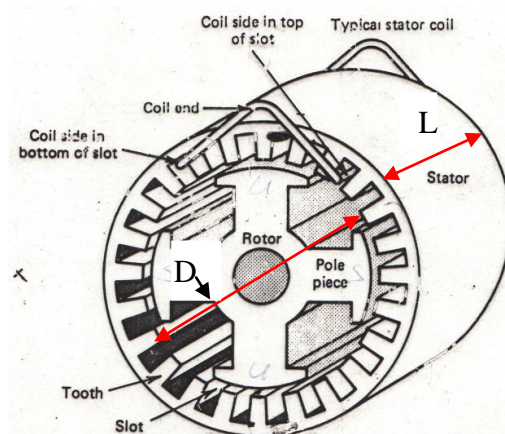


BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Generator Listrik

Generator listrik adalah mesin mekanik yang mengubah daya mekanik menjadi daya listrik. Menurut jenis arus, secara garis besar generator terdapat dua jenis, yaitu generator arus searah dan generator arus bolak-balik. Berdasar sistem penguatan magnet kutub, baik generator arus searah maupun generator arus bolak-balik banyak ragamnya.

Generator berdasar konstruksi utama terdiri atas stator dan rotor. Stator merupakan bagian yang diam dan rotor bagian yang berputar. Inti stator maupun rotor generator terdiri atas pelat-pelat besi yang berlapis (laminasi) membentuk silinder. Silinder besi stator generator arus bolak-balik dibuat alur-alur untuk penempatan kumparan atau konduktor seperti pada Gambar 2.1 (McPherson, *et al.*, 1990).



D: Diameter lubang stator

L: Panjang inti besi stator =
Panjang inti besi rotor

Gambar 2.1: Stator dan rotor generator arus bolak-balik dua pasang kutub
McPherson, *et al.*, 1990

Generator arus bolak-balik berdasarkan konstruksi dan sistem penguatan terdapat dua macam, yaitu generator sinkron dan generator induksi. Generator induksi sendiri berdasarkan jenis rotor terdapat dua, yaitu generator induksi rotor belitan dan generator induksi rotor sangkar. (Ekanayake, 2002; Sahnwey, 1990)).

2.2 Hubungan Dimensi dan Putaran terhadap Daya

Besarnya daya mesin arus bolak-balik, baik motor ataupun generator ditentukan dari ukuran dimensi, yaitu diameter dan panjang mesin serta putaran, dengan persamaan (Sawhney, 1990):

$$S = K_0 \cdot D^2 \cdot L \cdot n_s \quad (2-1)$$

S : Daya mesin	(VA)
K_0 : Konstanta keluaran mesin	$\left(\frac{\text{VA}}{\text{m}^3 \cdot \text{rps}} \right)$
D : Diameter lubang stator	(m)
L : Panjang inti besi stator / rotor	(m)
n_s : Putaran sinkron	(rps)

Berdasarkan Persamaan (2-1), untuk mesin tertentu dengan dimensi dan konstanta keluaran tetap, daya selalu berbanding lurus dengan putarannya.

2.3 Hubungan Putaran dengan Frekuensi dan Jumlah Pasang Kutub

Hubungan putaran sinkron terhadap frekuensi dan jumlah kutub dinyatakan oleh (McPherson, *et al.*, 1990):

$$n_s = \frac{f}{p} \quad (2-2)$$

dengan n_s : putaran sinkron	(rps)
f : frekuensi	(Hz)
p : jumlah pasang kutub	

Berdasarkan Persamaan (2-2) dengan frekuensi tetap, untuk menurunkan putaran sinkron jumlah kutub harus diperbanyak.

Hal yang perlu diperhatikan adalah hubungan sudut mekanik θ_m dengan sudut (derajat) listrik θ_e , dengan persamaan (Sawhney, 1990):

$$\theta_e = p\theta_m \quad (2-3)$$

Dengan jumlah alur stator S_s dan jumlah pasang kutub p , maka setiap kisar alur y_θ diberikan dengan persamaan:

$$y_\theta = p \times \frac{360^\circ}{S_s} \quad (2-4)$$

Dari hubungan derajat mekanik dan derajat listrik dapat dirancang susunan kumparan yang sesuai dengan jumlah kutub yang diperlukan.

2.4 Hubungan Tegangan dengan Putaran, Jumlah lilit, dan Fluks Magnet.

Tegangan induksi pada kumparan generator berbanding lurus terhadap putaran, jumlah lilit kumparan, dan fluks magnet kutub. Secara umum besar tegangan induksi kumparan generator E dinyatakan dengan (McPherson, *et al.*, 1990; Langsdorf, 1955):

$$E = \sqrt{2} \cdot n_s \cdot N \cdot \phi \quad (\text{V}) \quad (2-5)$$

Dengan N : jumlah lilit kumparan

ϕ : fluks magnet kutub (Wb)

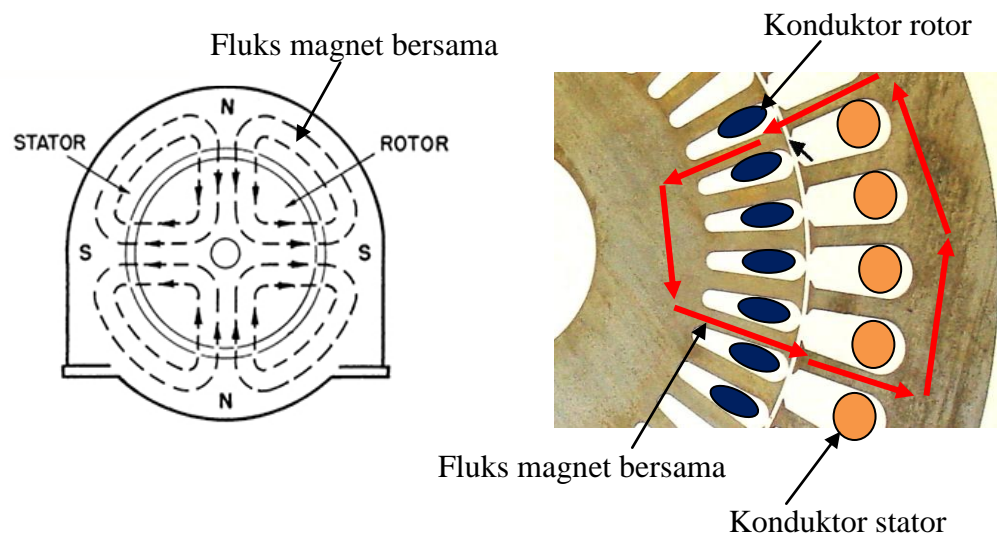
n_s : putaran sinkron (rps)

Berdasarkan Persamaan (2-5), dengan fluks magnet yang tetap, bila putaran diturunkan, untuk mendapatkan tegangan induksi yang sama dengan sebelumnya, maka jumlah lilit kumparan harus diperbanyak.

2.5 Hubungan Fluks Magnet dengan Induktansi

Kumparan mesin yang sedang dialiri arus listrik akan membangkitkan medan magnet yang sering disebut gaya gerak magnet (*ggm*). Besarnya medan magnet berbanding lurus terhadap jumlah lilit dan arus. Dengan adanya rangkaian magnetik pada inti besi stator dan rotor, yang merupakan jalur tertutup menyebabkan fluks magnet mengalir. Hal ini identik dengan hubungan tegangan, impedansi, dan arus pada rangkaian listrik.

Sebagian besar fluks mengalir ke inti besi stator lewat celah udara menembus rotor kembali ke stator seperti yang ditunjukkan Gambar 2.2 (Sawhney, 1990).

