

Urutan ketiga tegangan dari sistem tiga-fase disebut urutan fase atau putaran fase tegangan. Ini ditentukan oleh arah putaran generator, tetapi dapat dibalikkan di luar generator dengan menukar setiap dua dari ketiga kawat saluran. Sangatlah membantu jika kita menggambarkan diagram rangkaian hubungan Y dengan menggambarkan ketiga fasenya dalam bentuk Y seperti dalam gambar 4.11.b. Perhatikan bahwa rangkaian Gambar 4.11b benar-benar sama dengan gambar 4.11.a. dengan ujung S setia kuperannya dihubungkan ke titik netral dan ujung F dikeluarkan ke terminal. Setelah diagram rangkaian digambar seperti pada gambar 4.11.c. Diagram fasor menunjukkan ketiga tegangan fase V_{AN} , V_{BN} , V_{CN} berbeda 120° . Haruslah diperhatikan dalam gambar 4.11. bahwa setiap fasor diberi huruf dengan dua subskrip. Kedua huruf tersebut menunjukkan polaritas relatif dari tegangan yang ada, dan urutan huruf-hurufnya menunjukkan polaritas relatif dari tegangan selama setengah siklus positif. Sebagai contoh, simbol V_{AN} menunjukkan tegangan V antara titik A dan N dengan titik A positif terhadap titik N selama setengah siklus positifnya. Dalam diagram fasor yang ditunjukkan, telah diumpamakan bahwa terminal generatornya positif terhadap netral selama setengah siklus positif. Karena tegangan membalik setiap setengah siklus, sekarang polaritasnya dapat diperhatikan jika polaritas ini diperhatikan secara konsisten untuk semua fasenya. Haruslah diperhatikan

bahwa jika untuk setengah siklus positif ditentukan polaritas titik A terhadap N (V_{AN}), maka V_{AN} jika digunakan pada diagram fasor yang sama haruslah digambar berlawanan, atau berbeda 180° dengan V_{AN} .

Tegangan antara setiap dua terminal saluran dari generator yang terhubung Y adalah seisih potensial antara kedua terminal ini terhadap netral. Sebagai contoh tegangan saluran V_{AB} sama dengan tegangan A terhadap netral (V_{AN}) dikurangi tegangan B terhadap netral (V_{BN}) dan kemudian menjumlahkan fasor ini pada V_{AN} . Kedua fasor V_{AN} dan V_{BN} panjangnya sama dan berbeda 60° , seperti ditunjukkan dalam gambar 4.11.c. Dapat ditunjukkan secara grafik atau buktikan dengan ilmu ukur bidang bahwa V_{AB} sama dengan $\sqrt{3}$, atau 1,73, dikali harga V_{AN} ataupun V_{NB} . Konstruksi grafik ditunjukkan dalam diagram fasor. Oleh sebab itu dalam hubungan-Y yang seimbang,

$$V_L = \sqrt{3} V_P = 1,73 V_P \dots\dots\dots (4.21)$$

4.8.2. Hubungan Arus dalam Generator Hubungan-Y

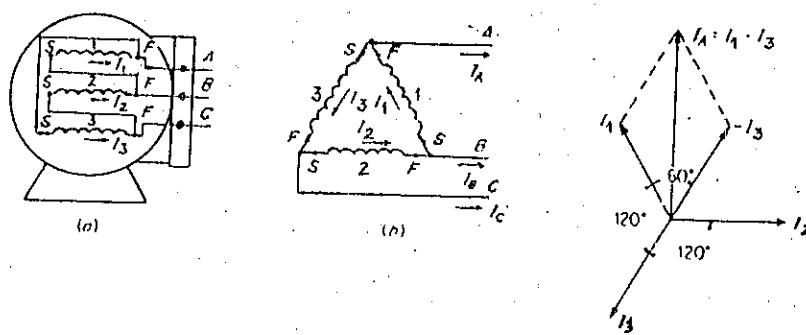
Arus yang mengalir ke luar ke kawat saluran dari terminal generator A,B, dan C (gambar 4.11) harus mengalir dari titik netral N ke luar melalui kumparan generator. Maka arus dalam setiap kawat saluran (I_L) harus sama dengan arus dalam fase (I_P). Dalam hubungan-Y,

$$I_L = I_P \dots\dots\dots (4.22)$$

4.8.3. Hubungan Tegangan dalam Generator Hubungan-Delta

Generator hubungan-delta ditunjukkan dalam gambar 4.12.a. Hubungan ini dibentuk dengan menghubungkan terminal S dari

satu fase ke terminal F dari fase tetangganya.