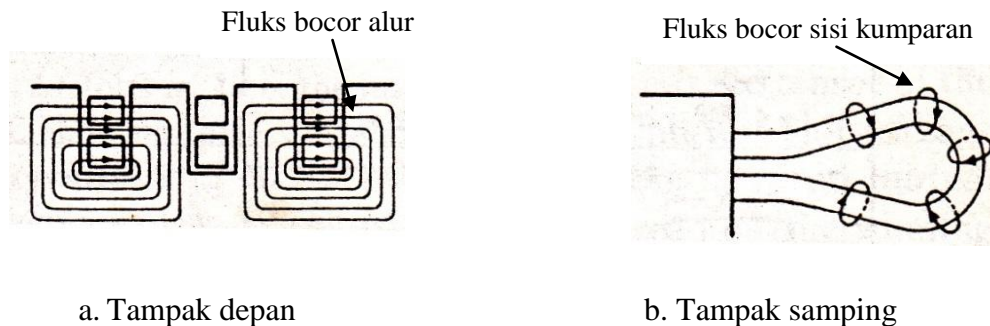


Gambar 2.2: Aliran fluks bersama pada inti besi stator dan rotor

Sawhney, 1990

Fluks magnet yang menembus stator dan rotor dinamakan fluks bersama. Induktansi yang berhubungan dengan fluks bersama dinamakan induktansi bersama. Dan induktansi bersama pada mesin listrik dinamik dikenal sebagai induktansi kemagnetan.

Di samping fluks bersama, terdapat sebagian fluks bocor pada alur dan pada sisi kumparan di luar alur seperti pada Gambar 2.3 (Hasanah R. N., 2005).



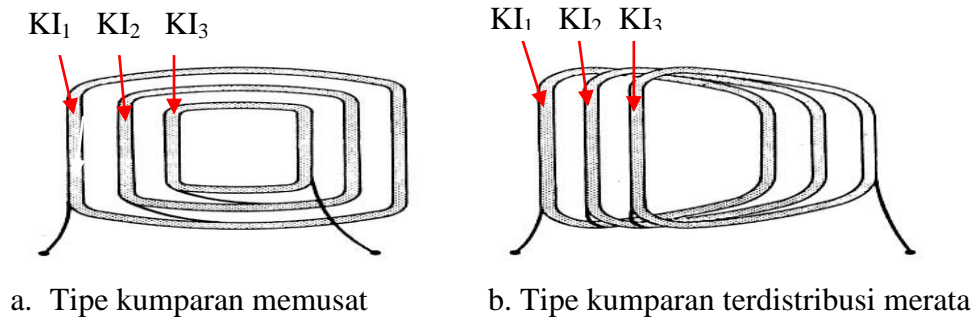
Gambar 2.3: Fluks bocor kumparan

Kedua fluks bocor tersebut menyebabkan timbulnya induktansi bocor kumparan. Sesuai dengan tempat, pada stator dinamakan induktansi bocor stator dan pada rotor dinamakan induktansi bocor rotor. Induktansi bocor tersebut menyebabkan adanya reaktansi bocor.

Reaktansi bersama dan bocor kumparan merupakan faktor penting dalam penentuan nilai kapasitor penguat, arus pemicu, dan putaran generator induksi penguatan sendiri (Senthilkumar M., 2010).

2.6 Kumparan Fasa Stator

Kumparan fasa stator merupakan sejumlah kumparan individu yang terhubung mulai ujung awal hingga ujung akhir terminal mesin listrik. Kumparan individu merupakan unit pembentuk kumparan fasa. Jumlah lilit kumparan individu dapat terdiri dari satu lilit atau lebih. Gambar 2.4 menunjukkan contoh dua bagan kumparan motor induksi yang berbeda susunan (Wilkinson, 1991). Gambar 2.4a merupakan bagan kumparan tipe memusat, sedang Gambar 4.2b bagan kumparan tipe terdistribusi merata.



Gambar 2.4: Bagan susunan kumparan kutub motor induksi (Wilkinson, 1991)

KI_1 : Kumparan individu 1
 KI_2 : Kumparan individu 2
 KI_3 : Kumparan individu 3

Gambar 2.4a menunjukkan contoh bagan kumparan kutub yang terdiri dari tiga kumparan individu yang berbeda ukuran panjang dan jumlah lilit. Kumparan individu luar KI_1 lebih panjang dari kumparan individu tengah KI_2 , dan kumparan individu tengah KI_2 lebih panjang dari kumparan individu dalam KI_3 . Gambar 2.4b menunjukkan contoh bagan kumparan kutub yang terdiri dari tiga kumparan individu yang identik ($KI_1 = KI_2 = KI_3$).

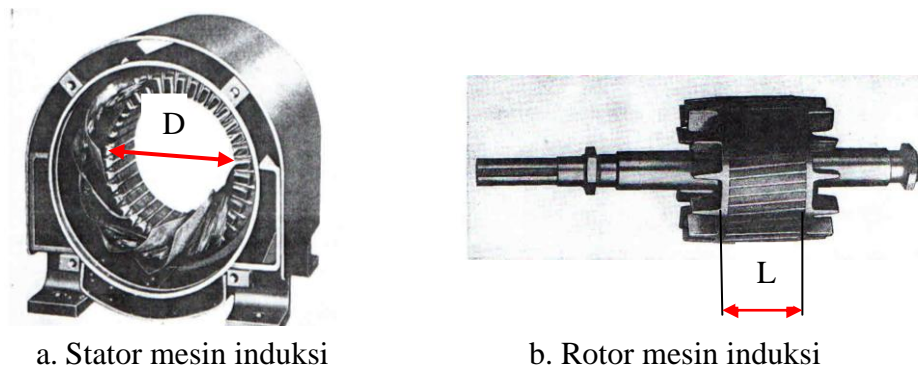
Kumparan stator tipe memusat pada Gambar 2.5 merupakan salah satu contoh kumparan motor induksi satu fasa dengan jumlah alur stator 36. Jumlah alur untuk kumparan utama dua kali jumlah alur untuk kumparan bantu. Kumparan tipe memusat ini banyak digunakan pada motor kapasitor



Gambar 2.5: Susunan kumparan stator motor induksi satu fasa

2.7 Generator Induksi

Mesin induksi harganya murah, memiliki konstruksi yang kokoh, sederhana, dan handal. Di samping itu mesin induksi membutuhkan perawatan lebih sedikit dibandingkan dengan mesin sinkron (Mismail, 1989; Ahshan et al., 2009; Boora, 2009; Senthilkumar M., 2010; Habash et al., 2012; Mesemanolis et al., 2012). Salah satu contoh mesin induksi seperti pada Gambar 2.6 (Chapman S. J., 2012).



Gambar 2.6: Mesin induksi rotor sangkar
Chapman S. J., 2012

Mesin induksi dapat beroperasi sebagai generator jika diputar sedikit di atas kecepatan sinkron, dan harus mendapat pasokan daya reaktif untuk penguatan magnetnya (Chatterjee, *et al.*, 2014; Kheldoun A., *et al.*, 2012; Mismail, 1989). Generator induksi hanya dapat membangkitkan daya aktif, dan ketika terjadi penambahan beban dibutuhkan tambahan daya reaktif (Boora, 2009; Lalwani, *et al.*, 2011; Ojo, 1996; Mismail, 1989).. Bila terjadi peningkatan beban dan tidak mendapatkan tambahan daya reaktif menyebabkan penurunan tegangan.

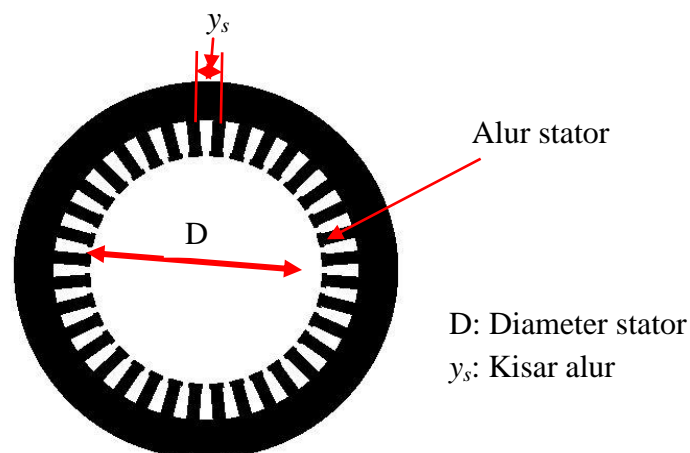
Generator induksi dapat bekerja pada dua kondisi, yaitu terhubung paralel dengan jaringan dan berdiri sendiri (Nazir, 2007). Untuk yang terhubung paralel dengan jaringan, generator induksi dapat menarik daya reaktif dari jaringan. Akan tetapi pada jaringan dengan kapasitas daya yang terbatas perlu dipasang kapasitor (Murthy, *et al.*, 2011; Murthy, *et al.*, 2012; Leicht, *et al.*, 2013)).

Generator induksi penguatan sendiri tidak dapat membangkitkan daya reaktif. Oleh karena itu generator perlu dihubungkan dengan kapasitor yang dipasang pada terminal kumparan untuk penguatannya (Murthy, *et al.*, 1998; Ojo, *et al.*, 1998). Kapasitor akan membangkitkan daya reaktif yang dibutuhkan generator dan sekaligus untuk beban. Dalam mempertahankan tegangan pada batas teraan generator, perlu mendapatkan tambahan daya

reaktif dari kapasitor. Dalam hal ini dibutuhkan tambahan kapasitor penguat (Kalla, *et al.*, 2013).

2.8 Inti Besi Stator

Inti besi stator mesin induksi berupa susunan laminasi plat besi dengan penampang melintang seperti pada Gambar 2.7. Gambar 2.7 tersebut merupakan contoh laminasi plat besi dengan jumlah alur 36 (Sawhney, 1990). Alur stator tersebut merupakan tempat kumparan dililitkan. Hal yang utama pada susunan kumparan stator, yang berhubungan dengan jumlah kutub adalah kisar alur stator dan kisar kutub.



Gambar 2.7: Laminasi plat besi stator motor induksi dengan jumlah alur 36 Sawhney, 1990.

Kisar alur merupakan jarak antar alur yang berdekatan dalam satuan derajat listrik. Besarnya kisar alur ditentukan dengan menggunakan Persamaan (Sawhney, 1990):

$$y_s = p \times \frac{360^\circ}{S_s} \quad (2-6)$$

Dengan y_s : Kisar alur ($^\circ$ listrik)

p : Jumlah pasang kutub

S_s : Jumlah alur stator

Kisar kutub adalah jarak antara kutub magnet utara **U** dengan kutub magnet selatan **S** yang berdekatan. Kisar kutub dinyatakan dalam besaran derajat listrik, setiap mesin listrik besarnya dibuat sama dengan 180° listrik. Untuk ini harus diupayakan susunan kumparan agar kisar alur yang dapat menghasilkan jarak 180° listrik.

Kisar fasa untuk mesin satu fasa adalah jarak antara fasa kumparan utama dengan fasa kumparan bantu. Untuk mesin satu fasa kisar fasa dibuat sebesar 90° listrik. Oleh

karena itu, untuk mesin yang akan direkonstruksi kisar alur tidak boleh lebih dari 90° listrik (Sawhney, 1990; McPherson, *et al.*, 1990). Di samping ketentuan kisar alur dan kisar kutub, lebar kumparan yang merupakan jarak antara sisi kumparan terluar yang satu dengan sisi kumparan yang lain tidak boleh lebih dari 180° listrik (Sawhney, 1990). Untuk kumparan jenis memusat, lebar kumparan adalah jarak antara sisi yang satu dari kumparan individu terluar dengan yang lain, sedangkan untuk kumparan jenis terdistribusi merata lebar kumparan adalah jarak antara sisi kumparan individu yang satu dengan sisi lain.

2.9 Hubungan Putaran terhadap Operasi Generator Induksi

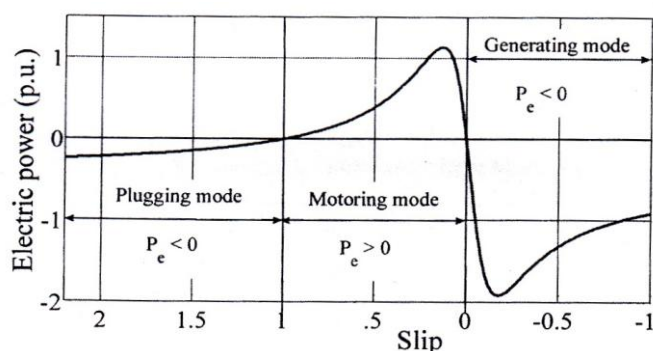
Mesin induksi dapat beroperasi sebagai motor atau generator tergantung dari hubungan arah dan besar kecepatan putaran rotor dengan kecepatan medan magnet stator. Bila kecepatan rotor di atas putaran medan stator, dengan *slip* S negatif ($0 > S > -1$) dan mendapatkan catu daya reaktif kapasitif, mesin beroperasi sebagai generator. Besarnya slip S dalam per unit dinyatakan dengan (McPherson, *et al.*, 1990):\

$$\text{Slip}, s = \frac{n_s - n_r}{n_s} \quad (2-7)$$

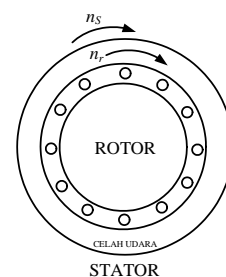
n_s : putaran medan magnet stator (rps)

n_r : putaran rotor (rps)

Karakteristik mesin induksi diberikan pada Gambar 2.8 dan hubungan arah putaran rotor n_r dengan medan magnet stator n_s . Medan magnet stator ini sering disebut putaran sinkron, Hubungan putaran sinkron dengan putaran rotor diberikan pada Gambar 2.9 (Zamani, *et al.*, 2012).



Gambar 2.8: Karakteristik mesin induksi
Zamani, *et al.*, 2012



Gambar 2.9: Hubungan putaran rotor dengan medan putar stator

2.10 Pembangkitan Tegangan Generator Induksi

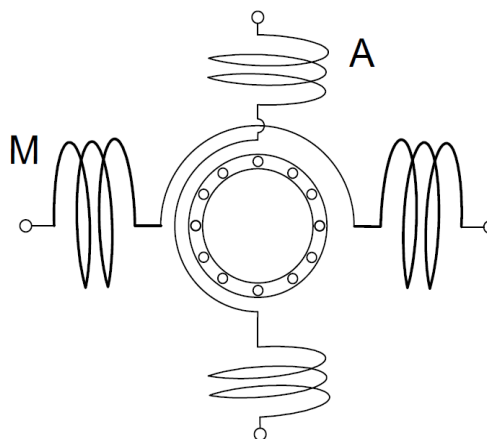
Pembangkitan tegangan generator induksi penguatan sendiri diawali dari adanya remanensi magnet pada inti besi dan putaran. Besar tegangan yang dibangkitkan pada kumparan stator tergantung dari besar remanensi magnet, jumlah lilit kumparan dan putaran rotor generator. Bila remanensi magnet kuat dan kecepatan putar rotor cukup tinggi, tegangan yang dibangkitkan pada kumparan stator terus meningkat hingga mencapai kondisi mantapnya (Mismail, 1989; Ojo, *et al.*, 1995; Bodson, *et al.*, 2012; Leicht, *et al.*, 2013).