Gambar 4.12. (a) Hubungan lilitan fase dalam generator hubungan-delta (b) Diagram konvensional dari hubungan-delta (c) Diagram fasor yang menunjukkan hubungan antara arus fase dan arus saluran.

Maka hubungan saluran dibuat pada titik bersama antara fase seperti yang ditunjukkan. Diagram konvensional yang mana ketiga kumparan dihubungkan seperti huruf Yunani delta (Δ) ditunjukkan dalam gambar 4.12.b. Pengamatan dari diagram menunjukkan bahwa tegangan yang dibangkitkan dalam setiap fase juga merupakan tegangan antara dua kawat saluran. Sebagai contoh, tegangan yang dibangkitkan dalam fase 1 juga merupakan tegangan antara saluran A dan B. Oleh sebab itu dalam hubungan-delta,

$$V_L = V_P \dots \dots \dots \dots \quad (4.22)$$

4.8.4. Hubungan Arus dalam Generator Hubungan-Delta

Arus fase dalam hubungan delta pada gambar 4.12.b. adalah I_1 , I_2 , dan I_3 . Diagram fasor yang menyatakan arus ini ditunjukkan dalam gambar 4.12.c. Untuk menentukan arus dalam setiap kawat saluran, perlulah menjumlahkan fasor

arus yang mengalir dalam kedua fase di mana kawat saluran tersebut dihubungkan. Sebagai contoh, arus yang mengalir ke luar menuju beban melalui saluran A haruslah

$$I_A = I_1 + (-I_3) \dots \dots \dots \quad (4.24)$$

Karena I_1 dan $-I_3$ merupakan fasor yang besarnya sama dan berbeda 60° , maka jumlah fasornya adalah $\sqrt{3}$, atau 1,73 kali harga I_1 ataupun $-I_3$ (Gambar 4.12.c). Oleh sebab itu dalam hubungan-delta,

$$I_L = \sqrt{3} I_P = 1,73 I_P \dots \dots \dots \quad (4.25)$$

4.8.5. Daya dalam Rangkaian Tiga-Fase

Dari rumus daya dalam rangkaian satu fase, daya dalam setiap fase (P_P) baik hubungan-delta maupun -Y adalah

$$P_P = V_P I_P \cos \theta \dots \dots \dots \quad (4.26)$$

dimana θ adalah sudut antara arus fase dan tegangan fase. Maka daya yang dihasilkan dalam ketiga fase dari hubungan tiga-fase seimbang adalah

$$P = 3P_P = 3V_P I_P \cos \theta \dots \dots \dots \quad (4.27)$$

Tetapi dalam hubungan-Y

$$I_P = I_L \text{ dan } V_P = \frac{V_L}{\sqrt{3}}$$

Maka daya tiga-fase dalam sistem hubungan-Y yang dinyatakan dalam tegangan dan arus saluran adalah

$$\begin{aligned} P &= 3 \frac{V_L}{\sqrt{3}} I_L \cos \theta \\ &= \sqrt{3} V_L I_L \cos \theta \\ &= 1,73 V_L I_L \cos \theta \end{aligned}$$

Dalam hubungan-Delta

$$V_P = V_L \text{ dan } I_P = \frac{I_L}{\sqrt{3}}$$

Daya tiga fase yang dinyatakan dalam tegangan dan arus saluran adalah :

$$\begin{aligned} P &= 3V_L \frac{I_L}{\sqrt{3}} \cos \theta \\ &= \sqrt{3} V_L I_L \cos \theta \\ &= 1,73 V_L I_L \cos \theta \end{aligned}$$

Maka pernyataan untuk daya tiga-fase dalam sistem seimbang, baik hubungan-Y maupun -delta sama dengan

$$P = 1,73 V_L I_L \cos \theta \quad \dots \dots \dots (4.28)$$

Faktor daya sistem tiga-fase seimbang hubungan-Y ataupun delta didefinisikan sebagai kosinus sudut antara tegangan ase dan arus fase. Dari persamaan (4.28), faktor dayanya adalah

$$\text{Faktor daya} = \cos \theta = \frac{P}{1,73 V_L I_L}$$

atau sama dengan perbandingan daya tiga-fase dengan voltamper tiga-fase.

4.8.6. Beban Hubungan-Y dan Delta

Bukan saja hanya generator yang dapat dihubungkan secara Y maupun delta, tetapi bermacam-macam tipe beban seperti lilitan motor, lampu, atau transformator dapat juga dihubungkan secara Y maupun delta. Hubungan arus, tegangan, dan daya yang digunakan untuk generator tiga-fase akan sama saja bila digunakan untuk hubungan beban tiga-fase.