Peningkatan tegangan pada kumparan stator diikuti peningkatan arus yang mengalir pada kapasitor. Akibat dari peningkatan arus terjadi peningkatan medan magnet baik di stator maupun di rotor. Antara medan magnet stator dengan medan magnet rotor saling menginduksi timbal balik. Akibat dari saling induksi timbal balik terjadi peningkatan tegangan pada stator maupun rotor.

Medan magnet stator dan rotor sama-sama bergerak. Untuk dapat beroperasi sebagai generator harus ada perbedaan kecepatan yang dikenal dengan nama *slip*.

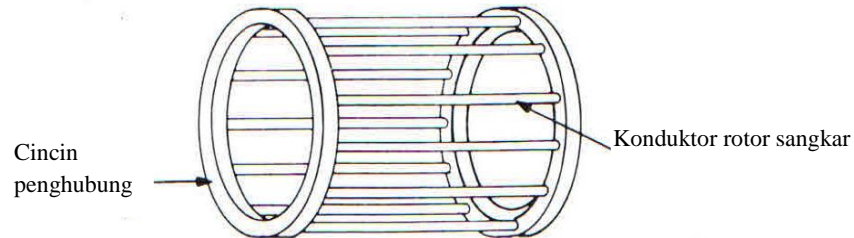
2.11 Generator Induksi Satu Fasa

Pada stator generator induksi satu fasa terdapat dua kelompok kumparan, yaitu kumparan utama (**M**) dan kumparan bantu (**A**). Kumparan utama dan kumparan bantu terpisah sebesar 90° listrik seperti Gambar 2.10 (Murthy, *et al.*, 2012; Khan, *et al.*, 2013; Kall, *et al.*, 2015).



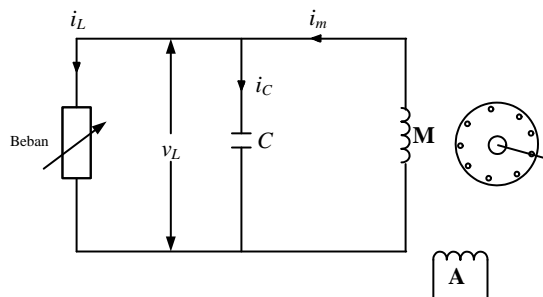
Gambar 2.10: Kedudukan kumparan stator mesin induksi satu fasa

Generator jenis rotor sangkar, dalam alur rotor terdapat batang-batang konduktor yang ujung-ujungnya saling dihubungkan seperti Gambar 2.11.



Gambar 2.11: Konduktor rotor sangkar mesin induksi

Kumparan utama generator induksi satu fasa sebagian besar difungsikan sebagai kumparan pencatu daya ke beban, sedang kumparan bantu dibiarkan terbuka atau hanya difungsikan sebagai bantu penguatan seperti Gambar 2.12 (Murthy, 1993; Ojo, *et al.*, 1996).



Gambar 2.12: Hubungan generator induksi satu fasa Murthy, 1993

Keterangan Gambar 2.12:

- M:** Kumparan Utama
- A:** Kumparan bantu
- C:** Kapasitor penguat
- i_C : Arus kapasitor penguat
- i_M : Arus kumparan generator
- i_L : Arus beban
- v_L : Tegangan terminal beban

2.11.1 Impedansi kumparan

Kumparan stator mesin terdiri atas beberapa kumparan individu yang tersambung antara yang satu dengan yang lain. Kumparan individu itu merupakan belitan konduktor

berisolasi mengandung unsur resistansi, induktansi, dan kapasitansi. Nilai resistansi diusahakan sekecil mungkin karena dapat menimbulkan kerugian energi berupa panas. Induktansi kumparan merupakan bagian penting karena berkaitan dengan kemagnetan dan penyimpanan energi (Boora S., 2009). Sedangkan kapasitansi dalam kumparan nilainya kecil sehingga dapat diabaikan

Impedansi dalam hal ini adalah resistansi dan reaktansi induktif kumparan generator induksi satu fasa. Bila terjadi perubahan susunan kumparan, nilai resistansi tidak akan berubah selama panjang dan diameter konduktor tidak berubah. Tidak demikian dengan nilai reaktansi, di samping jumlah lilit, akibat perubahan susunan kumparan menjadikan nilai reaktansi dapat berubah (Santoso, *et al.*, 2015).

Nilai impedansi berpengaruh terhadap unjuk kerja generator, termasuk masalah proses pengasutan. Untuk itu nilai impedansi harus diperhitungkan secara teliti. Salah satu cara untuk menentukan reaktansi karena perubahan susunan, jumlah lilit perkumparan, jumlah kumparan, dan hubungan antar kumparan dapat menggunakan analisis tensor.

Analisis tensor merupakan salah satu metode penyelesaian sistem keteknikan, salah satu contoh sistem keteknikan adalah mesin listrik. Bentuk penyelesaiannya diawali dengan membagi sistem menjadi sub-sub sistem. Setiap sub sistem masing-masing dianalisis tersendiri, kemudian hasilnya dihubungkan kembali menggunakan tensor transformasi.

Analisis tensor kebanyakan menggunakan operasi matriks (Kron, 1949; Kron, 1959). Operasi matriks sendiri sudah dikenal luas di kalangan pendidikan, bahkan sudah dipelajari sebelum masuk perguruan tinggi. Oleh karena itu, dalam penelitian ini analisis tensor dipilih untuk mendapatkan nilai reaktansi mesin.

Pada mesin listrik terdapat dua macam matriks reaktansi primitif, yaitu matriks reaktansi kemagnetan primitif dan matriks reaktansi bocor primitif. Reaktansi primitif adalah reaktansi ketika kumparan individu yang satu dengan yang lain dalam kondisi terpisah (Kron, 1949). Matriks reaktansi primitif disebut juga tensor reaktansi primitif yang berupa matriks dengan elemen reaktansi kumparan individu, Untuk memudahkan analisis, tensor reaktansi kemagnetan primitif dan tensor reaktansi bocor primitif dianalisis secara terpisah seperti yang diuraikan pada Lampiran 1.

2.11.2 Induktansi kumparan

Nilai induktansi mesin ditentukan dari jumlah lilit kumparan, susunan kumparan dan bahan inti besi serta jumlah kumparan individu yang tersambung. Di samping itu, nilai induktansi juga dipengaruhi oleh kumparan lain yang berdekatan berdasarkan pasang kutubnya (Kron G, 1949; Kron G., 1959). Sifat dasar induktansi adalah dapat menyimpan energi listrik selama masih ada arus mengalir di dalamnya.

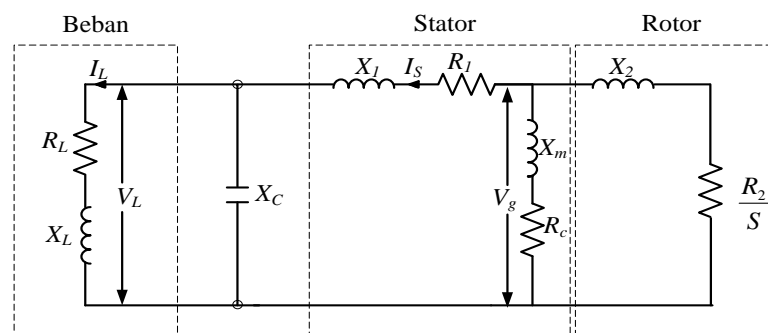
Kumparan individu adalah unit kumparan pembentuk kumparan fasa. Setiap kumparan individu dalam mesin terdapat bermacam aliran fluks magnet. Salah satunya adalah aliran fluks bocor kumparan. Fluks bocor kumparan adalah fluks yang mengalir di luar inti besi yang biasanya nilainya kecil. Hal ini karena adanya hambatan magnet (reluktansi) yang besar. Fluks bocor menentukan nilai reaktansi bocor stator maupun reaktansi bocor rotor (Hasanah R. N., 2005). Sedangkan fluks magnet yang menembus stator dan rotor disebut fluks magnet bersama, induktansinya dikenal dengan induktansi kemagnetan.

Mesin listrik baik sebagai motor maupun generator, resistansi kumparan diupayakan sekecil mungkin. Resistansi hanya menimbulkan kerugian yaitu mengubah energi listrik menjadi panas dan hilang. Sedang reaktansi induktif merupakan bagian yang sangat penting dalam proses penyimpanan energi.

2.11.3 Rangkaian pengganti generator induksi satu fasa

Generator induksi satu fasa penguatan sendiri yang terhubung dengan kapasitor dan beban seperti Gambar 2.12, bila diketahui nilai-nilai resistansi dan reaktansi, dapat dengan relatif mudah dibuat gambar rangkaian penggantinya.

Rangkaian pengganti generator induksi satu fasa penguatan sendiri kondisi mantap seperti pada Gambar 2.13 (Boora, 2009; Hanafy, *et al.*, 2008).



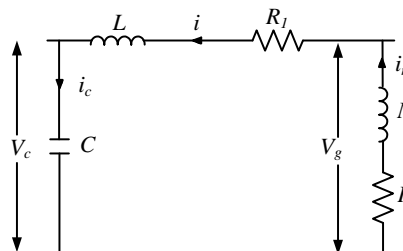
Gambar 2.13: Rangkaian pengganti generator induksi satu fasa berbeban
Boora, 2009; Hanafy, *et al.*, 2008

Keterangan Gambar 2.13

V_g : tegangan celah udara	(V)
V_L : tegangan terminal beban	(V)
R_1 : resistansi stator	(Ω)
R_2 : resistansi rotor dengan besaran mengacu stator	(Ω)
R_c : resistansi kemagnetan	(Ω)
R_L : resistansi beban	(Ω)
X_1 : reaktansi bocor stator	(Ω)
X_2 : reaktansi bocor rotor mengacu besaran stator	(Ω)
X_C : reaktansi kapasitor penguat	(Ω)
X_m : reaktansi kemagnetan	(Ω)
X_L : reaktansi beban	(Ω)
S : slip ($S = \frac{n_s - n_r}{n_s}$)	(unit)
n_s : putaran medan sinkron	(rps)
n_r : putaran rotor	(rps)

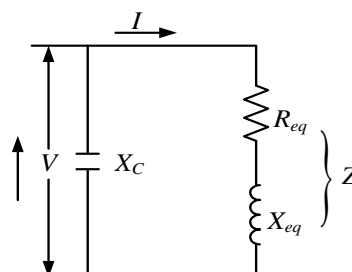
Dari rangkaian pengganti seperti Gambar 2.13 di atas, dengan besar tegangan acuan pada sisi beban ditetapkan, dapat ditentukan nilai-nilai kapasitor penguat yang dibutuhkan, tegangan generator, arus, dan daya.

Rangkaian pengganti generator induksi tanpa beban dapat dibentuk dari Gambar 2.13 dengan melepas beban dan dasar putaran sinkron sehingga slip S sama dengan nol. Akibat pelepasan beban dan slip sama dengan nol, gambar rangkaian pengganti menjadi lebih sederhana seperti Gambar 2.14.



Gambar 2.14: Rangkaian pengganti generator induksi satu fasa tanpa beban

Nilai kapasitor lebih mudah ditentukan bila tersedia rangkaian ekuivalen. Untuk kemudahan menentukan kebutuhan nilai kapasitor, baik kondisi generator berbeban maupun tanpa beban. Dari rangkaian pengganti pada Gambar 2.14 di atas, dibuat rangkaian ekuivalen beserta nilai resistansi dan reaktansi ekuivalennya (R_{eq} , X_{eq}) seperti pada Gambar 2.15, maka dengan relatif lebih mudah untuk menentukan nilai kapasitor yang dibutuhkan.

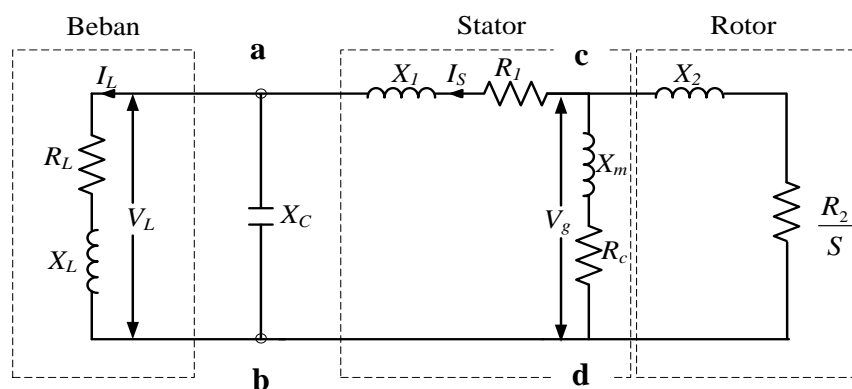


Gambar 2.15: Rangkaian ekuivalen generator induksi penguatan sendiri

2.12 Kapasitor Penguat

Kapasitor penguat adalah kapasitor yang digunakan sebagai pencatu daya reaktif untuk generator induksi penguatan sendiri. Kapasitor penguat dipasang pada terminal generator, di samping digunakan untuk catu daya reaktif ke generator juga digunakan catu daya reaktif ke beban yang bersifat induktif (Mahato, et al., 2008; Chan, 1993). Kapasitor penguat yang dibutuhkan dapat dianalisis dari rangkaian pengganti menggunakan persamaan arus, yaitu menggunakan metode tegangan simpul. Dengan tegangan terminal sebagai acuan yang sudah ditentukan, dalam hal ini tegangan ditentukan 220 volt didapatkan nilai kapasitor.

Hukum Kirchhoff ke satu menyatakan jumlah aljabar arus pada satu simpul sama dengan nol. Dari rangkaian pengganti Gambar 2.13 yang dilukis kembali dan diberi tanda simpul **a**, **b**, **c**, dan **d** seperti Gambar 2.16, dengan menggunakan metode tegangan simpul, dianalisis kapasitor penguat yang dibutuhkan.



Gambar 2.16: Rangkaian pengganti generator untuk mencari nilai kapasitor penguat

Persamaan arus pada simpul **a**, yaitu penjumlahan aljabar arus generator (I_{ad}), arus kapasitor (I_C) dan arus beban (I_L) sama dengan nol.

$$I_{ad} + I_C + I_L = 0 \quad (2-8)$$

$$(Y_{ad} + Y_C + Y_L)V_{ab} = 0$$

Dalam hal ini tegangan generator V_{ab} tidak boleh sama dengan nol ($V_{ab} \neq 0$), sehingga

$$\begin{aligned} Y_{ad} + Y_C + Y_L &= 0 \\ -Y_C &= Y_{ad} + Y_L \end{aligned} \quad (2-9)$$

Impedansi antara simpul c-d = Z_{cd}

$$Z_{cd} = \frac{(R_c + jX_m) \left(\frac{R_2}{s} + jX_2 \right)}{\left(\frac{R_2}{s} + jX_2 \right) + (R_c + jX_m)} \quad (2-10)$$

Impedansi a-d = $Z_1 + Z_{cd}$

$$\begin{aligned} Z_1 &= R_1 + jX_1 \\ Z_{ad} &= R_1 + jX_1 + Z_{cd} \\ Z_{ad} &= R_1 + jX_1 + \frac{(R_c + jX_m) \left(\frac{R_2}{s} + jX_2 \right)}{\left(\frac{R_2}{s} + jX_2 \right) + (R_c + jX_m)} \\ Z_{ad} &= \frac{\left(\frac{R_1 R_2}{s} - X_1 X_2 + R_1 R_c - X_1 X_m + \frac{R_2 R_c}{s} - X_2 X_m \right) + j \left(X_2 R_1 + \frac{X_1 R_2}{s} + X_m R_1 + X_1 R_c + X_2 R_c + \frac{X_m R_2}{s} \right)}{\left(\frac{R_2 R_c}{s} - X_2 X_m \right) + j \left(\frac{X_m R_2}{s} + X_2 R_c \right)} \end{aligned} \quad (2-12)$$

$$\text{Admitansi (a-d)} = Y_{ad}, \quad Y_{ad} = \frac{1}{Z_{ad}}$$

$$Y_{ad} = \frac{\left(\frac{R_2 R_c}{s} - X_2 X_m \right) + j \left(\frac{X_m R_2}{s} + X_2 R_c \right)}{\left(\frac{R_1 R_2}{s} - X_1 X_2 + R_1 R_c - X_1 X_m + \frac{R_2 R_c}{s} - X_2 X_m \right) + j \left(X_2 R_1 + \frac{X_1 R_2}{s} + X_m R_1 + X_1 R_c + X_2 R_c + \frac{X_m R_2}{s} \right)} \quad (2-13)$$

$$\text{Impedansi Kapasitor} \quad Z_C = \frac{1}{j2\pi fC} = \frac{-j}{2\pi fC} \quad (2-12)$$

$$\text{Reaktansi kapasitif} \quad X_C = \frac{1}{2\pi fC} \quad (2-13)$$

$$\text{Admitansi kapasitor } Y_{(a-b)} = Y_C \quad ; \quad Y_C = \frac{1}{Z_C} = j2\pi fC \quad (2-14)$$

$$\text{Admitansi beban } Y_{(a-b)} = Y_L \quad Y_L = \frac{1}{Z_L} = \frac{1}{R_L + jX_L} \quad (2-15)$$

$$\text{dengan } j = \sqrt{-1}$$

Dengan menggunakan analisis metode tegangan simpul seperti yang diuraikan pada Lampiran 2, dapat diperoleh nilai kapasitor yang diperlukan.

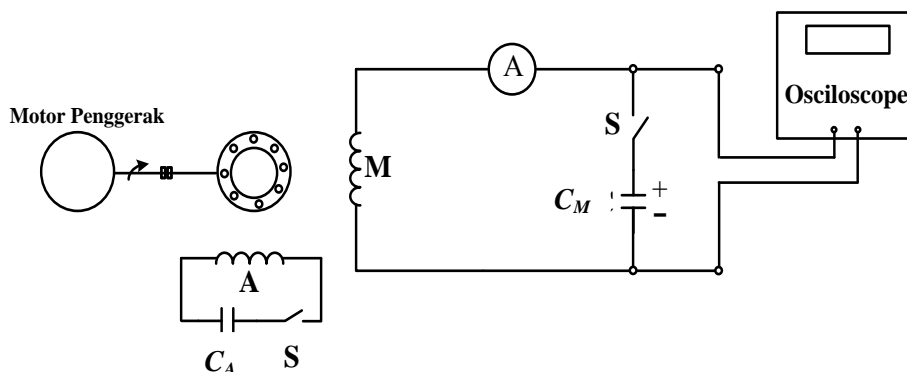
2.13 Pengasutan Generator Induksi Satu Fasa Penguatan Sendiri Putaran Rendah

Yang dimaksud dengan generator induksi putaran rendah dalam disertasi ini adalah generator induksi 12 kutub dengan dasar frekuensi 50 Hz putaran sinkron 500 rpm (Santoso, *et al.*, 2015; Santoso, *et al.*, 2016). Proses pengasutan adalah awal operasi generator mulai dari kondisi diam dengan remanensi magnet, diputar berawal dengan tegangan remanensi dan meningkat hingga dicapai tegangan dalam kondisi mantap.

Remanensi magnet inti besi generator umumnya kecil, oleh karena itu tegangan awal yang ditimbulkan juga kecil (Mismail, 1989). Tegangan yang kecil itu menjadikan generator tidak dapat memberikan arus cukup untuk kapasitor. Hal itu terjadi pada pengasutan generator induksi satu fasa penguatan sendiri putaran rendah. Tegangan yang kecil itu tidak dapat menimbulkan peningkatan arus penguat, sehingga tegangan tidak dapat mencapai keadaan mantapnya (Santoso, *et al.*, 2015). Kapasitor penguat bertegangan awal yang cukup diperlukan untuk pengasutan sebagai penguat tegangan awal generator. Sebelum pengasutan dilakukan, beban harus dilepas dari rangkaian kapasitor. Hal ini untuk menjaga agar energi yang tersimpan dalam kapasitor tidak terlepas (Santoso, *et al.*, 2016).

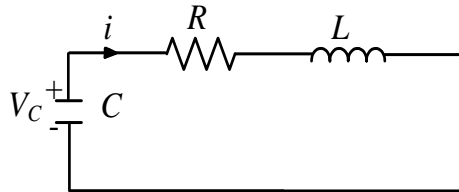
2.13.1 Arus pemicu

Pengasutan dapat berhasil bila generator diputar pada kecepatan nominal dan dipicu dengan arus awal yang cukup, minimum arus awal sama dengan arus penguat generator tanpa beban. Arus awal yang dimaksud adalah arus dari hasil pelepasan tersimpan dalam kapasitor penguat akibat penutupan saklar **S** seperti pada Gambar 2.17.



Gambar 2.17: Bagan hubungan kapasitor penguat dengan generator induksi

Pada awal pengasutan, hubungan antara kapasitor C yang bertegangan awal dengan kumparan stator generator, mirip dengan rangkaian RLC seri seperti pada Gambar 2.18 (Santoso, *et al.*, 2016). Dalam hal ini R resistansi dan L induktansi kumparan stator



Gambar 2.18: Rangkaian R , L , dan C bertegangan awal terhubung seri

Arus yang mengalir karena perubahan rangkaian, dalam hal ini berubah karena penutupan saklar, dinamakan arus transien i_T dinyatakan (Mismail, 2011):

$$i_T = i_F + i_N \quad (2-16)$$

i_F : arus paksa, yaitu arus kondisi mantap (A)

i_N : arus tanggapan alamiah (A)

Arus paksa i_F nilainya tergantung dari tegangan sumber dan impedansi rangkaian kondisi mantap, dinyatakan

$$i_F = \frac{v}{Z(s)} \text{ A} \quad (2-17)$$

v : tegangan sumber (V)

$Z(s)$: impedansi rangkaian (Ω)

Penutupan saklar pada penelitian ini rotor dalam keadaan diam, oleh karena itu tidak ada sumber tegangan yang terpasang. Karena tidak ada sumber tegangan dalam rangkaian menjadikan arus paksa sama dengan nol, sehingga arus transien sama dengan arus tanggapan alamiah, $i_T = i_N$.

Arus yang mengalir karena pelepasan energi tersimpan dalam kapasitor pada penelitian ini merupakan arus tanggapan alamiah. Arus tanggapan alamiah merupakan arus teredam nilainya menyusut menuju nol

Analisis arus tanggapan alamiah diawali dari Persamaan tegangan terminal R, L, C seri

$$v = Z(s) \times i \quad (2-18)$$

Persamaan umum impedansi R, L, C seri

$$Z(s) = R + sL + \frac{1}{sC} \quad (2-19)$$

$$Z(s) = \frac{s^2LC + sRC + 1}{sC} \quad (2-20)$$

Persamaan arus tanggapan alamiah derajat dua diberikan

$$i_N = I_1 e^{s_1 t} + I_2 e^{s_2 t} \quad (2-21)$$

s_1 dan s_2 adalah konstanta redaman yang didapat dari persamaan impedansi yang disamakan dengan nol.

Rangkaian tanpa sumber tegangan, $v=0$. Dengan membuat tegangan sumber sama dengan nol menjadikan Persamaan (2-18) sama dengan nol,

$$Z(s) \times i = 0.$$

Dalam hal ini $i \neq 0$, maka $Z(s) = 0$, sehingga dari Persamaan (2-20) didapat

$$s^2LC + sRC + 1 = 0$$

Dari persamaan pangkat dua, didapat akar-akar persamaan

$$s_{1,2} = -\frac{R}{2L} \pm \sqrt{\left(\frac{R}{2L}\right)^2 - \frac{1}{LC}} \quad (2-22)$$

Untuk nilai R yang kecil menjadikan nilai di bawah tanda akar bernilai negatif, akar-akar persamaan diberikan:

$$s_{1,2} = -\alpha \pm j\omega_n$$

Dengan faktor redaman $\alpha = \frac{R}{2L}$ (s^{-1})

Frekuensi sudut alamiah $\omega_n = \sqrt{\frac{1}{LC} - \left(\frac{R}{2L}\right)^2}$ ($\text{rad}\cdot\text{s}^{-1}$) (2-23)

dan $j = \sqrt{-1}$

Arus tanggapan alamiah dinyatakan dengan Persamaan:

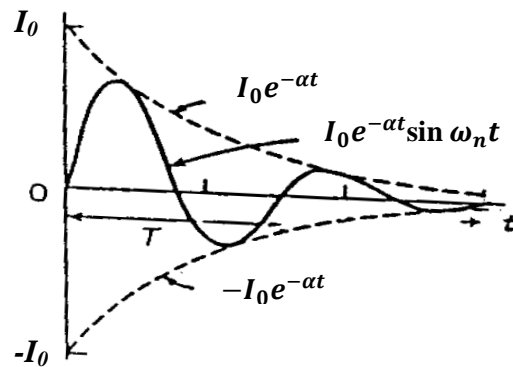
$$i_n = I_0 e^{-\alpha t} \cos(\omega_n t + \theta) \text{ A} \quad (2-24)$$

dengan I_0 : amplitudo arus (A)

Nilai I_0 dan θ dicari dari dua Persamaan pada kondisi awal rangkaian, Persamaan yang ke dua adalah turunan arus tanggapan alamiah terhadap waktu,

$$\frac{di_n}{dt} = -\alpha I_0 e^{-\alpha t} \cos(\omega_n t + \theta) - \omega_n I_0 e^{-\alpha t} \sin(\omega_n t + \theta) \text{ As}^{-1} \quad (2-25)$$

Bentuk arus tanggapan alamiah merupakan gelombang sinusoid yang menyusut seperti pada Gambar 2.19 (Grantham, *et al.*, 1989):

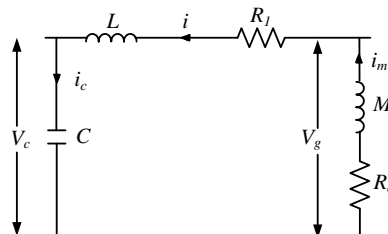


Gambar 2.19: Bentuk gelombang arus sinusoid teredam
Grantham, *et al.*, 1989.

Arus tanggapan alamiah inilah yang akan digunakan sebagai arus pemicu dalam proses pengasutan generator induksi satu fasa, penguaran sendiri, daya rendah, dan putaran rendah.

2.13.2 Arus pengasutan generator

Dari rangkaian pengganti generator induksi satu fasa tanpa beban pada Gambar 2.14, dengan frekuensi yang ditetapkan, dan nilai-nilai resistansi, induktansi kemagnetan M dan induktansi bocor L yang telah didapat, dilukis kembali seperti Gambar 2.20. digunakan untuk mendapatkan peningkatan arus pengasutan.



Gambar 2.20.: Rangkaian pengganti generator induksi satu fasa tanpa beban

Untuk rangkaian pada Gambar 2.20, $i_c = i_m = i$, persamaan tegangan generator induksi satu fasa tanpa beban (Hancock, 1974),

$$z \times i = (R_1 + R_c)i + L \frac{di}{dt} + \frac{1}{C} \int idt - Mi \frac{d\theta}{dt}$$

$$z = (R_1 + R_c) + L \frac{d}{dt} + \frac{1}{C} \int dt - M \frac{d\theta}{dt}$$

Dengan $\frac{d}{dt} = s$ dan $\int dt = \frac{1}{s}$

$$z = (R_1 + R_c) + sL + \frac{1}{sC} - M \frac{d\theta}{dt} \quad (2-26)$$

$\frac{d\theta}{dt}$: kecepatan sudut mekanik (rad/s)

Persamaan tegangan sepanjang rangkaian tertutup pada kondisi awal (Hancock, 1974):

$$0 = \left((R_1 + R_c) + Ls + \frac{1}{Cs} - M \frac{d\theta}{dt} \right) i - Li_0 \quad (2-27)$$

i_0 adalah arus kondisi awal

$$0 = \left(\frac{(R_1 + R_c)Cs + LCs^2 + 1 - M Cs \frac{d\theta}{dt}}{Cs} \right) i - Li_0$$

Persamaan arus: $i = \frac{LCs i_0}{(R_1 + R_c)Cs + LCs^2 + 1 - M Cs \frac{d\theta}{dt}}$

$$i = \frac{i_0}{\frac{(R_1 + R_c)}{L} + s + \frac{1}{LCs} - \frac{M d\theta}{L dt}}$$

Untuk mendapatkan arus transien dengan jalan membuat penyebut sama dengan nol,

$$0 = \frac{(R_1 + R_c)}{L} + s + \frac{1}{LCs} - \frac{M d\theta}{L dt}$$

$$\frac{(R_1 + R_c)}{L} s + s^2 + \frac{1}{LC} - \frac{M}{L} s \frac{d\theta}{dt} = 0$$

$$s^2 + \left(\frac{(R_1 + R_c)}{L} - \frac{1}{L} M \frac{d\theta}{dt} \right) s + \frac{1}{LC} = 0 \quad (2-28)$$

Akar-akar persamaan pangkat dua:

$$s_1 = -\frac{\left(\frac{(R_1 + R_c)}{L} - \frac{1}{L} M \frac{d\theta}{dt} \right)}{2} + \sqrt{\left(\frac{(R_1 + R_c)}{2L} - \frac{1}{2L} M \frac{d\theta}{dt} \right)^2 - \frac{1}{LC}}$$

$$s_2 = -\frac{\left(\frac{(R_1 + R_c)}{L} - \frac{1}{L} M \frac{d\theta}{dt} \right)}{2} - \sqrt{\left(\frac{(R_1 + R_c)}{4L} - \frac{1}{4L} M \frac{d\theta}{dt} \right)^2 - \frac{1}{LC}}$$

$$s_1 = -\frac{(R_1 + R_c - M \frac{d\theta}{dt})}{2L} + \frac{1}{2L} \sqrt{\left(\frac{R_1 + R_c}{(2L)^2} - \frac{M}{(2L)^2} \frac{d\theta}{dt} \right)^2 - \frac{1}{LC}} \quad (2-29)$$

$$s_2 = -\frac{(R_1 + R_c - M \frac{d\theta}{dt})}{2L} - \frac{1}{2L} \sqrt{\left(\frac{R_1 + R_c}{(2L)^2} - \frac{M}{(2L)^2} \frac{d\theta}{dt} \right)^2 - \frac{1}{LC}} \quad (2-30)$$

Pada mesin listrik resistansi stator dan resistansi besi nilainya rendah, oleh karena itu nilai di bawah tanda akar menjadi negatif, persamaan arus dinyatakan:

$$i = I_r e^{-\left(\frac{(R_1 + R_c) - M \frac{d\theta}{dt}}{2L} \right) t} \sin \left(\sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{\left((R_1 + R_c) - M \frac{d\theta}{dt} \right)^2}{(2L)^2}} \right) t \quad (2-31)$$

dengan I_r : arus keadaan awal (A) (arus karena tegangan remanensi)

$$\begin{aligned} \text{faktor redaman: } & \left(\frac{(R_1 + R_c) - M \frac{d\theta}{dt}}{2L} \right) \quad (s^{-1}) \\ \text{frekuensi sudut arus generator: } \omega_g & = \left(\sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{(R_1 + R_c) - M \frac{d\theta}{dt}}{(2L)^2}} \right) \quad (\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}) \quad (2-32) \\ \text{kecepatan sudut mekanik: } & \frac{d\theta}{dt} \quad (\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}) \end{aligned}$$

2.13.3 Induktansi kemagnetan sebagai fungsi arus

Induktansi kemagnetan selama proses pengasutan nilainya tidak konstan melainkan berubah terhadap perubahan arus. Hubungan induktansi kemagnetan terhadap perubahan arus dinyatakan dalam Persamaan (Mismail, 1989):

$$M(i, K) = \frac{K_1}{\sqrt{K_2 + K_3 i^{K_4}}} \quad (2-33)$$

Konstanta K_1 , K_2 , K_3 dan K_4 dapat dicari menggunakan metode Quasi-Newton. Dengan nilai-nilai konstanta K_1 sampai dengan K_4 didapat, nilai M pada Persamaan (2-33) dimasukkan ke Persamaan (2-31) didapat nilai peningkatan arus pengasutan generator.

2.14 Tegangan Pengasutan Generator Induksi Putaran Rendah

Generator induksi penguatan sendiri putaran rendah, amplitudo arus awal sangat kecil jika dibandingkan dengan amplitudo arus tanpa beban kondisi mantap (Santoso, *et al.*, 2016). Pengasutan harus dipicu dengan arus awal yang cukup. Yang dimaksud dengan arus awal adalah arus yang mengalir pada awal terhubungnya kapasitor penguat dengan generator. Selang waktu arus awal atau waktu kontak (*Switching*) sekitar 0,08 detik. (Rogdakis, *et al.*, 2012). Agar pengasutan berhasil, tegangan awal kapasitor harus dapat menghasilkan arus awal yang mendekati arus generator tanpa beban kondisi mantap. Akibat adanya pemicuan, amplitudo tegangan awal generator mendekati tegangan awal kapasitor, dan amplitudo arus awal generator mendekati amplitudo arus picu, (Santoso, *et al.*, 2016).

Arus hasil pelepasan energi yang tersimpan kapasitor bertegangan awal merupakan arus tanggapan alamiah i_N yang digunakan sebagai pemicu pada Persamaan (2-24), ditulis kembali menjadi:

$$i_N = -\frac{V_{C_0}}{\omega_n L} e^{-\alpha_n t} \sin \omega_n t \quad (\text{A}) \quad (2-34)$$

Dengan V_{C_0} : tegangan awal kapasitor (V)

α_n : konstanta redaman (s^{-1})

$$\alpha_n = \frac{R}{2L}$$

ω_n : frekuensi sudut arus pemicu $(rad \cdot s^{-1})$

Dampak dari pemicuan, arus pengasutan generator menjadi penjumlahan arus tanggapan alamiah pada Persamaan (2-34) dengan arus generator induksi Persamaan (2-31):

$$i_g = i_N + i$$

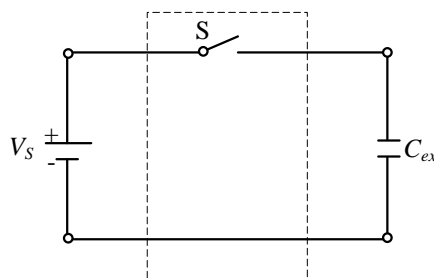
$$i_g = -\frac{V_{C0}}{\omega_n L} e^{-\alpha_n t} \sin \omega_n t + I_r e^{-\left(\frac{R-M\frac{d\theta}{dt}}{2L}\right) t} \sin \left(\sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{\left(R-M\frac{d\theta}{dt}\right)^2}{(2L)^2}} t \right) A \quad (2-35)$$

Tegangan pada terminal generator kondisi tanpa beban sama dengan tegangan kapasitor penguat, arus generator tanpa beban juga sama dengan arus kapasitor penguat. Nilai tegangan pada terminal generator dapat dihitung dari rangkaian pada Gambar 2.20, yaitu reaktansi kapasitif dikalikan dengan arus generator menggunakan persamaan:

$$v_C = X_C \times i_g \quad (2-36)$$

2.15 Rangkaian Pencatu Kapasitor Penguat

Kapasitor penguat generator induksi penguatan sendiri putaran rendah sebelum pengasutan dilakukan sudah harus bertegangan yang cukup. Untuk itu diperlukan rangkaian pencatu kapasitor. Rangkaian pencatu kapasitor itu terdiri atas sumber tegangan searah, beberapa saklar, dan beberapa kapasitor. Untuk memperoleh keserempakan dalam pensaklaran digunakan saklar elektronik. Secara sederhana rangkaian pengisi kapasitor seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 2.21.



Gambar 2.21: Rangkaian pencatu kapasitor penguat C_{ex}

Setelah kapasitor penguat C_{ex} terisi energi yang cukup, saklar S dibuka. Agar proses pembukaan saklar dapat berjalan secara otomatis, maka digunakan saklar elektronik. Salah satu pilihan untuk saklar elektronik adalah thyristor

2.16 Prosedur Pengasutan Generator Induksi Putaran Rendah

Sebelum pengasutan dilakukan, saklar beban dan saklar kapasitor yang bertegangan awal harus dalam kondisi terbuka. Mula-mula generator diputar pada kecepatan sinkron, setelah tercapai, saklar penghubung kapasitor penguat ditutup. Akibat penutupan saklar, kapasitor melepas energi yang tersimpan sehingga menghasilkan arus picu. Dengan adanya arus picu yang cukup, memberikan penguatan dan dapat terjadi proses peningkatan tegangan generator. Saat peningkatan tegangan dapat terjadi penurunan putaran generator. Hal ini terjadi karena peningkatan medan magnet yang cukup besar sehingga terjadi pengereman. Dengan adanya penurunan putaran tersebut menyebabkan tidak tercapai tegangan nominal. Oleh karena itu, putaran harus dinaikkan kembali ke posisi sampai tercapai tegangan nominal dalam keadaan mantap. Setelah pada posisi putaran dan tegangan nominal dalam keadaan mantap, baru beban dapat dihubungkan ke generator secara bertahap.

Generator induksi yang digunakan pada pembangkit listrik tenaga mikrohidro, peningkatan putaran dapat dilakukan dengan jalan menambah debit air yang masuk turbin air. Hal ini dapat dilakukan secara manual atau otomatis dengan menggunakan governor.